

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SULCOS DE EROSÃO
EXPERIMENTAIS NO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO

SANDRO AUGUSTO BEZERRA
Engenheiro Agrônomo (UFRPE)
Mestre em Agronomia – Ciência do Solo (UFRPE)

Tese apresentada como um dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor
em Ciência do Solo.

Recife, fevereiro de 2007.

SANDRO AUGUSTO BEZERRA

Engenheiro Agrônomo - UFRPE

Mestre em Agronomia/Ciência do Solo - UFRPE

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Departamento de Agronomia

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Aprovada em: 26/02/2007

Pela banca examinadora

JOSÉ RAMON BARROS CANTALICE

D.Sc., Orientador PPG-Ciência do Solo / UFRPE

ALBERÍCIO PEREIRA DE ANDRADE

D.Sc. - UFPB

ALEX MAURÍCIO ARAÚJO

D.Sc. - UFPE

JOSÉ JÚLIO VILLAR RODRIGUES

D.Sc. - UFRPE

MARCUS METRI CORRÊA

D.Sc. - UFRPE

ADEMAR BARROS DA SILVA

D.Sc. - EMBRAPA

Recife, fevereiro de 2007

Dedicatória

*A Deus, à Virgem Maria e aos Espíritos de Luz que sempre me
conduzem por bons caminhos*

*A meus pais, Severino Maurício Bezerra e Maria do Socorro
Bezerra, por todo o apoio e dedicação aos seus filhos.*

*As bênçãos da minha vida: Victor Augusto e Patrícia Regina, por todo
amor.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que sempre coloca “anjos da guarda” em meu caminho.

Primeiramente a Virgem Maria que sempre intercedeu por mim junto a Deus Pai.

Primeiramente aos “Espíritos de Luz” que estão sempre comigo.

Em especial, ao Professor José Ramon Barros Cantalice – ***“E desceu a chuva, correram as torrentes, sopraram os ventos, e bateram com ímpeto contra aquela casa; contudo não caiu, porque estava fundada sobre a rocha.” (Matheus Cap.7).*** Por tudo e mais um pouco.

A todos os coordenadores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo durante o período de curso. E aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/UFRPE, os quais contribuíram não só nesta pesquisa, mas, também, no meu enriquecimento profissional.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”. (Cora Coralina)

Ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE – pela infra-estrutura.

À Unidade Acadêmica de Serra Talhada, pela infra-estrutura para realização do projeto.

Aos técnicos da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Mário e Pinheiro, pela disponibilidade de apoio no decorrer dos trabalhos em campo e ao Coordenador Geral da Unidade Jeová.

Ao Pessoal da Secretaria do Centro de Pesquisas de Solo, sempre dispostos a auxiliar (mesmo fora do horário de atendimento dos alunos) Socorro “help”, Seu Noca e Josué.

Ao Amigo Francisco José de Freitas, por todo apoio durante a realização dos trabalhos, companheirismo e dedicação, como se fôssemos amigos de décadas. O meu muito Obrigado!

À professora Izabel Cristina de Luna Galindo, a qual compartilhou desde os tempos da graduação, além dos ensinamentos de manejo e conservação do solo, o gosto pela pesquisa e a vontade de sempre querer saber mais.

Aos amigos Sandra Regina – DEN/UFPE e Alexandre Tavares. Pelo apoio.

A todos os colegas de pós-graduação pelo apoio e distração nos momentos vividos.

À minha família: Pais, Irmãos, Sogros, Cunhados e Avós. Companheiros de todas as horas (principalmente das mais estressantes).

E especialmente agradeço a Deus, por minha esposa Patrícia Regina “TE AMO” e ao meu filho Victor Augusto “AMO AINDA MAIS” pelo apoio, paciência e estímulo permanente e incondicional.

"Quando os Espíritos não respondem a certas perguntas, será por que o não queriam, ou porque uma força superior se opõe a certas revelações?"

Por ambas essas causas. Há coisas que não podem ser reveladas e outras que o próprio Espírito não conhece."

O Livro dos médiuns

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	-----	12
Objetivo geral	-----	13
Hipóteses	-----	13
CAPÍTULO I	-----	
CAPÍTULO II	-----	
CAPÍTULO III	-----	
APÊNDICE		

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DA EROÇÃO EM SULCOS EM UM CAMBISSOLO DO SEMI-ÁRIDO DO BRASIL

RESUMO -----	15
ABSTRACT -----	16
INTRODUÇÃO -----	17
Hidráulica do escoamento nos sulcos de erosão -----	19
Tamanho de partículas do sedimento -----	21
MATERIAL E MÉTODOS -----	22
Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos -----	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	28
CONCLUSÕES -----	38
LITERATURA CITADA -----	39

CAPÍTULO II

TAXAS DE EROSIÃO E ERODIBILIDADE DO SOLO EM SULCOS PRÉ-FORMADOS EM UM CAMBISSOLO DO SEMI-ÁRIDO PERNAMBUCANO

RESUMO -----	4
ABSTRACT -----	
INTRODUÇÃO -----	
Erodibilidade do solo em sulcos de erosão -----	
Taxas de erosão em sulcos -----	
MATERIAL E MÉTODOS -----	
RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	
Tensão de cisalhamento e taxa de desagregação -----	
Erodibilidade do solo e tensão crítica de cisalhamento -----	
CONCLUSÕES -----	
LITERATURA CITADA -----	

CAPÍTULO III

DESEMPENHO DE EQUAÇÕES DE TRANPORTE DE SEDIMENTOS EM SULCOS DE EROÇÃO EM UM CAMBISSOLO NO SEMI-ÁRIDO DO BRASIL

RESUMO	4
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	
MATERIAL E MÉTODOS	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	
Avaliação das equações de transporte sólido	
CONCLUSÕES	
LITERATURA CITADA	

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Representação esquemática da área experimental com a distribuição das parcelas em sulcos de forma casualizada -----	24
Figura 2. Perfilômetro utilizado para obtenção das seções geométricas dos sulcos de erosão -----	25
Figura 3 Desmoronamento das paredes laterais do sulco durante a aplicação do teste (a); e desnível formado no leito do sulco em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido (b) -----	29
Figura 4. Relação entre a descarga líquida e a velocidade média da água nos sulcos formados em CAMBISSOLO de textura média do semi-árido pernambucano. Média de 5 repetições -----	31
Figura 5. Relação entre a descarga líquida e o perímetro molhado na erosão em sulcos. Média de 5 repetições -----	32
Figura 6. Relação entre a descarga líquida e o Raio hidráulico na erosão em sulcos. Média de 5 repetições -----	33
Figura 7. Variação do raio hidráulico (R_h) e da área (A) dos sulcos para as vazões aplicadas. Média de 5 repetições -----	34
Figura 8. Distribuição de diâmetro dos sedimentos erodidos durante a aplicação das vazões para escoamento superficial em sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Média de 5 Repetições -----	38

CAPÍTULO II

Figura 1. Representação esquemática da área experimental com a distribuição das parcelas em sulcos de forma casualizada -----	
Figura 2. Taxa de desagregação de solo nos sulcos em função do tempo de aplicação de água aos sulcos, para diferentes vazões. Médias de cinco repetições -----	
Figura 3. Tensão cisalhante média do escoamento em função das taxas de descarga líquida dos sulcos. Média de cinco repetições -----	
Figura 4. Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento -----	
FIGURA 5. Perda total de solo (kg m^{-2}) obtidas por diferentes níveis de vazão aplicados em sulcos, que variaram de 17,5 a 110 L min^{-1} . Valores médios de 5 repetições -----	

CAPÍTULO III

Figura 1. Disposição das parcelas experimentais em um bloco no experimento de erosão em sulcos -----	
Figura 2. Aspecto do sulco pré-formado em um CAMBISSOLO com textura franco arenosa sob aplicação de 60 L m^{-1} -----	
Figura 3. Representação da descarga sólida (kg s^{-1}) estimada pela potência do escoamento ($\Omega = \rho_w g S q$ em kg s^{-3}), para as vazões aplicados de 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min^{-1} -----	
Figura 4. Valores de descarga sólida observada e estimada pelas equações -----	

de transporte sólido testado nos sulcos de erosão do semi-árido pernambucano -----

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Características físicas e químicas da camada arável (0-10 cm) do CAMBISSOLO de uma encosta no semi-árido do Brasil, Serra Talhada-PE -----	23
Tabela 2. Geometria da seção transversal dos sulcos: Área (A), perímetro molhado (P_m) e raio hidráulico (R_h) em função das vazões aplicadas nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Médias de 4 observações em cinco repetições -----	30
Tabela 3. Características hidráulicas médias do escoamento nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Valores médios de 5 repetições -----	35
Tabela 4. Tamanho médio de partículas do sedimento erodido, dado pelo índice d_{50} , em função da vazão aplicada nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Média de 5 repetições -----	37

CAPÍTULO II

Tabela 1. Características físicas e químicas da camada arável (0-10 e 10 -20 cm) do CAMBISSOLO de uma encosta no semi-árido do Brasil, Serra Talhada-PE -----	4
Tabela 2. Taxa média de desagregação do solo em sulcos (D_r) e tensão cisalhante média do escoamento (τ), em função das vazões aplicadas. Médias de 5 repetições -----	

CAPÍTULO III

Tabela 1. Características hidráulicas dos sulcos e dos escoamentos, a partir dos dados gerados em campo, em um Cambissolo do semi-árido de Pernambuco. Média de cinco repetições -----	aaa
Tabela 2. Carga de sedimentos observada e estimada, e avaliação do erro médio de estimativa da descarga sólida em (kg s^{-1}), através das equações utilizadas para as vazões aplicadas -----	

APÊNDICE

APÊNDICE 1. Declividade das parcelas do experimento de erosão em sulcos -----	aaa
APÊNDICE 2. Umidade gravimétrica do solo nos sulcos, antes dos testes -----	
APÊNDICE 3. Tamanho médio dos sedimentos, dado pelo d_{50} oriundos da erosão em sulcos em função da vazão aplicada -----	
APÊNDICE 4. Área, perímetro molhado e raio hidráulico da seção transversal dos sulcos -----	
APÊNDICE 5. Valores médios de características hidráulicas do escoamento nos sulcos experimentais em solo recém preparado, determinados durante 20 minutos de aplicação de vazões -----	

INTRODUÇÃO GERAL

O processo erosivo do solo provocado pela água evidencia-se pela desagregação e transporte das partículas de solo e, por conseguinte, pela deposição das mesmas, o que compreende quatro fases distintas: desagregação das partículas do solo provocado pelo impacto das gotas de chuva; desagregação promovida pelo escoamento superficial; transporte das partículas de solo; e transporte pelo escoamento superficial.

O volume da água dentro de um sulco de erosão é influenciado pela área de contribuição das vertentes, da microtopografia da área, e das variações nas taxas do escoamento superficial. O volume que escoar para o sulco influencia a quantidade de água e sedimento transportado, portanto, a descarga líquida relaciona-se com a habilidade do escoamento em desagregar e transportar sedimento.

O desenvolvimento dos sulcos é facilmente reconhecido em campo pela presença de canais irregulares, provocando a remoção superficial do solo. A erosão em sulcos pode ser uma forma de erosão extremamente severa em regiões expostas a chuvas torrenciais semelhantes a trópicos úmidos. Muitas pesquisas definem sulcos de erosão como sendo: microcanais, pequenos o bastante que podem ser removidos por meio de operações de lavoura normal.

Os sulcos também ocorrem em áreas onde não há uso contínuo do solo. Portanto, uma definição mais geral dos sulcos de erosão se faz necessária: são canais pequenos com pequenas dimensões, que ocorrem em declives maiores que 2 -3%, normalmente descontínuos; podendo apresentar conexão com um sistema de drenagem da encosta; os mesmos podem ser obliterados entre uma chuva e outra, pelo desmoronamento das paredes dos sulcos, que assim excede a capacidade de transporte da água no canal.

O principal fator da erosão em sulcos é a tensão cisalhante da água concentrada sobre o fundo e as laterais do sulco, que age diretamente desagregando as partículas do solo, formando incisões no leito dos sulcos (*headcuts*), as quais avançam para montante, ou seja, de forma contrária à direção da água ou no desmoronamento das paredes laterais do sulco.

O escoamento concentrado em sulcos caracteriza-se por apresentar, sob condições de declive acentuado, lâmina de água na ordem de centímetros ou

menos, regimes de escoamento hidráulico do tipo transição rápida ($500 < R_e < 2500$ e $F_r > 1$) ou turbulento rápido ($R_e > 2500$ e $F_r > 1$). Sendo assim, as condições existentes no escoamento concentrado em sulcos diferem do que ocorre nos rios e canais, somente pela menor altura da lâmina de escoamento.

Um dos parâmetros importantes para prognósticos das taxas de erosão do solo é o transporte de sedimentos pelo escoamento superficial, pois é através dessa determinação que é possível saber quanto do sedimento que é desagregado pelo escoamento concentrado nos sulcos de erosão.

A região semi-árida do Brasil apresenta hidrologia com padrão caracterizado pelo caráter intenso, pela concentração dos volumes de chuvas e de escoamentos produzidos em curtos períodos de tempo. Essa pouca duração das chuvas do semi-árido e de grande variação de recorrência, em face da irregular ocorrência espacial e temporal produzem escoamentos superficiais e sub-superficiais que ocorrem na forma de eventos extremos. Esses eventos extremos ressaltam o caráter probabilístico do transporte de sedimentos no ambiente semi-árido do Brasil.

Objetivo

Geral

O presente trabalho tem como objetivo conhecer a hidráulica do escoamento e das variáveis físicas do solo envolvidas na desagregação e no transporte de sedimentos pelo escoamento concentrado em sulcos pré-formados.

Hipóteses

As hipóteses neste trabalho foram as seguintes:

-A identificação das características hidráulicas do escoamento concentrado em sulcos pré-formados possibilitará o conhecimento das condições em que ocorre a erosão em sulcos;

-As forças dinâmicas do escoamento geram forças de desagregação sobre a superfície dos solos maiores que as forças de agregação do mesmo, e assim as taxas de desagregação do solo se relacionam com a variação da tensão de cisalhamento do solo e com as condições dos solos estudados;

-O aumento da vazão aplicada nos sulcos pré-formados produzirá um aumento na taxa de desagregação de solo. Esse aumento ocorrerá em função de um aumento da tensão cisalhante do escoamento.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DA EROSÃO EM SULCOS EM UM CAMBISSOLO DO SEMI-ÁRIDO DO BRASIL

RESUMO

A erosão em sulcos é o resultado da concentração do escoamento superficial nas micro-depressões da superfície do solo, que evolui para forma de microcanais naturais, sendo causa da degradação dos solos, e conseqüentemente prejuízos ao setor agrícola. A mesma influência tanto as economias locais e regionais, quanto os recursos naturais de água e solo. Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos pré-formados caracterizando os regimes de escoamento, e avaliar as mudanças induzidas na geometria dos sulcos pré-formados. Para tal, um experimento foi realizado consistindo na aplicação das vazões de 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min⁻¹ com duração de 20 minutos, em sulcos pré-formados num CAMBISSOLO do sertão pernambucano, município de Serra Talhada, Brasil. O aprofundamento dos sulcos foi dominante no início dos testes. A partir do momento em que o sulco atingiu o solo não revolvido, o processo erosivo, ou seja, a ação da tensão cisalhante caracterizou-se principalmente pelo alargamento do canal, desgastando com maior proporção a base das paredes laterais dos sulcos. A ação da concentração do escoamento superficial nos sulcos experimentais produziu regimes de escoamento na faixa de transição supercrítico, atestando a ocorrência da erosão em sulcos. O cisalhamento na base do sulco provocado pelo escoamento facilitou o desmoronamento nas paredes laterais.

Palavras chaves: erosão hídrica, hidráulica do escoamento, perfilômetro, regime de escoamento.

ABSTRACT

Rill erosion is the result of the concentration of the surface runoff on the micro-depressions of surface of the soil, causing the soil degradation, and consequently damages to the agricultural sector, influencing in such a way the local and regional economies, with consequences in the social environment. Therefore the objectives of this work were to evaluate the hydraulic conditions of the water flow in rills and to characterize the water flow regime, and to measure the induced changes in the geometry of the rills. An experiment was set up consisting of the application of outflows of 17.5; 47; 60; 77 and 110 L min⁻¹ with duration of 20 minutes, in preformed rills in a CAMBISSOLO of the Pernambuco State, city of Serra Talhada. The deepening of the rills was dominant at the beginning of the tests. From the moment where the rill reached the undisturbed soil, the erosive process, that is, the action of the shear stress was characterized mainly by the widening of the rill, detached to the base of the sidewalls of rills. The action of the concentration of the water flow in the rills preformed produced stream regimes in the supercritical transitional, range certifying the attainment of erosion rills. The shear stress at the base of the rill provoked by the flow facilitated the collapse in the sidewalls.

Key words: water erosion, hydraulic flow, profilometer, flow regimes.

INTRODUÇÃO

O escoamento superficial tem início quando a intensidade de precipitação torna-se maior do que a taxa de infiltração da água no solo, sendo conseqüência da superação da capacidade de retenção de água pelo solo, após a ocorrência de uma chuva. Associado ao escoamento superficial, ocorre o transporte de partículas do solo que sofrem deposição somente quando sua velocidade é reduzida (Griebeler et al., 2001).

A erosão hídrica é um dos principais processos associados à degradação ambiental, podendo ser definida como um processo de desagregação e transporte das partículas do solo causado por agentes erosivos (Elliot & Laflen, 1993; Griebeler et al., 2001; Römken et al., 2001). Dessa forma, a erosão reduz a capacidade produtiva das culturas, além de causar sérios danos ambientais, tais como: assoreamento e poluição das fontes de água (Zartl et al., 2001; Cogo et al., 2003).

A desagregação e o transporte das partículas do solo na erosão em sulcos se dão pela ação das forças hidráulicas provocadas pelo escoamento superficial concentrado nos sulcos, originado pelas chuvas (Polyakov & Nearing, 2003). Para preservar a qualidade dos cursos de água é necessário o conhecimento das características do sedimento produzido pela erosão (Cassol et al., 2005).

A erosão em sulcos constitui-se na segunda fase evolutiva do processo físico da erosão hídrica do solo, que é marcada pela mudança da forma do escoamento. De difuso sobre a superfície do solo, na fase inicial da erosão em entressulcos, o mesmo concentra-se na segunda fase, em pequenas depressões da superfície do solo, chamadas de sulcos de erosão. Quando isso ocorre, a lâmina de escoamento desenvolve maior tensão de cisalhamento pelo aumento de espessura, elevando, portanto, a capacidade do escoamento em desagregar o solo (Cantalice et al., 2005).

Merrit (1984), observando lâminas de escoamento em ensaios de laboratório, identificou vários estágios no processo de formação dos sulcos. Antes da formação do sulco ocorre um estágio classificado como regime laminar com Reynolds (Re) < 500. No estágio seguinte, o escoamento já se concentrou em canais bem definidos, caracterizando regime de transição, sendo que, no terceiro estágio, o sulco apresenta incisões na superfície do solo, na forma de "headcuts", processo

denominado por Merten (2000) de erosão regressiva, que é favorecido pelo escoamento nas laterais dos sulcos que contribui para o aumento dos mesmos e avanço dos headcuts (Robinson & Hanson, 1995).

Segundo Auzet et al. (1993), os sulcos são processos muito efetivos na transferência de escoamento a uma longa distância, e a deposição pode acontecer em estradas ou em áreas urbanas, sendo sempre associadas com o desenvolvimento de uma rede efêmera de canais. Bryan & Rockwell (1998) relatam que alguns estudos mostram a elevação das taxas de erosão do solo aumenta com o início dos sulcos. Este aumento no desenvolvimento dos sulcos também tem significado geomorfológico, com implicações potenciais nas encostas e na evolução da rede de drenagem.

A erosão em sulcos é um dos mais importantes subprocessos da erosão hídrica (Govers & Rauws, 1986) e é extremamente severo em regiões expostas a chuvas torrenciais (Planchon et al., 1987). Segundo Bryan (1987), muitas pesquisas definem sulcos de erosão como sendo: microcanais, pequenos o bastante que podem ser removidos através de operações de lavoura normal. No entanto, Selby (1994) relata que como os sulcos existem em áreas onde não há uso contínuo do solo, uma definição mais geral dos sulcos de erosão se faz necessária: são canais com pequenas dimensões, que ocorrem em declives maiores que 2-3%, normalmente descontínuos; podendo apresentar conexão com um sistema de drenagem da encosta e ser obliterado entre uma chuva e outra, pelo desmoronamento das paredes laterais. Isto ocorre devido a diversos processos, no qual predomina as forças hidráulicas provocadas pelas chuvas e escoamentos superficiais nos sulcos (Polyakov & Nearing, 2003).

Com a concentração do escoamento nos sulcos a lâmina de escoamento desenvolve maior tensão de cisalhamento pelo aumento da espessura, elevando, portanto, a capacidade do escoamento em desagregar o solo (Cantalice et al., 2005). Nesse ponto, algumas variáveis hidráulicas responsáveis pela desagregação do solo em sulcos são citadas, incluindo relações envolvendo as taxas de descarga de água (Meyer & Wischmeier, 1969), tensão de cisalhamento (Nearing et al., 1989), e potência do escoamento (Nearing et al., 1997), adaptado do conceito de Bagnold (1988).

Hidráulica do escoamento nos sulcos de erosão

Os sulcos apresentam variação morfológica no tempo e no espaço. O fundo e as paredes variam de geometria quando o solo é erodido, alterando as características hidráulicas do escoamento, as quais são responsáveis pela dinâmica de formação do mesmo (Lei et al., 1998). O aumento crescente no desenvolvimento de técnicas que sejam capazes de levar ao conhecimento das relações hidráulicas e da morfologia dos sulcos, para determinação da capacidade de desagregação e do transporte neste escoamento concentrado, fez-se abrir mão da utilização da prática de pré-formação dos sulcos, expondo-os a ação cisalhante do escoamento, implicando na perda de informações, no entanto, reproduzindo as condições hidráulicas de um sulco bem desenvolvido (Elliot et al., 1989). Com isso, obtêm-se relações entre o perímetro molhado, o raio hidráulico e a área dos sulcos, que são dados importantes para determinar a tensão crítica de cisalhamento do escoamento nos sulcos de erosão (Cantalice, 2002; Giasson & Cassol, 1996 e Elliot et al., 1989).

A concentração do escoamento não ocasiona sozinho o início da erosão em sulcos. Portanto, o exame das condições hidráulicas constitui então, uma base necessária para a discussão do desenvolvimento dos sulcos e das propriedades do solo envolvidas (Bryan, 2000).

As mudanças seccionais que ocorrem durante a presença de água dentro de um sulco afetam o limite do canal condicionando a profundidade dos escoamentos e dos sulcos que diretamente afetam a velocidade da água que se movem pelos canais (Gatto, 2000).

O escoamento livre, ou escoamento em canais abertos (sulcos) é caracterizado pela presença de uma superfície em contato com a atmosfera, submetida, portanto, à pressão atmosférica (Roberson & Crowe, 1997). A superfície livre corresponde, na realidade, ao contato de dois líquidos – ar e água – com características físicas distintas. Um aspecto importante dos escoamentos livres corresponde a grande variabilidade das paredes dos condutos, quanto à forma e a rugosidade. Esta variação pode ocorrer no tempo e no espaço.

O escoamento num canal aberto é mais simples do que o escoamento em tubos cheios; entretanto, a geometria da superfície livre não é conhecida, fornecendo uma condição de contorno “flutuante” (Sissom & Pitts, 2001). Em função da geometria da

seção transversal e da profundidade de escoamento, podem ser definidos parâmetros, que têm grande importância e são largamente utilizados nos cálculos hidráulicos (Baptista et al., 2003). Estes parâmetros estão descritos abaixo.

Seção ou área molhada (A , m^2): parte da seção transversal que é ocupada pela água; Perímetro molhado (P_m , m): comprimento relativo ao contato da água com o conduto; Profundidade (h , m): altura do escoamento acima do fundo do canal; Raio hidráulico (R_h , m): razão entre a área molhada e o perímetro molhado (eq. 01);

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (01)$$

O raio hidráulico constitui a dimensão hidráulica de altura característica, utilizada para o cálculo do número de Reynolds no escoamento em canais abertos.

No que diz respeito a canais fluviais naturais, trabalha-se frequentemente com as chamadas “seções transversais”, que são utilizadas para cursos de água de grandes larguras e pequenas profundidades. Assim, supõe-se que a profundidade é desprezível em relação à largura do curso de água, ou seja, o perímetro molhado pode ser assimilado a largura (B), obtendo-se (Baptista et al., 2003):

$$A = B h \quad P_m \cong B \quad R_h \cong h \quad (02)$$

Tendo em vista que o escoamento livre se processa exclusivamente em função da gravidade, os desníveis desempenham um papel primordial no seu estudo, sendo que a declividade corresponde ao parâmetro característico. As declividades (S) são, evidentemente, adimensionais, expressas em “metros por metro” ($m \ m^{-1}$), correspondendo à razão entre o desnível e a distância horizontal (Baptista et al., 2003).

Neste caso, está se admitindo que a declividade do fundo do sulco é igual à declividade da linha d’água (Julien & Simons, 1985; Cantalice et al., 2005).

$$S = S_f \quad (03)$$

onde S_f é a declividade da linha d’água, que pode ser determinada através da relação da equação de Darcy-Weisbach:

$$S_f = \frac{f}{8} \frac{V^2}{g R_h} \quad (04)$$

onde f é o fator de fricção de Darcy-Weisbach, V = velocidade média do escoamento ($m \ s^{-1}$), g = aceleração da gravidade ($m \ s^{-2}$) e R_h = raio hidráulico (m) (Julien & Simons, 1985).

Tamanho de partículas do sedimento

O conhecimento do tamanho das partículas erodidas dos sulcos permite a previsão de áreas deposicionais. Porém, as informações disponíveis não são conclusivas e, algumas vezes, contraditórias, não permitindo uma caracterização do tipo de partículas presentes nos sedimentos depositados oriundos da erosão em sulcos (Giasson & Cassol, 1996).

A obtenção do tamanho das partículas do sedimento transportado pela enxurrada tem importância no desenvolvimento de modelos de predição de erosão e de produção de sedimentos, previsão de áreas deposicionais, as perdas de nutrientes decorrentes desse transporte e do potencial poluente dessas partículas transportadas para o leito dos rios, lagos etc.

Vários fatores determinam o tamanho das partículas do sedimento, incluindo a textura do solo, densidade de partículas, rugosidade superficial, relevo, uso e forma de atuação dos agentes erosivos (Young, 1980). A carga de sedimentos, transportada pelos escoamentos superficiais de água na erosão hídrica, depende de variáveis hidráulicas como taxa de descarga líquida, velocidade e profundidade do escoamento, e das dimensões e densidade das partículas que constituem o sedimento.

Os principais objetivos deste trabalho foram:

1. avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos e caracterizar o regime de escoamento sob condições de sulcos pré-formados sobre um CAMBISSOLO recém preparado no semi-árido pernambucano;

2. medir as mudanças induzidas na geometria dos sulcos pré-formados com o aumento da vazão aplicada, determinando as relações entre o perímetro molhado, o raio hidráulico e a área dos sulcos através da metodologia técnica do uso dos perfilômetros;

3. avaliar a distribuição de diâmetro de sedimentos decorrentes da aplicação de vazões superficiais na erosão em sulcos.

MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações das condições hidráulicas e das relações de erosão em sulcos em condições de solo recém preparado foram conduzidas na Unidade Acadêmica de Serra Talhada da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, em setembro de 2005. Essa unidade localiza-se na região semi-árida do Alto Sertão do Rio Pajeú, a uma altitude de 429 m, com coordenadas geográficas de 7° 56' 15" de latitude Sul e 38° 18' 45" de longitude Oeste, distando 420 km de Recife. De acordo com a classificação de Koppen, o clima enquadra-se no tipo Bwh, denominado semi-árido, quente e seco, chuvas de verão-outono com pluviosidade média anual para o período de 1912 a 1991 de 647 mm ano⁻¹ (SUDENE, 1990), e médias térmicas anuais superiores a 25°C. A área experimental localizou-se no terço médio de uma pendente com aproximadamente 80 m de comprimento e declive médio de 6,5%.

Na área experimental foram coletadas 5 (cinco) amostras de solo na profundidade de 0 a 10 cm, acondicionadas em sacos plásticos, e posteriormente, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm. Após esse procedimento, o solo foi utilizado para determinação da distribuição granulométrica pelo método do densímetro em (g kg⁻¹) e da densidade de partícula D_p (g kg⁻¹) pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

O solo da área é um CAMBISSOLO de textura media (franco arenosa) com 59,6% de areia, 21,6% de silte e 18,8% de argila.

Também foram coletadas amostras da superfície do solo, na profundidade de 0 a 7,5 cm, acondicionadas em latas de alumínio, lacradas com fita crepe e levadas para laboratório para determinação da umidade gravimétrica em (kg kg⁻¹). Após pesadas, as latas foram secas em estufa a 105°C por um período de 24 horas, e pesadas novamente com e sem solo seco. A umidade gravimétrica do solo no momento dos testes encontram-se no Apêndice 2.

Para caracterização química do solo das amostras coletadas foram realizadas as determinações de acordo com EMBRAPA (1997). Todos os valores das análises físicas e químicas acima descritas encontram-se na Tabela 1.

As parcelas experimentais, que consistiram nos sulcos pré-formados com a utilização de uma enxada utilizando-se da extremidade cortante e mantendo-se a inclinação natural do terreno. As dimensões dos sulcos foram de 5 m de

comprimento, no sentido da maior pendente, 6 cm de profundidade e 0,5 m de largura, delimitados superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30 cm de altura, dos quais 15 cm foram enterrados.

Os 25 sulcos pré-formados foram divididos em 5 blocos de 5 sulcos (Figura 1), e imediatamente submetidos aos testes de erosão em sulcos com a aplicação dos diferentes níveis de vazão, sendo realizado um teste por vez.

Tabela 1. Características físicas e químicas da camada arável (0-10 e 10 -20 cm) do CAMBISSOLO de uma encosta no semi-árido do Brasil, Serra Talhada-PE.

Características ⁽¹⁾	Profundidade, cm
	0 -10
Argila (< 0,002 mm), g kg ⁻¹	0,188
Silte (0,002 – 0,050 mm), g kg ⁻¹	0,216
Areia (0,050 – 2,00 mm), g kg ⁻¹	0,596
Densidade global, g cm ⁻³	1,36
Densidade das partículas, g cm ⁻³	2,55
Porosidade total, cm ⁻³ cm ⁻³	0,47
Matéria orgânica, g kg ⁻¹	17,17
Carbono orgânico, g kg ⁻¹	9,96
pH em água, (1:2,5)	7,7
Soma cátions trocáveis (S), cmol _c dm ⁻³	11,22
Capacidade de troca de cátions (CTC), cmol _c dm ⁻³	13,23
P, mg dm ⁻³	232
Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³	2,91
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,46
Ca ⁺² + Mg ⁺² , cmol _c dm ⁻³	6,85
Ca ⁺² , cmol _c dm ⁻³	4,60
Al ⁺³ , cmol _c dm ⁻³	0,00
H + Al, cmol _c dm ⁻³	2,01

⁽¹⁾ EMBRAPA (1997)

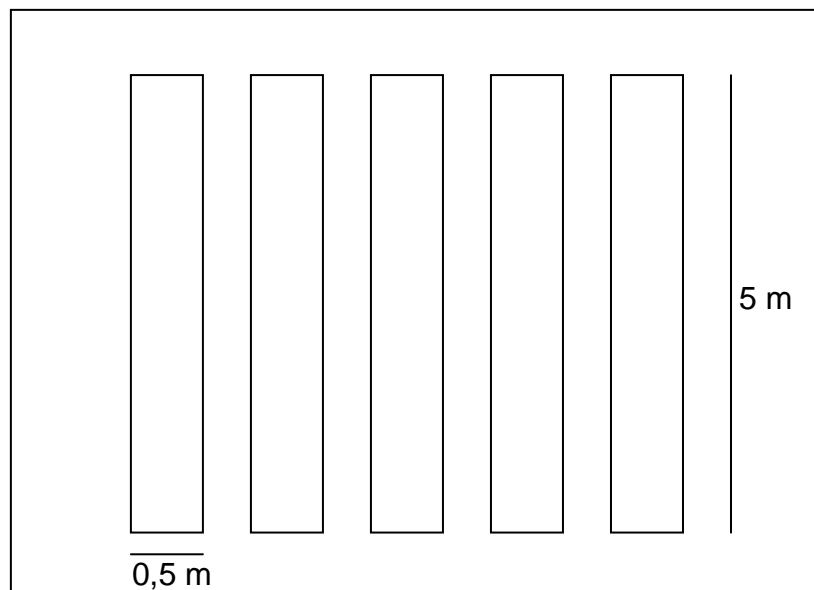


Figura 1. Representação esquemática da área experimental com a distribuição das parcelas em sulcos de forma casualizada.

Os tratamentos consistiram na aplicação dos diferentes níveis de vazão de forma aleatória, conforme abaixo:

Tratamento 1 – $17,5 \text{ L min}^{-1}$;

Tratamento 2 – 47 L min^{-1} ;

Tratamento 3 – 60 L min^{-1} ;

Tratamento 4 – 77 L min^{-1} ;

Tratamento 5 – 110 L min^{-1} ;

As vazões foram determinadas segundo dados de precipitação de 25 a 175mm para uma duração de 24 horas e períodos de retorno de 1 a 100 anos, de acordo Molinier, et al., (1994).

Os testes experimentais tiveram duração de 20 minutos (Cantalice, 2002), com a aplicação das diferentes vazões em cada sulco.

A água foi conduzida aos sulcos, por gravidade e através de mangueira de polietileno calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 1000 L, mantido sob carga constante com a água de um reservatório próximo à área experimental. Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de

energia na forma de recipientes plásticos circulares, de tal forma que a borda superior do recipiente ficasse no nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegavam aos sulcos pelo transbordamento dos recipientes. Na extremidade inferior dos sulcos foi instalada uma calha coletora metálica para auxiliar na coleta das amostras de descargas líquida e sólida.

Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos

As dimensões das seções transversais nos sulcos foram aferidas por intermédio de um perfilômetro objetivando-se a determinação da área, perímetro molhado e raio hidráulico. O perfilômetro constitui-se de 30 hastes plásticas espaçadas de 2 cm e acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura (Figura 2). As medições foram realizadas imediatamente após o início do escoamento e 2 minutos antes do termino dos testes. As medidas foram tomadas a 1,0 e 4,0 m da extremidade superior dos sulcos conforme descrito a seguir. Com o perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas, soltaram-se suavemente as hastes plásticas até a superfície do solo, para em seguida serem fixadas as estruturas. Neste momento o perfilômetro era removido para fora da área de testes.



Figura 2. Perfilômetro utilizado para obtenção das seções geométricas dos sulcos de erosão.

As formas da seção transversal dos sulcos eram, então, retratadas em cartolinas colocadas entre as hastes plásticas e a estrutura de acrílico, nas quais eram gravadas as dimensões dos sulcos com pincel atômico em escala real. Também foi determinado na cartolina, antes de retirar da área dos sulcos, a distância entre as hastes que marcavam a largura da lâmina, que quando grafadas e combinadas com a seção transversal dos sulcos, forneceram o raio hidráulico.

A velocidade superficial do escoamento foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que um corante (azul de metileno) percorresse a distância de 3 metros centrais dos sulcos. Os valores de velocidade superficiais assim obtidos foram expressos em m s^{-1} . As velocidades superficiais foram tomadas de 3 em 3 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento. Em todas as aplicações das vazões nos sulcos, foi realizada de forma sincronizada ao da coleta de sedimentos no final do canal. Os valores medidos foram multiplicados por um fator de correção $\alpha = 0,6$ para se obter a velocidade média do escoamento, tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos. O valor de 0,6 tem sido utilizado por diversos autores (Cantalice et al., 2005 e Bezerra & Cantalice, 2006).

As medições de volume líquido e a amostragem para concentração de sedimentos foram efetuadas de 3 em 3 minutos, no mesmo intervalo de determinação da velocidade superficial.

As taxas de descarga líquida foram determinadas pela medição “in situ” do volume líquido coletado em uma proveta durante alguns segundos, sendo expressas em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Os volumes de solo e água coletados nas provetas foram acondicionados em potes plásticos e conduzidos ao laboratório para determinação da concentração de sedimentos.

Para definição das condições hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados e de sua interação com a superfície do solo foram determinadas algumas características hidráulicas, conforme as descrições apresentadas a seguir.

O número de Reynolds foi determinado pela relação:

$$R_e = \frac{V R_h}{\nu} \quad (05)$$

onde R_e = número de Reynolds, adimensional; V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); R_h = raio hidráulico (m), e ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática (ν , em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) foi determinada em função da

temperatura (T, °C) conforme expressão dada por Julien (1995). A temperatura da água foi determinada por meio de um termômetro em cada ensaio.

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (06)$$

O número de Froude (Fr) foi obtido pela expressão:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{(g R_h)}} \quad (07)$$

onde V = velocidade média do escoamento (m s⁻¹); g = aceleração da gravidade (m s⁻²); R_h = raio hidráulico (m).

A velocidade de cisalhamento (U*), determinada pela expressão:

$$U_* = \sqrt{(g R_h S)} \quad (08)$$

onde g = aceleração da gravidade (m s⁻²); R_h = raio hidráulico (m); S = Declive da parcela (m m⁻¹), admitindo-se neste caso, que a declividade da superfície líquida é igual à declividade da parcela.

O número de Reynolds de partícula foi calculado pela expressão:

$$R_e^* = \frac{U_* d}{\nu} \quad (09)$$

onde d = diâmetro representativo do material que constitui o solo, corresponde ao d₅₀.

A rugosidade dos sulcos foi determinada através do coeficiente de rugosidade de Manning, obtido a partir da expressão:

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{V} \quad (10)$$

onde n = coeficiente de rugosidade de Manning (s m^{1/3}); R_h = raio hidráulico (m); S = declividade do sulco (m m⁻¹) e V = velocidade média do escoamento (m s⁻¹).

A declividade dos sulcos foi tomada pela variação de altura entre 2 pontos de distância determinada nos sulcos e expressa em m m⁻¹.

Para a determinação da distribuição de tamanho e diâmetro médio do sedimento erodido foram utilizadas todas as amostras de sedimento coletadas durante o procedimento experimental. A separação das partículas foi determinada em 12 classes de tamanho e realizada no laboratório por peneiramento seco das amostras, utilizando-se um agitador eletromagnético, equipado com um conjunto de peneiras com os seguintes diâmetros de abertura de malha: 2,00; 1,7; 0,85; 0,60; 0,425; 0,30;

0,212; 0,150; 0,106; 0,076; e 0,053 mm, com intensidade de 90 vibrações por segundo por 10 minutos.

A fração de partículas em cada classe foi obtida dividindo-se a massa de partículas secas em uma determinada classe pela massa total de solo seco da amostra peneirada. Os resultados foram expressos em porcentagem.

Com a distribuição de tamanho de partículas foi calculado o índice d_{50} , que é um indicador do diâmetro médio de partículas. Este índice representa o tamanho para o qual 50% das partículas são maiores e 50% são menores (Cantalice, 2002). O índice d_{50} foi calculado por computador através do programa Curva Expert, a partir do fornecimento da massa de partículas sólidas em cada classe de tamanho, em cada amostra.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, utilizando-se as médias referentes às 5 repetições dos tratamentos, para comparação entre os mesmos. A análise estatística dos dados de erosão em sulcos foi realizada com a utilização do programa estatístico SAS. Foi aplicado um teste de Tukey, a 5% de significância, para comparação das médias.

Na análise de regressão dos dados utilizou-se o programa computacional do Excel, onde se obteve as equações ajustadas para cada regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a realização dos testes, foram realizadas observações visuais do processo de formação e desenvolvimento dos sulcos, que permitem um melhor entendimento dos resultados obtidos.

No transcorrer dos testes, foi possível observar os três subprocessos erosivos característicos da erosão em sulcos. Incluem-se nestes processos: a desagregação do solo no perímetro molhado do sulco; desmoronamento das paredes laterais do sulco (Figura 3a); e, desagregação intensa localizada em pontos de maior turbulência do escoamento, formando desníveis no leito do sulco (Figura 3b). Essa desagregação intensa em pontos localizados, caracterizados pela formação de degraus no leito dos sulcos, foi observada ao longo de todo o teste e em todas as vazões estudadas. Nas maiores vazões, esse processo foi mais intenso e de melhor visualização, formando degraus maiores e que se deslocavam no sentido contrário ao escoamento.

O aprofundamento dos sulcos foi dominante no início dos testes, ocorrendo uma rápida remoção da camada superficial do solo. Essa camada era constituída pelo solo revolvido durante o preparo e pré-formação dos sulcos. A partir do momento em que o sulco atingiu o solo não revolvido, o processo erosivo, ou seja, a ação da tensão cisalhante, caracterizou-se principalmente pelo alargamento do canal, desgastando com maior proporção a base das paredes laterais dos sulcos. O cisalhamento na base do sulco provoca solapamento, facilitando o desmoronamento nas paredes laterais (Figura 3a). Assim, as paredes perdem a estabilidade e, por conseqüência do seu próprio peso, precipitavam-se para o interior dos sulcos, sendo o solo removido pelo escoamento presente no momento do desmoronamento das paredes.

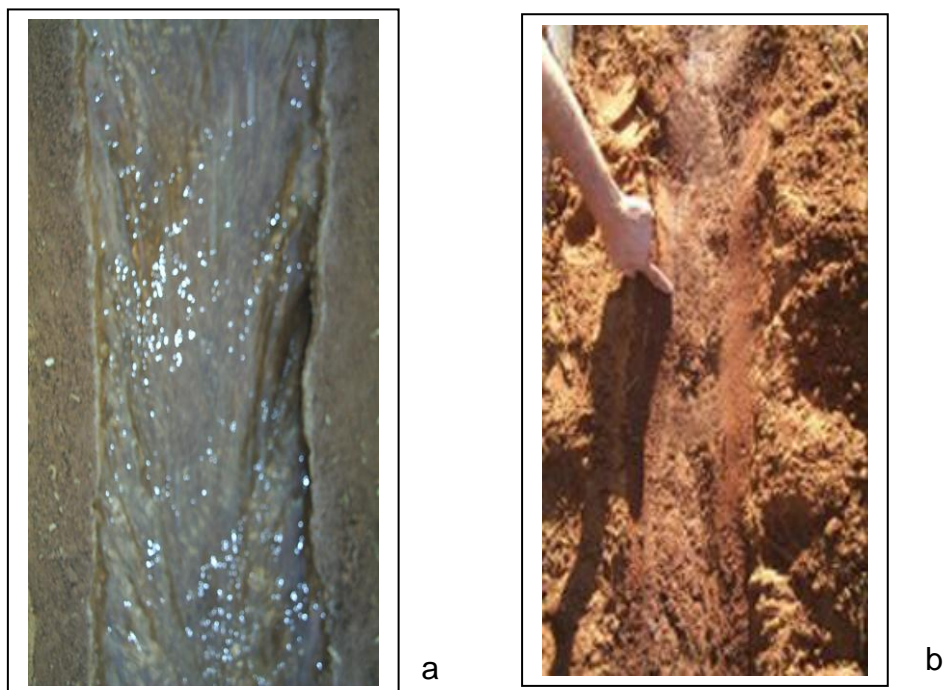


Figura 3 Desmoronamento das paredes laterais do sulco durante a aplicação do teste (a); e desnível formado no leito do sulco em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido (b).

Os valores médios de área, perímetro e raio hidráulico da seção transversal do escoamento, para cada vazão, podem ser verificados na Tabela 2. Esses valores representam a média das medições feitas em dois pontos dos sulcos em dois momentos do teste, em cada uma das 5 repetições.

Tabela 2. Geometria da seção transversal dos sulcos: Área (A), perímetro molhado (P_m) e raio hidráulico (R_h) em função das vazões aplicadas nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Médias de 4 observações em cinco repetições.

Vazão $L \text{ min}^{-1}$	$A \times 10^{-4}$ m^2	P_m m	$R_h \times 10^{-3}$ m
17,5	2,71c	0,137c	1,97c
47	4,26b	0,171b	2,49b
60	4,95ab	0,183a	2,69a
77	5,00a	0,184a	2,71a
110	5,53 ^a	0,193a	2,86a

Médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de tukey à 5%.

Essas três características dos sulcos variaram significativamente com o aumento da vazão aplicada aos sulcos. Entretanto, verificou-se que entre as vazões de 60 a 110 $L \text{ min}^{-1}$ não houve diferenças significativas entre os valores observados, por conta da não diferenciação dos escoamentos obtidos entre estes níveis de água.

Com base na determinação da velocidade média do escoamento e das descargas líquidas nos sulcos foi obtida uma relação, cujos resultados estão apresentados na Figura 4. Nessa Figura, os pontos menores representam os pares de dados originais obtidos com a velocidade média e a descarga líquida, e os pontos maiores representam a média das velocidades do escoamento com as correspondentes descargas líquidas médias que produziram um ajuste para o modelo potencial dado por:

$$V = 0,3938 Q^{0,15020} \quad r^2 = 0,95 \quad (11)$$

onde V = velocidade média do escoamento ($m \text{ s}^{-1}$) e Q = descarga líquida dos sulcos ($L \text{ s}^{-1}$).

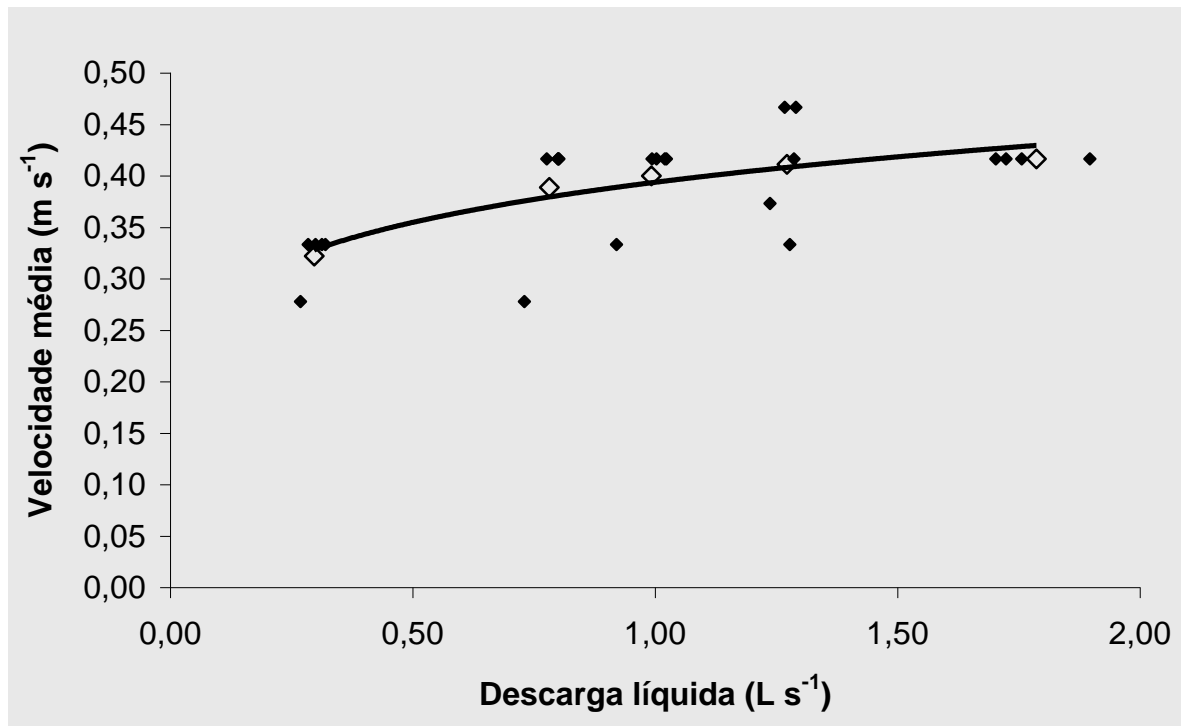


Figura 4. Relação entre a descarga líquida e a velocidade média da água nos sulcos formados em CAMBISSOLO de textura média do semi-árido pernambucano. Média de 5 repetições

Essa relação também foi determinada, em ARGISSOLO, por Cantalice et al. (2005) com um expoente de 0,32 e um coeficiente de 0,33, para descarga líquida em L s⁻¹.

O aumento da velocidade média do escoamento com o aumento da vazão aplicada nos sulcos, corresponde a quebra dos grandes agregados (torrões) que são formados durante o preparo da área para a implantação de culturas. Essa quebra implica em maiores perdas de solo e conseqüentemente, perdas de insumos que são incorporados ao solo na produção. Como já discutido anteriormente, o aumento da vazão causa danos às paredes laterais dos sulcos, e conseqüentemente aumento no perímetro da seção transversal, e a concentração desse escoamento em canais provoca um maior transporte de sedimento que é depositado em áreas impróprias ao cultivo e/ou causando assoreamento nos cursos d'água.

Com base nas determinações de área da seção transversal e perímetro molhado de cada sulco, estabeleceu-se uma relação por meio da seguinte expressão:

$$P_m = 7,1406 A^{0,4811} \quad r^2 = 0,94 \quad (12)$$

onde P_m = perímetro molhado (m) e A = área (m^2).

Também pela análise de regressão, obteve-se ajuste entre a variação das descargas líquidas ($L s^{-1}$), com o perímetro molhado (P_m) (Figura 5) e o raio hidráulico (R_h) (Figura 6). As equações exponenciais ajustadas para o perímetro molhado e para o raio hidráulico estão relacionadas abaixo, e constituem-se em uma alternativa para que possam ser estimadas as dimensões da seção transversal dos sulcos de erosão.

Perímetro molhado:

$$P_m = 0,1307 e^{0,2624Q} \quad r^2 = 0,97 \quad (13)$$

Raio hidráulico:

$$R_h = 0,0018 e^{0,268Q} \quad r^2 = 0,88 \quad (14)$$

onde P_m = perímetro molhado (m); Q = descarga líquida ($L s^{-1}$); R_h = raio hidráulico (m) e e = base do logaritmo natural.

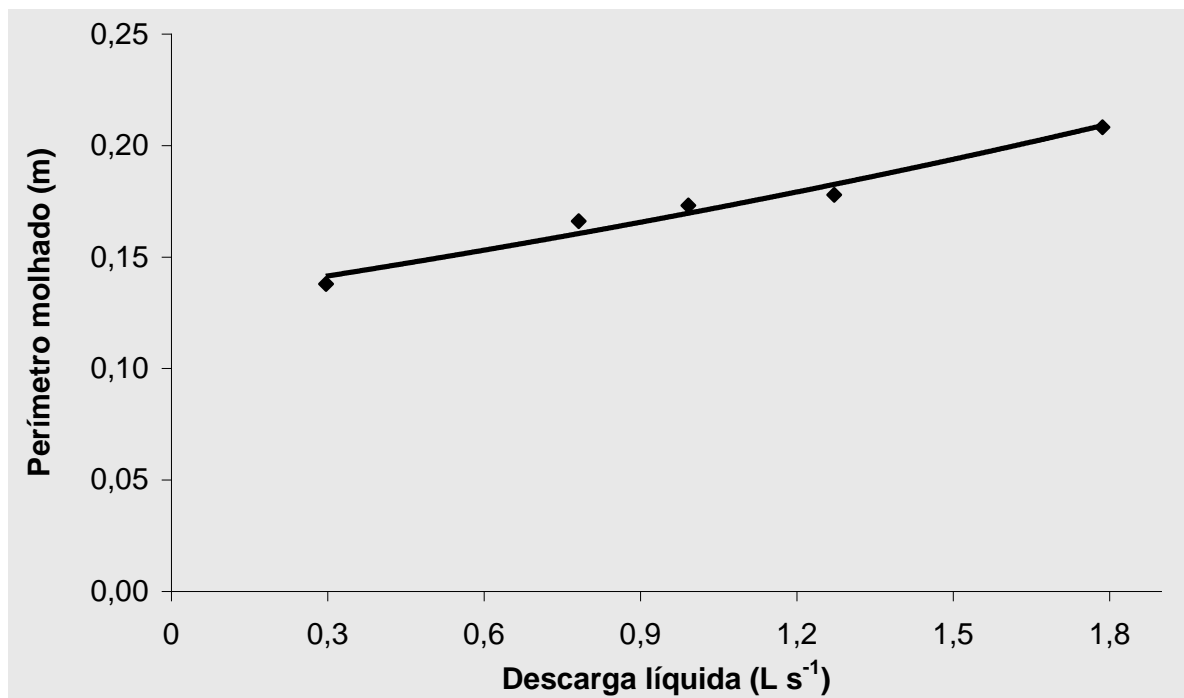


Figura 5. Relação entre a descarga líquida e o perímetro molhado na erosão em sulcos. Média de 5 repetições

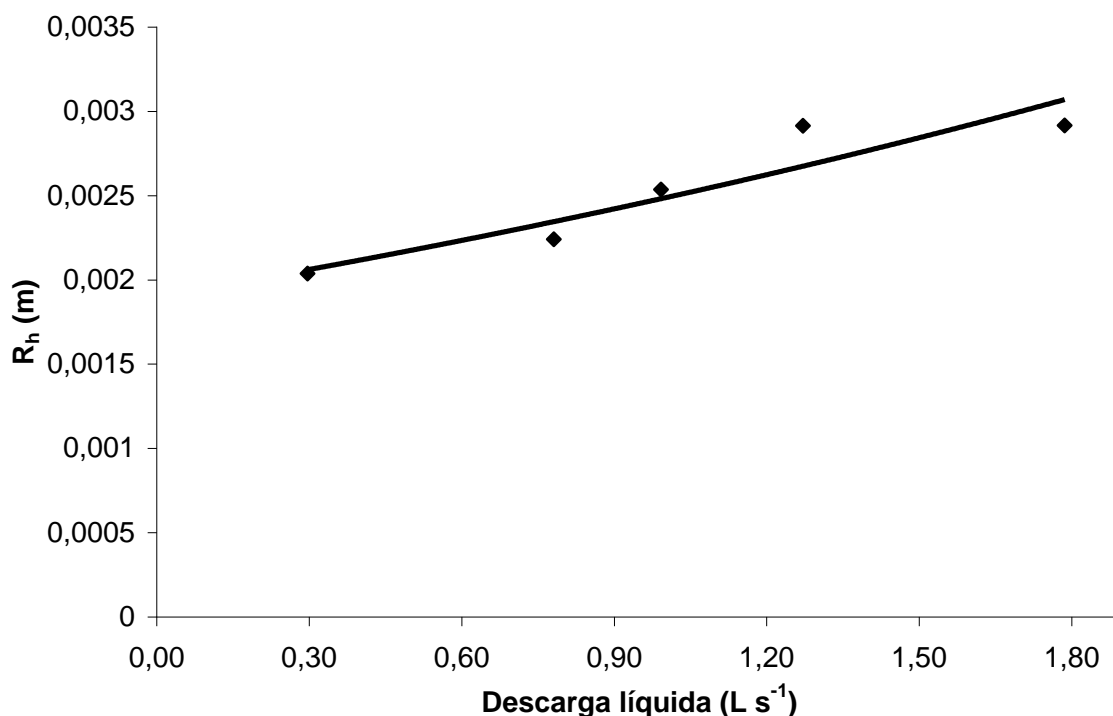


Figura 6. Relação entre a descarga líquida e o Raio hidráulico na erosão em sulcos. Média de 5 repetições

Observa-se na Figura 7, que o aumento das vazões aplicadas elevou o valor do raio hidráulico, responsável pelo desenvolvimento das tensões de cisalhamento do escoamento nos sulcos. A relação entre o raio hidráulico e a área dos sulcos foi determinada, produzindo um ajuste para a curva citado abaixo:

$$R_h = 0,14 A^{0,5189} \quad r^2 = 0,95 \quad (15)$$

onde R_h = raio hidráulico (m) e A = área dos sulcos (m^2).

As equações (12) e (15) permitem estimar em condições semelhantes o perímetro molhado e o raio hidráulico a partir da área da seção transversal do escoamento, que pode ser obtida através da equação da continuidade ($A=(Q/V)$), onde A = área (m^2) e V = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$).

Braida & Cassol (1996) relatam uma variação na literatura para o expoente da equação (15) ora encontrado neste trabalho que pode variar de 0,51 a 0,57, e determinou, em seu trabalho, um valor de 0,531 para o expoente dessa relação (15).

A partir da determinação da geometria das seções transversais dos sulcos (raio hidráulico, perímetro molhado e área), e das variáveis hidráulicas de descarga líquida e velocidade média do escoamento, foram determinadas as demais variáveis

hidráulicas, que caracterizaram o escoamento superficial nos sulcos para as vazões aplicadas

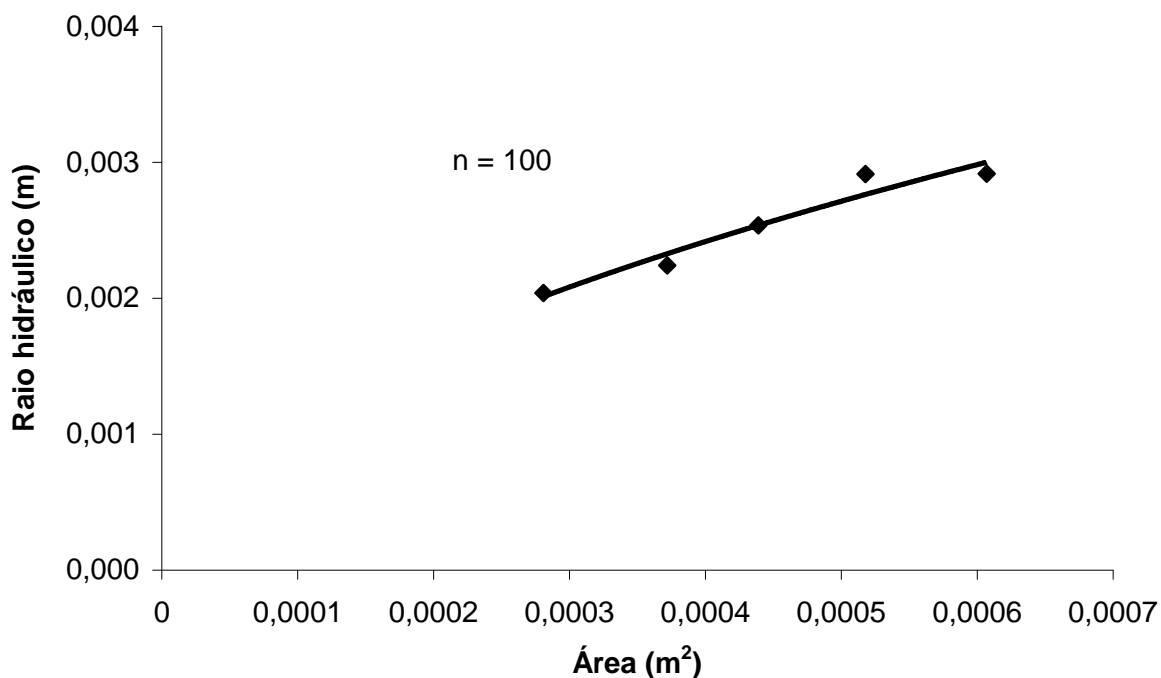


Figura 7. Variação do raio hidráulico (R_h) e da área (A) dos sulcos para as vazões aplicadas. Média de 5 repetições

Constam na Tabela 3 as condições hidráulicas médias dos escoamentos superficiais obtidos nos sulcos. Observou-se que os regimes de escoamento para todas as vazões aplicadas de 17,5 a 110 L min⁻¹, com os valores de R_e entre 1125 a 2031 e $F_r > 1$, situaram-se na faixa de transição rápido para todos os ensaios realizados, sendo este considerado um escoamento característico dos sulcos de erosão (Bezerra et al., 2002; Cantalice et al., 2005; Barcelos et al., 2004).

Nota-se que apesar da diferença significativa encontrada entre os valores dos números de Reynolds, o regime de escoamento (transição) continua o mesmo. Ainda, pode-se observar, para todas as vazões aplicadas, número de Froude acima de 1,2, que é o limite sugerido por Slattery & Bryan (1992) para o início de formação de sulcos.

Tabela 3. Características hidráulicas médias do escoamento nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Valores médios de 5 repetições

Variável hidráulica	Vazões Aplicados, L min ⁻¹				
	17,5	47	60	77	110
Q (L s ⁻¹)	0,297c	0,781 b	0,992 ab	1,272 ab	1,786 a
V (m s ⁻¹)	0,489c	0,573b	0,603a	0,605a	0,627a
S (m m ⁻¹)	0,063 ^{ns}	0,061 ^{ns}	0,056 ^{ns}	0,059 ^{ns}	0,057 ^{ns}
R _e (adm.)	1125,25c	1714,33b	1927,08ab	1950,72a	2031,54a
F _r (adm.)	2,31 ^{ns}	2,48 ^{ns}	2,46 ^{ns}	2,52 ^{ns}	2,49 ^{ns}
<i>n</i> (s m ^{-1/3})	0,00808 ^{ns}	0,00792 ^{ns}	0,00761 ^{ns}	0,00776 ^{ns}	0,00767 ^{ns}
d ₅₀ (mm)	0,1076b	0,1264ab	0,1158ab	0,1243ab	0,1427a
R _e [*] (adm)	4,36b	5,89ab	5,26ab	5,81ab	6,49a
U [*] (m s ⁻¹)	0,0350b	0,0386ab	0,0386ab	0,0394a	0,0400a
τ (N m ⁻²)	1,23a	1,49a	1,50ab	1,55ab	1,60b

Médias seguidas da mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

ns – não significativo; Q, Descarga líquida; V, velocidade média; S, declive; R_e, número de Reynolds; F_r, número de Froude; *n*, coeficiente de rugosidade de Manning; R_e^{*}, Reynolds de partícula; d₅₀, diâmetro da partícula; e, U^{*}, velocidade de cisalhamento e τ, tensão de cisalhamento.

Outra característica importante, é a velocidade de cisalhamento (U^{*}), que segundo alguns autores está relacionada com o desenvolvimento inicial dos sulcos e apresentou neste trabalho valores que variaram de 0,03 – 0,04 m s⁻¹. O limite preciso do desenvolvimento inicial dos sulcos varia muito com as características do solo (Bryan, 2000), alguns valores têm sido encontrados por outros autores, como Govers (1985) na ordem de 0,03 a 0,035; Merz & Bryan (1993) de 0,05 a 0,07 m s⁻¹; e Rauws (1987), para qual a velocidade de cisalhamento acima de 0,032 m s⁻¹ atesta a ocorrência de eventos em regime supercrítico.

A rugosidade hidráulica ao escoamento obtido através do coeficiente de Manning, não apresentou variação significativa com o aumento da vazão aplicada aos sulcos. Tal fato, denota a superfície do solo de transição para todos os níveis de vazões aplicadas, atestadas pelos valores de Reynolds de partícula entre 4 a 70 (Julien, 1995), para essa superfície hidráulica. Apesar do d₅₀ para o maior vazão aplicada ter sido diferente dos demais níveis de vazão, isso não foi suficiente para alterar a condição de rugosidade da superfície do solo de acordo com o Reynolds de partícula (R_e^{*}) que se manteve na faixa de transição.

Como a rugosidade hidráulica dos sulcos, representa a soma da rugosidade das partículas e agregados do solo (n') e a rugosidade de forma dos sulcos (n''), com valores na ordem de 10^{-3} , mostram a mínima presença de agregados em superfície, caracterizando os baixos valores de rugosidade hidráulicos, refletidos pelo diâmetro médio do sedimento erodido (d_{50}), para este Cambissolo que variou de 0,1076 a 0,1427 mm (Tabela 3).

No trabalho realizado por Cantalice et al., (2005), com um Argissolo Vermelho distrófico, recém preparado, sem cobertura e declive médio de $0,07 \text{ m m}^{-1}$, verificou-se que o diâmetro médio produzido pela erosão em sulcos foi de 0,238 a 0,27 mm. Os menores valores de d_{50} obtidos evidenciam a estrutura menos desenvolvida do Cambissolo traduzida na forma do menor diâmetro do sedimento, em relação ao Argissolo estudado por Cantalice et al., (2005).

O tamanho médio do sedimento, dado pelo índice d_{50} , oriundo da erosão em sulcos é apresentado na Tabela 4. Os valores revelaram variação significativa do índice d_{50} com o aumento da vazão aplicada aos sulcos.

Observa-se que com o aumento da vazão há uma tendência no aumento do diâmetro do sedimento o que pode ter sido consequência da obtenção de uma mesma superfície hidráulica em todos os níveis de vazão. Essa tendência corrobora com os resultados obtidos por Foster (1982), que aplicou vazões até 220 L min^{-1} .

A tendência no aumento do tamanho médio de partículas com o aumento da vazão do sulco, pode estar relacionada com o preparo do solo antes da aplicação dos escoamentos. Assim, as vazões maiores, mesmo apresentando uma maior turbulência do escoamento, não conseguiram promover um maior fracionamento dos agregados formados durante a mobilização do solo, o que resultou em sedimentos com partículas de maior tamanho para as maiores vazões. Além disso, a capacidade de transporte do escoamento concentrado nos sulcos nas maiores vazões é muito maior que nas vazões menores, portanto podendo transportar, partículas maiores ou os agregados.

Tabela 4. Tamanho médio de partículas do sedimento erodido, dado pelo índice d_{50} , em função da vazão aplicada nos sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Média de 5 repetições.

Vazão L min ⁻¹	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	Média
	----- mm -----					
17,5	0,1201	0,0981	0,1023	0,1107	0,1070	0,1076b
47	0,0930	0,1575	0,1470	0,1260	0,1084	0,1264ab
60	0,1100	0,1100	0,1505	0,1055	0,0962	0,1158ab
77	0,1338	0,1037	0,1260	0,1318	0,1260	0,1243ab
110	0,1220	0,1506	0,1555	0,1410	0,1427	0,1427a

R = repetição; Médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

Embora, em todas as vazões aplicadas, tenham apresentado uma maior concentração de sedimentos na classe de 0,106–0,150 mm de diâmetro, verificando-se um aumento proporcional na quantidade de material mais fino até a classe de 0,106–0,150 mm, reduzindo em seguida para as demais classes de diâmetro (Figura 9), nota-se que a vazão aplicada de 17,5 L min⁻¹ apresentou maiores quantidades de sedimentos de diâmetros menores, prontamente disponíveis ao transporte pelo escoamento, sem haver influência inicial da vazão em desagregar as partículas superficiais mais coesas e agregadas. Esses sedimentos mais finos em suspensão, onde a concentração de íons na solução do solo é maior, podem atingir os cursos d'água e elevar o índice de contaminação por elementos químicos. Já para as demais vazões, se observa que a partir da aplicação da vazão há o transporte de sedimentos de diâmetros maiores, de tendência a uma deposição mais rápida, quando comparado aos sedimentos mais finos.

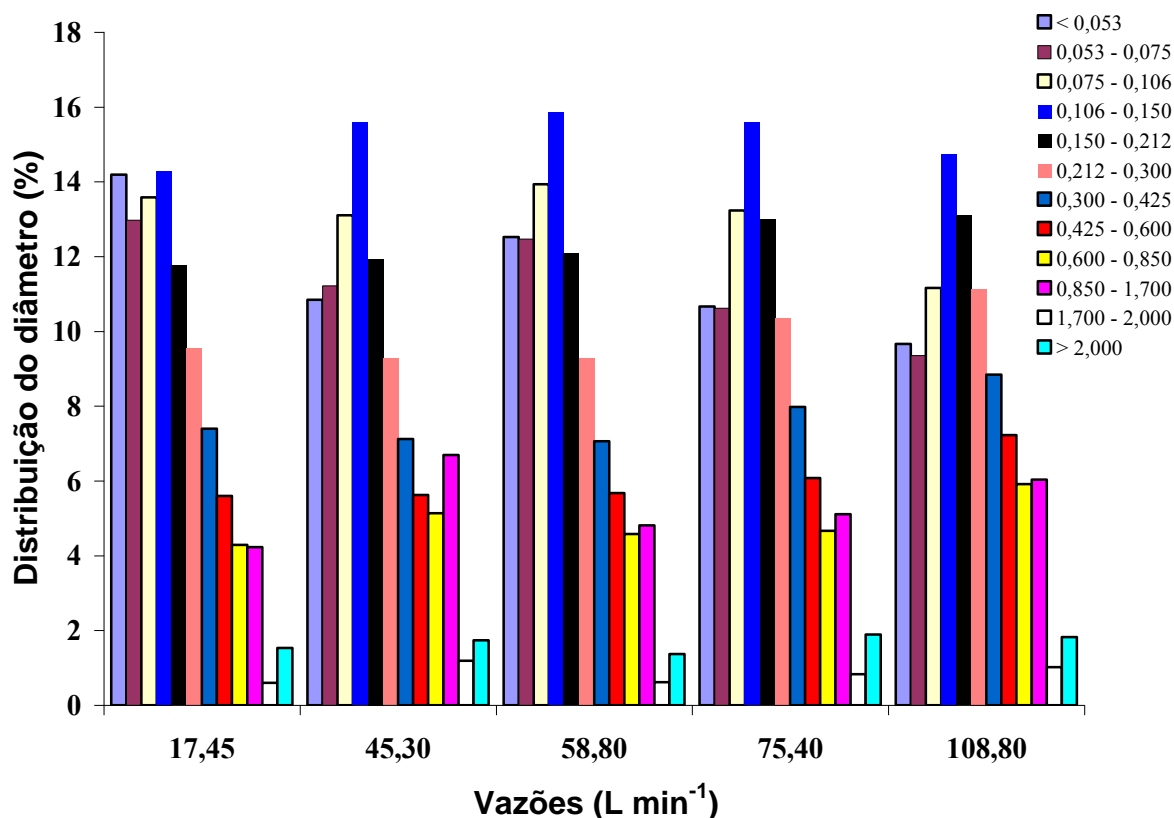


Figura 8. Distribuição de diâmetro dos sedimentos erodido durante a aplicação das vazões para escoamento superficial em sulcos em um CAMBISSOLO de textura média do semi-árido brasileiro. Média de 5 repetições.

CONCLUSÕES

- A concentração do escoamento superficial proporcionada pelas das vazões aplicadas em área de sulcos experimentais, produziu regimes de escoamento na faixa de transição rápido, com Reynolds entre 1000 e 2031 e Froude acima de 2, atestando a ocorrência de sulcos erosivos.
- O cisalhamento na base do sulco provocado pelo escoamento facilitou o desmoronamento nas paredes laterais, ao aumento da vazão, conseqüentemente elevando a área, o perímetro molhado e o raio hidráulico dos sulcos experimentais;
- As características geométricas e hidráulicas do escoamento nos sulcos tiveram variações significativas em função da vazão aplicada até o nível de 47 L min⁻¹;

- As menores vazões aplicadas tiveram potencial para transporte das partículas individuais de menor diâmetro, enquanto as vazões maiores tiveram potencial de transporte de partículas na forma de agregados e de maior diâmetro.

LITERATURA CITADA

AUZET, A.V.; BOIFFIN, J.; PAPY, F; LUDWIG, B.; MAUCORPS, J. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena*, 20:41-62, 1993.

BAGNOLD, R. A. An Approach to the sediment Transport Problem from General Physics. IN: THORNE, C. R. ; MACARTHUR. R. C.; BRADLEY, J. B. The physics of sediment transport by wind and water. 1 ed., New York, American society of Civil Engineers, 1988. p. 231 – 291.

BAPTISTA, M.B.; COELHO, M.M.L.P.; CIRILO, J.A.; MASCARENHAS, F.C.B. Hidráulica aplicada. 2ª ed. Porto Alegre, ABRH, 2003. 621p.

BARCELOS, A. A.; BOFFO, C. H.; BORGES, A. L. DE O.; BELLINASSO. T. B. Adequação de equações de transporte de sedimentos para estudos de erosão em meio coesivo. In: Anais do VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Vitória, dezembro 2004, p.109-113.

BEZERRA, S.A. & CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:565-573, 2006.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B & TARQUI, J. L. Z. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 5; São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABRH, 2002. p.403-411.

BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20:127-134, 1996.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*. 32:385-415, 2000.

BRYAN, R.B. & ROCKWELL, D.L. Water table control on rill and implications for erosional response. *Geomorphology*, 23:151-169, 1998.

BRYAN, R.B. Processes and significance of rill development. *Catena*, n.8, p.1-15, 1987.

CANTALICE, J.R.B.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L. de O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:597-607, 2005.

CANTALICE, J.R.B. Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo. 2002, 141f. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CASSOL, E.A.; NUNES, M. C. M.; SANTOS, L. C. dos; MATZENBACHER, F. de O. Variação temporal da distribuição de diâmetro do sedimento produzido por erosão em entressulcos em Latossolo argiloso e em Latossolo de textura média. In: XXXCBCS, 2005, Recife. Anais...Recife: SBCS, 2005.

COGO, N. P.; LEVIEN, R. & SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:743-753, 2003.

ELLIOT, W.J.; LIEBOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEEP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88. West Lafayette: The Ohio State University: USDA-ARS, 1989. (NSERL – National Soil Erosion Research Laboratory Report, 3).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph: ASAE, 1982. p. 297-380 (ASAE Monograph, 5).

GATTO, L. W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: potential impacts on soil erosion. *Geomorphology*, 32:147-160. 2000.

GIASSON, E. & CASSOL, E.A. Relações de erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um Plintossolo franco-argilo arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20:117-125, 1996

GOVERS, G. & RAUWS, G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11:515-524, 1986.

GOVERS, G. Selectivity and transport capacity of thin layer flows in relation to rill erosion. *Catena*, 12:35-39. 1985.

GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, F.F.; MARTINS JÚNIOR, D. & SILVA, D.D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:411-417, 2001.

JULIEN, P. Y. Erosion and sedimentation. Milbourne: Cambridge Univ. Press, 1995. 280p.

JULIEN, P.Y. & SIMONS, D.B. Sediment transport capacity of overland flow. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 28(3):755-762, 1985.

LEI, T.; NEARING, M.A.; HAGHIGHI, K. & BRALTS, V.F. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Res. Res.*, 34:3157-3168, 1998.

MERTEN G.H Dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento da descarga sólida. 2000, 116f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MERRITT, E. The identification of four stages during micro-rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v. 9, p. 493-496, 1984.

MERZ, W. & BRYAN, R.B. Critical conditions for rill initiation on sandy loam brunisol: laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*, 57:357-385, 1993.

MEYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng* 12 (6) 754-758, 1969.

MOLINIER, M; ALBUQUERQUE C.H.C. & CARDIER, E. Análise de pluviometria e isoietas homogeneizadas do nordeste brasileiro. Recife: SUDENE 1994. 58p. (*Hidrologia*, 32).

NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S.C. A process based soil erosion model USDA water erosion prediction project technology. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32:1587-1593, 1989.

NEARING, M.A.; NORTON, L.D.; BULGAKOV, D.A.; LARIONOV, G.A.; WEST, L.T.; DONTSOVA, K.M. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Res. Res.*, 33 (4), 865-876, 1997.

PLANCHON, O.; FRITSCH, E.; VALENTIN, C. Rill development in a wet savannah environment. *Catena*, n.8, p.55-70, 1987.

POLYAKOV, V.O. & NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena*, 51:33-43, 2003

RAUWS, G. Hydraulics and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Catena*, n.8, p.1-15, 1987.

ROBERSON, J.A. & CROWE, C.T. Engineering fluid mechanics. 6^a ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1997. 687p.

ROBINSON, K.M. & HANSON, G.J. Large-scale headcut erosion testing. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 38(2):429-434, 1995.

RÖMKENS, M.J.M.; HELMING, K.; PRASSAD, S.N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 456:103-123, 2001

SELBY, M.J. Hillslope sediment transport and depositional In: PYE, KENNETH. *Sediment transport and depositional processes*. Osney Mead, Oxford. 1994. 397p.

SLATTERY, M.C. & BRYAN, R.B. Hydraulics conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17:127-146, 1992.

SINSSOM, L.E. & PITTS, D.R. Fenômenos de transporte. 3^a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2001. 765p.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste: Estado de Pernambuco. Recife, 1990. 363p. (Série Pluviométrica).

YOUNG, R.A. Characteristics of eroded sediment. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph. 23:1139-1142. 1980.

ZARTL, A.S.; KLIK, A. & HUANG, C. Soil detachment and transport processes from interrill and rill areas. *Phys. Chem Earth*. 26(1):25-26, 2001.

CAPÍTULO II

TAXAS DE EROSÃO E ERODIBILIDADE DO SOLO EM SULCOS PRÉ-FORMADOS EM UM CAMBISSOLO DO SEMI-ÁRIDO PERNAMBUCANO

RESUMO

A erosão em sulcos constitui a segunda fase evolutiva do processo físico de erosão hídrica do solo, é marcada pela mudança de escoamento, de laminar para concentrado, em pequenos canais superficiais naturais ou marcados pelo homem. Os objetivos deste trabalho foram: determinar as taxas de desagregação, a erodibilidade em sulcos, a tensão crítica de cisalhamento do CAMBISSOLO em estudo, e as perdas totais de solo com aplicação de vazões crescentes em sulcos, na região semi-árida de Pernambuco. Os sulcos foram pré-formados em solo de textura franco arenosa, num campo com declive médio de $0,06 \text{ m m}^{-1}$, e submetidos à aplicação de vazões durante 20 minutos de teste, com as seguintes vazões: 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min^{-1} . Os resultados mostraram que a partir dos 9 minutos de testes as taxas de desagregação foram menores e mais uniformes. A partir desse momento, o sedimento transportado é aquele desagregado pelo escoamento e, também, pelo desmoronamento das paredes do sulco. Os escoamentos gerados nos sulcos inicialmente transportaram sedimentos disponíveis ao movimento, e depois aprofundam e aumentam o perímetro molhado, pelas suas tensões de cisalhamento que se elevaram significativamente, sendo responsáveis pelo aumento nas taxas de desagregação do solo observadas. Os valores de erodibilidade em sulcos (K_r) de $0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento ($\tau_c=1,185 \text{ Pa}$) do CAMBISSOLO, refletem as características de um solo jovem num ambiente de restrição hídrica que dificulta a evolução dos mesmos. As perdas totais de solo nos sulcos de erosão aumentaram com a elevação das vazões aplicadas atingindo 371 kg m^2 .

Palavras chaves: desagregação do solo, tensão crítica de cisalhamento, perdas de solo, vazões aplicadas.

ABSTRACT

Rill erosion constitutes the second phase of the physical process of water erosion, that is marked by water flow change, from laminar to concentrated, in small superficial channels, either natural or made by man. The objectives of this work were: to determine the detachment rates, the rill erodibility and the critical shear stress of the CAMBISSOLO under study and to determine the total loss of soil with application of increasing flows in rills, in the soil semi-arid region of Pernambuco. The rills were formed in a sandy texture, in a field with average declivity of $0,06 \text{ m m}^{-1}$, and submitted to the application of flows during 20 minutes of test, with the following outflows: 17,5; 47; 60; 77 and 110 L min^{-1} . The results showed that from the 9 minutes of tests, the detachment rates were smaller and more uniform. And from this moment, the transported sediment is composed of that detached by the flow and, also from, the collapse of the walls of the rills. The streams generated in the rills initially transported available sediments from the water movement, and later it deepened and increased the wetted perimeter, due to its shear stress has raised significantly, being responsible for the increase of detachment of the soil. The values of critical shear stress of $1,185 \text{ Pa}$, rill erodibility (K_r) of $0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ of the CAMBISSOLO, reflect the characteristics of a young soil in an environment of hydric restriction which makes it difficult the evolution of the soils. The total loss of soil in rills increased with the rise of the applied outflows, in the order of 371 kg m^2 .

Key word: soil detachment, critical shear stress, soil loss, water flows.

INTRODUÇÃO

Com freqüência define-se erosão como a desagregação de partículas dos agregados de solo que é, na realidade, apenas o início do processo erosivo, ou seja, em geral o processo erosivo é sempre associado ao conjunto das ações de desagregação, transporte e deposição das partículas (Chameck, 2002). A ocorrência do processo erosivo em áreas agrícolas tem como conseqüências a queda da capacidade produtiva dos solos e a poluição dos corpos de água (Amorim et al., 2001).

Os sulcos de erosão são de ocorrência comum na região semi-árida do Brasil. Nessa região de pouca disponibilidade hídrica, ocorre o bioma Caatinga. Nessa região predomina um manejo de solo utilizado na agricultura de sequeiro com retirada da caatinga para produção de carvão, queima, destoca, e agricultura itinerante em solos pouco evoluídos. Esses solos são rasos, e portanto, pouco evoluídos, favorecendo a diminuição da rugosidade das bacias hidrográficas, e rápidos escoamentos superficiais, o que é desfavorável à conservação dos recursos naturais de solo, água e vegetação. Aliado a isso, a hidrologia de semi-árido apresenta um padrão distinto caracterizado pela concentração dos volumes de chuvas em curtos períodos de tempo, de pouca duração e grande variação de recorrência, em face da irregular ocorrência espacial e temporal de suas chuvas e escoamentos superficiais e sub-superficiais, que ocorrem na forma de eventos extremos.

O trópico semi-árido se ressentir da contínua escassez de água em seu complexo planta-animal-homem. Tal fato resulta da distribuição espaço temporal irregular das chuvas, da elevada evaporação e da baixa capacidade de retenção de umidade da grande maioria dos solos da região (Nascimento et al., 2003). A essas condições hidrológicas, a capacidade de uso do solo dessas bacias é logo ultrapassada, ocasionando a diminuição da cobertura vegetal (caatinga), produção de escoamentos superficiais, erosão do solo com sulcos e voçorocas nas vertentes agrícolas (fontes de sedimentos) e sedimentação nos cursos de água de drenagem intermitente.

Os avanços em pesquisas feitos nas últimas décadas tem sido significantes na compreensão dos mecanismos das taxas de erosão do escoamento concentrado em diferentes condições ambientais (Poesen et al., 2003). A erosão em sulcos

representa uma fonte de sedimento importante em muitos ambientes (Beats et al., 2006). Nas áreas de ocorrência da erosão em sulcos, o processo erosivo dominante vem da ação decorrente da tensão cisalhante (τ) desenvolvida pelo escoamento concentrado nos sulcos.

A concentração do escoamento nos sulcos de erosão representa a passagem do regime laminar para transição ou para o escoamento turbulento associado ao aumento do raio hidráulico, que ocasiona a elevação da tensão cisalhante nos sulcos, responsável pela desagregação e transporte de partículas e agregados do solo, com conseqüente desenvolvimento dos sulcos.

Segundo Chow et al. (1988), a tensão cisalhante é a força de atrito exercida pelo escoamento superficial no perímetro molhado do sulco, sendo que esta não se distribui uniformemente. A máxima tensão ocorre no fundo do canal e a mínima no ponto de contato entre a superfície livre da água e a parede do canal, fazendo com que a tendência ao aprofundamento do canal seja proporcionalmente maior que o alargamento.

A desagregação nos sulcos somente ocorre quando a carga de sedimentos do escoamento é menor que a sua capacidade de transporte de sedimentos, e a energia de cisalhamento restante forem suficientes para conferir uma capacidade de desagregação que supere a resistência oferecida pelas partículas do solo, isto é, quando a tensão cisalhante do escoamento excede a tensão crítica de cisalhamento do solo. Dessa forma, a desagregação é máxima quando a carga de sedimentos é nula, havendo redução na desagregação à medida que aumenta a concentração de sedimentos na água (Lima, 1997).

Na erosão em sulcos, toda a energia do escoamento concentrado é transformada em trabalho, quer seja na forma de desagregação ou na forma de transporte de partículas do solo. Além de transportar as partículas desagregadas no sulco, o escoamento transporta as partículas provenientes da área em entressulcos (Foster & Meyer, 1975).

O conhecimento da capacidade do solo em resistir à ação do escoamento superficial, e das características do escoamento são fundamentais para o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem superficial e do estabelecimento de medidas para o controle do processo erosivo. Quanto ao escoamento, o principal fator está relacionado à tensão cisalhante provocada por este e, quanto à resistência

do solo, os fatores de maior importância são a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento (Griebeler et al., 2005).

Rauws & Govers (1988) definiram a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) da seguinte forma. As incisões no solo que dão origem aos sulcos têm início quando a tensão de cisalhamento do escoamento concentrado supera as condições de resistência ao início do movimento das partículas, sendo esse valor de tensão denominada tensão crítica de cisalhamento.

A tensão crítica de cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desprendimento de suas partículas, estando esta associada diretamente ao escoamento superficial (Griebeler et al., 2005).

Slattery & Bryan (1992) destacam que o escoamento superficial atinge sua capacidade máxima de desagregação e transporte, quando está concentrado nos sulcos de erosão. Foster et al. (1984) apontam a erosão em sulcos como uma das principais fontes de produção de sedimentos em áreas agrícolas.

De acordo com Elliot et al. (1989), a capacidade de desagregação do escoamento em sulcos (D_c), é expressa por :

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (01)$$

onde D_c = capacidade de desagregação do escoamento em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}), τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa), abaixo da qual não existe desagregação e, τ = tensão cisalhante do escoamento (N m^{-2} ou Pa), sendo expressa como:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (02)$$

onde γ = peso específico da água (N m^{-3}); R_h = Raio hidráulico (m) e S = declive do sulco (m m^{-1}).

Na verdade, a equação (01) é uma adaptação da equação de Du Boys desenvolvida em 1876, para quantificar o transporte de sedimentos na forma de arraste, baseada no conceito da força tratora, ou seja, no excesso de tensão cisalhante do escoamento.

Erodibilidade do solo em sulcos de erosão

A erodibilidade do solo em sulcos é uma medida da resistência à desagregação pelo escoamento concentrado, sendo frequentemente definida como o aumento no solo desagregado por unidade de acréscimo na tensão cisalhante do escoamento. Portanto, a erodibilidade do solo expressa, qualitativamente, a intrínseca suscetibilidade do solo a desagregação e ao transporte pelo escoamento superficial, equivalendo-se à quantidade de solo desagregado por unidade de área, tempo e tensão cisalhante aplicada pelo escoamento.

A diferença na erodibilidade de solos distintos ocorre devido às características intrínsecas desses solos, dadas pelas suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Lima, 1997).

Alguns autores têm relacionado as taxas de desagregação do solo com a resistência ao cisalhamento de sua superfície (Cantalice et al., 2005; Brunori et al., 1989; Al-Durrah & Bradford, 1981).

No modelo WEPP – Water Erosion Prediction Project, Flanagan & Nearing (1995) consideram que a erodibilidade do solo em sulcos é determinada a partir da relação entre as taxas de desagregação em sulcos e a tensão cisalhante do escoamento, dada pela seguinte expressão (03), sendo uma ligeira modificação da expressão (01):

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (03)$$

Essa expressão é admitida para a condição na qual a capacidade de transporte do escoamento seja muito superior à carga de sedimentos. Nesse caso, a taxa de desagregação do escoamento em sulcos é muito semelhante à capacidade de desagregação em sulcos, e as expressões (01) e (03) passam a se igualar. Portanto, a erodibilidade do solo em sulcos consiste no coeficiente angular b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do escoamento. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Laflen & Thomas, 1987).

Taxas de erosão em sulcos

As perdas de solo e água provocadas pela erosão hídrica constituem fatores de grande importância na diminuição da capacidade produtiva do solo (Cavichiolo, 2005), em virtude da remoção de nutrientes e carbono orgânico adsorvidos aos sedimentos minerais e orgânicos e solubilizados na água da enxurrada. Além disso, Outro aspecto de grande relevância é que o aporte de sedimentos oriundos de áreas que sofrem erosão promove o assoreamento e a eutrofização das águas onde o material transportado é depositado, comprometendo a qualidade das águas superficiais (Bertol et al., 2004).

A compreensão dos fatores que integram o processo de erosão do solo e a quantificação das perdas de solo é de grande importância, pois servem como o princípio da elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis e se possam evitar os efeitos negativos decorrentes da produção, transporte e deposição de sedimentos (Paiva, 2001). Para preservar a qualidade dos cursos de água é necessário o conhecimento das características dos sedimentos produzidos pela erosão (Cassol et al., 2004).

Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram:

- determinar as taxas de desagregação, a erodibilidade em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento de um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil;

- determinar as taxas de desagregação, as perdas totais e a erodibilidade de um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma área localizada na Unidade Acadêmica de Serra Talhada da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. O município de Serra Talhada-PE está inserido na região semi-árida do Alto Sertão do Rio Pajeú, a uma altitude de 429 m, com coordenadas geográficas de 7° 56' 15" de latitude Sul e 38° 18' 45" de longitude Oeste, distando 420 km de Recife.

De acordo com a classificação de Koppen, o clima enquadra-se no tipo Bwh, denominado semi-árido, quente e seco, com chuvas de verão-outono com pluviosidade média anual para o período de 1912 a 1991 de 647 mm (SUDENE, 1990), e médias térmicas anuais superiores a 25°C.

A área experimental localizou-se na porção inferior de uma pendente com aproximadamente 80 m de comprimento e declive médio de 6,5%. O solo da área é um CAMBISSOLO de textura média (franco arenosa). Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm, em vários pontos da área de estudo antes da realização dos testes de erosão em sulcos. A caracterização do solo consistiu de análises físicas e químicas da camada superficial do solo amostrada (Tabela 1), segundo EMBRAPA (1997).

Tabela 1. Características físicas e químicas da camada arável (0 a 10 cm) do CAMBISSOLO de uma encosta no semi-árido do Brasil, Serra Talhada-PE.

Características ⁽¹⁾	Profundidade, cm	
	0 -10	10 - 20
Argila (< 0,002 mm), g kg ⁻¹	0,188	0,186
Silte (0,002 – 0,050 mm), g kg ⁻¹	0,216	0,146
Areia (0,050 – 2,00 mm), g kg ⁻¹	0,596	0,668
Densidade global, g cm ⁻³	1,36	1,42
Densidade das partículas, g cm ⁻³	2,55	2,55
Porosidade total, cm cm ⁻³	0,47	0,44
Matéria orgânica, g kg ⁻¹	17,17	11,95
Carbono orgânico, g kg ⁻¹	9,96	6,93
pH em água, (1:2,5)	7,7	7,8
Soma cátions trocáveis (S), cmol _c dm ⁻³	11,22	10,05
Capacidade de troca de cátions (CTC), cmol _c dm ⁻³	13,23	12,06
P, mg dm ⁻³	232	135
Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³	2,91	2,70
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,46	1,25
Ca ⁺² + Mg ⁺² , cmol _c dm ⁻³	6,85	6,10
Ca ⁺² , cmol _c dm ⁻³	4,60	3,85
Al ⁺³ , cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00
H + Al, cmol _c dm ⁻³	2,01	2,01

⁽¹⁾ EMBRAPA (1997)

Foram instaladas parcelas experimentais, que consistiram nos sulcos pré-formados com a utilização de uma enxada utilizando-se da extremidade cortante de formato triangular e mantendo-se a inclinação natural do terreno. As dimensões dos sulcos foram de 5 m de comprimento, no sentido da maior pendente, 6 cm de

profundidade e 0,5 m de largura, delimitados superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30 cm de altura, dos quais 15 cm foram enterrados.

Os 25 sulcos pré-formados foram divididos em 5 blocos de 5 sulcos (Figura 1), e imediatamente submetidos aos testes de erosão em sulcos com a aplicação dos diferentes níveis de vazões.

Os tratamentos ou fatores experimentais consistiram na aplicação dos diferentes níveis de vazão de forma aleatória, conforme abaixo:

Tratamento 1 – 17,5 L min⁻¹;

Tratamento 2 – 47 L min⁻¹;

Tratamento 3 – 60 L min⁻¹;

Tratamento 4 – 77 L min⁻¹;

Tratamento 5 – 110 L min⁻¹;

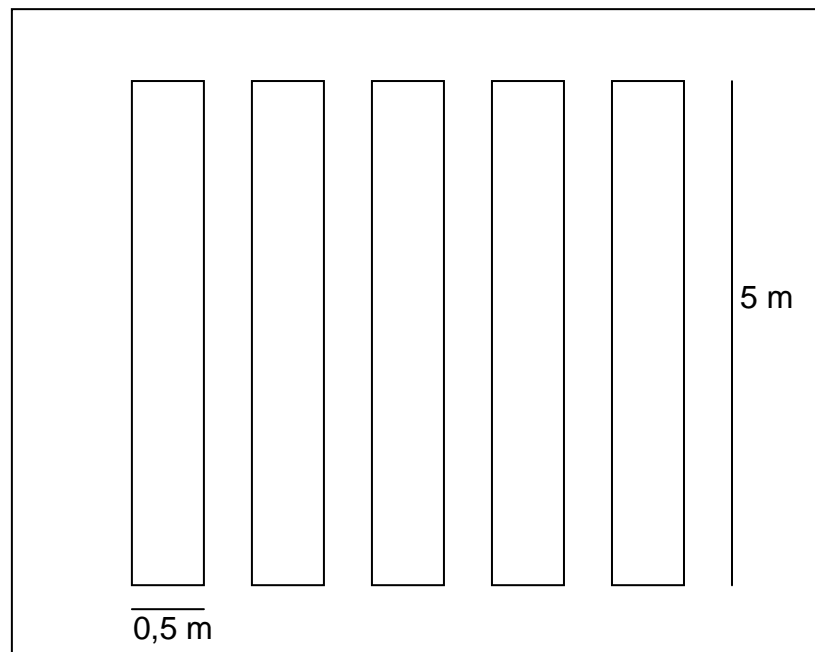


Figura 1. Representação esquemática da área experimental com a distribuição das parcelas em sulcos de forma casualizada.

Os testes experimentais tiveram duração de 20 minutos (Cantalice, 2002), com a aplicação das diferentes vazões em cada sulco.

A água foi conduzida aos sulcos, por gravidade e através de mangueira de polietileno calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 1000 L,

mantido sob carga constante, e abastecido com um reservatório de água de chuva próximo à área experimental. Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes plásticos circulares, de tal forma que a borda superior do recipiente ficasse no nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegavam aos sulcos pelo transbordamento dos recipientes. Na extremidade inferior dos sulcos foi instalada uma calha coletora metálica para auxiliar na coleta das amostras de descargas líquida e sólida. A calha coletora foi acoplada em canos de PVC com 75 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, que conduzam toda a descarga líquida e sólida para um ponto de coleta localizada em cota mais inferior. As coletas de descargas líquida e sólida foram realizadas em potes milimetrados de 2,5 L, em intervalo de tempo de três minutos, contados a partir da aplicação da água até o final dos testes. A duração da coleta foi de no máximo 5 segundos. Os volumes coletados eram aferidos em provetas e colocados em recipientes plásticos de 1 L, para posterior determinação da concentração de sedimentos.

A velocidade superficial do escoamento foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que o corante azul de metileno percorresse a distância de 3 metros centrais dos sulcos. Os valores de velocidades superficiais assim obtidos foram expressos em $m s^{-1}$. As velocidades superficiais foram tomadas de 3 em 3 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento, e no mesmo intervalo de determinação das descargas líquidas e sólidas. A velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$) foi determinada multiplicando-se os valores obtidos durante os testes de velocidade superficial por um fator de correção $\alpha = 0,6$, que vem sendo usado por diversos autores, como Cantalice et al. (2005), Braida e Cassol (1996) e Slattery e Bryan (1992).

A declividade das parcelas em sulcos foi medida antes da realização dos testes, com auxílio de um nível, obtendo-se a diferença de altura entre dois pontos de distância conhecida, sendo o resultado expresso em $m m^{-1}$.

Para determinação da concentração de solo e das taxas de erosão, os recipientes plásticos contendo solo e água, foram pesados em laboratório, sendo adicionado 5 mL de uma solução de alúmen de potássio a 5%, com o objetivo de acelerar a deposição dos sedimentos. Após um período de 24-48 horas, a água sobrenadante foi succionada manualmente por meio de uma mangueira, restando somente nos potes o solo umedecido. Em seguida, os recipientes foram colocados em estufa a

65°C por um período máximo de 72 horas, até a secagem completa do solo. Passado o período de secagem, os recipientes foram pesados com e sem o solo seco, sendo a massa de solo seco expressa em kg.

A partir da massa de solo seco e da duração das coletas, determinaram-se as taxas de desagregação de solo nos sulcos, obtidas através da seguinte relação descrita por Cantalice et al. (2005):

$$D_r = \frac{Q \cdot C}{L \cdot P_m} \quad (04)$$

sendo D_r = taxa de desagregação do solo em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Q = descarga líquida (L s^{-1}), C = concentração (kg L^{-1}), P_m = perímetro molhado (m) e L = comprimento do sulco (m).

Admitindo-se que na erosão em sulcos com a adição de vazões, a carga de sedimentos é muito menor que a capacidade de transporte, pode-se utilizar a equação 01 para determinação das taxas momentâneas de desagregação, aceitando-se que a mesma se aproxima da capacidade de desagregação do escoamento. Desta forma, a erodibilidade do solo em sulco foi determinada através da análise de regressão para o modelo linear entre os valores médios de tensão cisalhante (τ) e de desagregação do solo (D_r) obtidos para cada vazão aplicada, conforme modelo de previsão de erosão WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), equação (03) $D_r = K_r (\tau - \tau_c)$, e a tensão de cisalhamento do escoamento foi obtida de acordo com a equação (02).

As perdas totais de solo durante os 20 minutos de duração do teste foram calculadas a partir dos dados de concentração instantânea de sedimentos do escoamento superficial e da taxa de descarga líquida pela expressão abaixo, citada por Cantalice (2002):

$$PS = \frac{\sum Q_{in} C_{in} t}{A} \quad (05)$$

sendo: PS = perda total de solo (kg m^{-2}); Q_{in} = taxa de descarga líquida (L min^{-1}); C_{in} = Concentração de sedimentos (kg L^{-1}); t = intervalo entre amostragens (min), e A = área do sulco em m^2 .

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, sendo utilizadas as médias referentes as 5 repetições dos tratamentos em sulcos para comparação entre os mesmos. A análise estatística dos dados foi realizada com a

utilização do programa estatístico SAS (SAS, 1998), utilizando-se o teste de Tukey, a 5% de significância, para comparação das médias. Na análise de regressão dos dados utilizou-se um programa computacional do Windows, onde se obteve as equações ajustadas para cada regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tensões de cisalhamento e taxas de desagregação do solo

As taxas de desagregação de solo determinadas em função do tempo de aplicação das diferentes vazões nos sulcos são apresentadas na Figura 2. Observa-se que as taxas de desagregação foram decrescentes com o transcorrer do tempo de aplicação das vazões aos sulcos.

A ocorrência de desagregação em taxas mais altas no início dos testes, certamente está relacionada ao fato do solo ter sido preparado pouco antes da realização dos testes e, também, não houve tempo e nem condições para que as partículas desagregadas pelo preparo se re-agregassem, estando muito soltas e fáceis de serem removidas pelo escoamento superficial nos sulcos. Portanto, nem todo o sedimento transportado pelo escoamento superficial foi por ele desagregado.

A partir dos 9 minutos de testes, as taxas de desagregação foram menores e mais uniformes. Nesse momento, o sedimento transportado é aquele desagregado pelo escoamento e, também, pelo desmoronamento das paredes do sulco. Além disso, a água atingiu camadas do solo não revolvido, principalmente na maior vazão (110 L min^{-1}) e que, por isso, apresenta taxas de desagregação mais elevadas em todos os testes.

A Tabela 2 apresenta as vazões aplicadas juntamente com as tensões de cisalhamento do escoamento superficial desenvolvidas, e as taxas de desagregação do solo operadas pelas tensões de cisalhamento. Ficou evidenciado que as tensões de cisalhamento observadas foram significativamente responsáveis pela elevação das taxas de desagregação de solo, fato também atestado nos trabalhos de Cantalice et al. (2005); Reichert et al. (2001); Lima (1997); Braida & Cassol (1996); Giasson & Cassol (1996) e Foster et al, (1984).

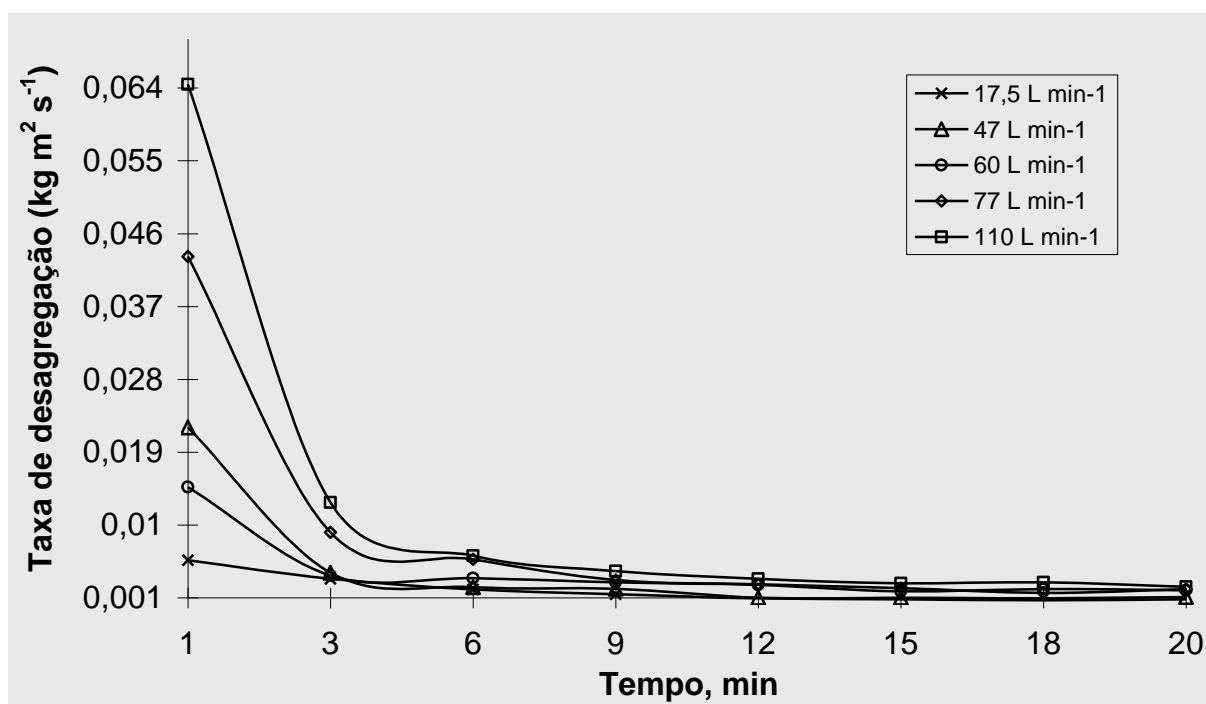


Figura 2. Taxa de desagregação de solo nos sulcos em função do tempo de aplicação de água aos sulcos, para diferentes vazões. Médias de cinco repetições

A desagregação do solo ocasionada pela tensão de cisalhamento do escoamento em superfície livre ocorre, (Rauws & Govers, 1988), quando a tensão de cisalhamento supera as condições de resistência ao início de movimento, têm início à formação dos sulcos, e o balanço entre a tensão de cisalhamento média do escoamento e a resistência à erosão das partículas e dos agregados do fundo, determina as taxas de desagregação.

Tabela 2. Taxa média de desagregação do solo em sulcos (D_r) e tensão cisalhante média do escoamento (τ), em função das vazões aplicadas. Médias de 5 repetições

Vazão L min ⁻¹	D_r	τ
	kg m ⁻² s ⁻¹	N m ⁻²
17,5	0,0009a	1,23a
47	0,0012ab	1,49a
60	0,0023ab	1,50ab
77	0,0023bc	1,55ab
110	0,0031c	1,60b

Médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%

A partir dessas observações, relacionaram-se as tensões cisalhantes médias dos escoamentos com as taxas médias de descarga líquida dos sulcos, obtendo-se a seguinte expressão:

$$\tau = 1,4872Q^{0,152} \quad r^2 = 0,97 \quad (06)$$

Foster et al. (1984) e Giasson (1992) observaram relações semelhantes com expoentes iguais a 0,34 e 0,37, respectivamente. Esta relação entre a tensão cisalhante e a taxa média de descarga líquida (Figura 3), mostra que o aumento da tensão cisalhante é proporcionalmente menor quando as taxas de descarga são elevadas, demonstrando a influência dos fatores de resistência do solo e da superfície do solo, ou seja da erodibilidade do solo, caso contrário, a equação (6) seria uma reta. Como a variação da rugosidade hidráulica obtida (vide capítulo I) não foi significativa para todos os níveis de vazão nessas condições de solo descoberto, pode-se atribuir toda manifestação de resistência à tensão de cisalhamento do escoamento a erodibilidade do solo.

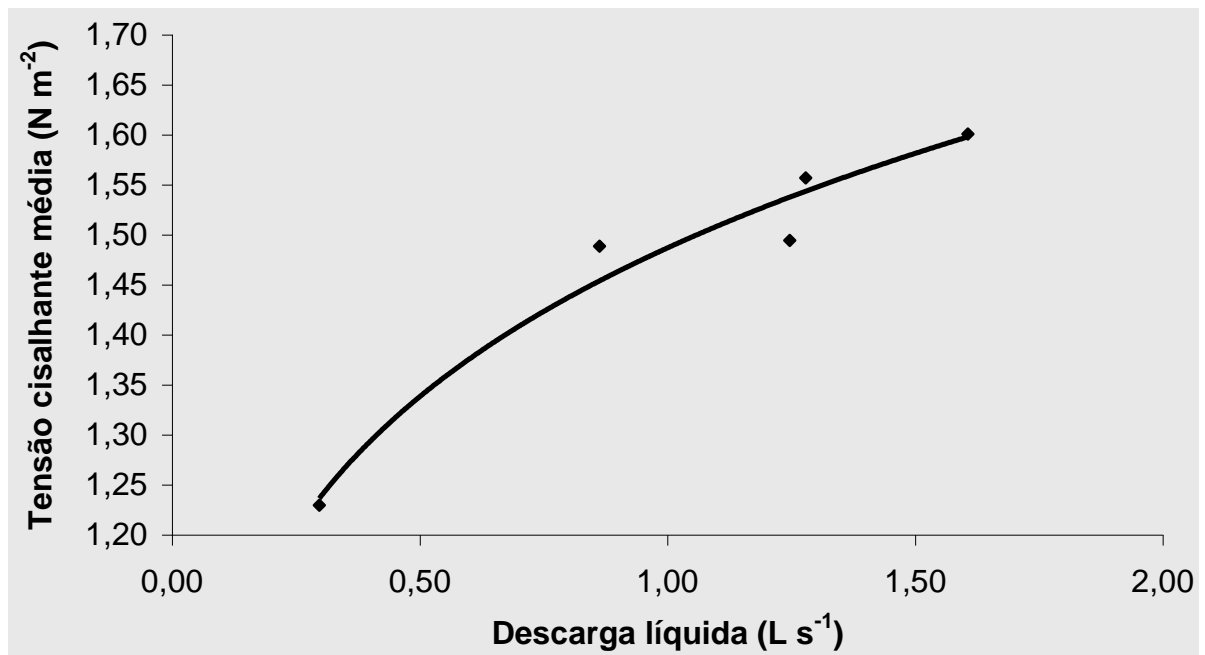


Figura 3. Tensão cisalhante média do escoamento em função das taxas de descarga líquida obtidas nos sulcos pré-formados em um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil. Média de cinco repetições

Erodibilidade do solo e tensão crítica de cisalhamento

A erodibilidade do solo em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento do solo pelo escoamento superficial foram obtidas a partir da análise de regressão, relacionando-

se as taxas de desagregação de solo nos sulcos com as tensões cisalhantes dos escoamentos.

A metodologia para determinação da erodibilidade do solo em sulcos, preconizada pelo modelo WEPP (Lane & Nearing, 1989), consta da aplicação de vazões acompanhadas ou não de chuvas simuladas em solo recentemente preparado, até que a taxa de escoamento superficial torne-se constante. No presente estudo, a aplicação de chuva não foi realizada e também não houve o pré-umedecimento do solo, pois, no dia anterior houve eventos de chuva natural que umedeceu o solo, o suficiente para atingir a camada mais subsuperficial, de 0 a 20 cm.

A erodibilidade em sulcos (K_r), que é o coeficiente angular da reta que define as relações entre D_r (taxa de desagregação em sulcos) e τ (tensão de cisalhamento do escoamento), obtida para o Cambissolo foi de $0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4). Determinou-se, também, a tensão crítica de cisalhamento do solo, τ_c , de $1,185 \text{ Pa}$, que representa o valor da tensão de cisalhamento quando a desagregação em sulcos é igual à zero, ou seja, o intercepto da reta no eixo das abscissas.

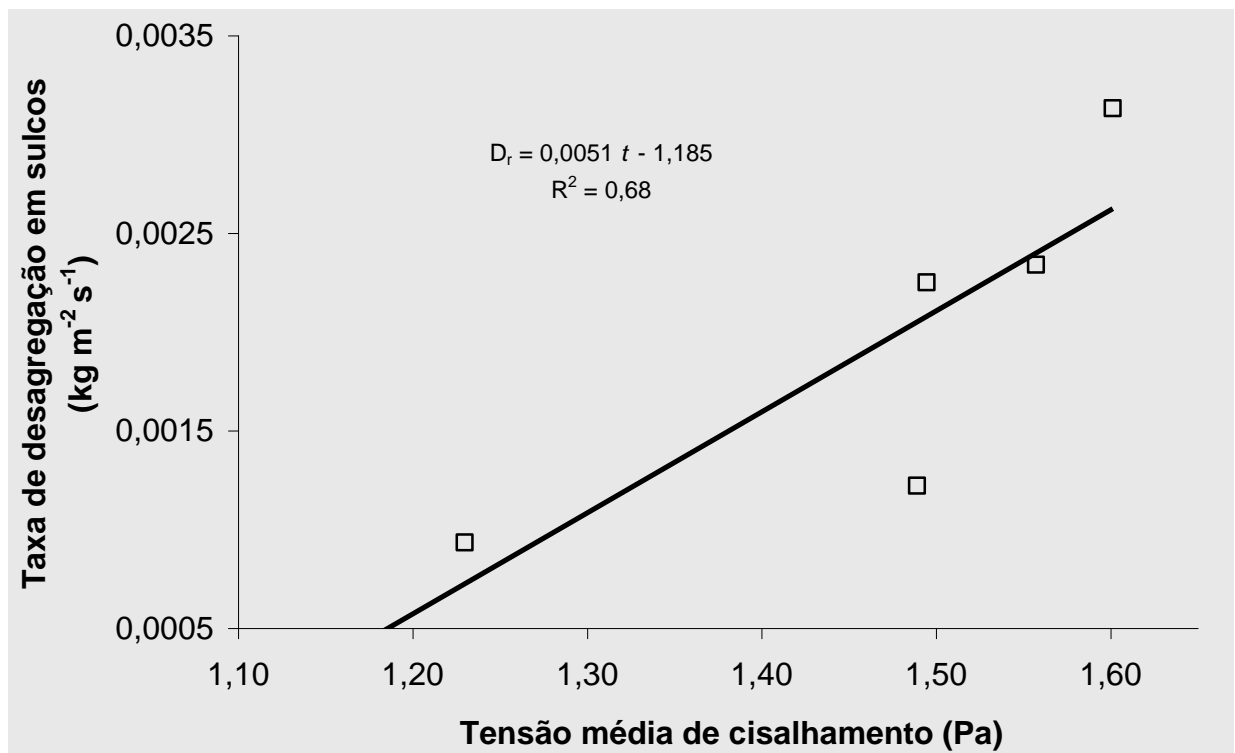


Figura 4. Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento

Os valores de erodibilidade do Cambissolo do semi-árido expressam suas características de textura média superficial e de horizonte B incipiente, características de um solo jovem num ambiente de restrição hídrica que dificulta a evolução dos solos. Os valores de K_r ($0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e τ_c ($1,185 \text{ Pa}$) estão de acordo com os valores disponíveis para os solos do Brasil, Cantalice et al. (2005); Schafer et al (2001); Braida & Cassol (1996) e Giasson & Cassol (1996), que encontraram respectivamente valores de erodibilidade na ordem de 0,0024, 0,012, 0,0104 e $0,0077 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento de 2,75, 2,65, 4,81 e $1,13 \text{ N m}^{-2}$.

Ainda observa-se na Figura 4, que o valor de coeficiente de determinação obtido foi um pouco inferior aos obtidos por Cantalice et al. (2005); Schafer et al (2001); Braida & Cassol (1996) e Giasson & Cassol (1996), o que ocorre pelo fato dos escoamentos gerados foram todos em transição, de sulcos incipientes, o que impediu uma maior elevação das tensões cisalhantes e maiores taxas de desagregação, e assim, um melhor ajuste da reta.

Percebe-se que o estudo da erodibilidade do solo em sulcos e de tensão crítica de cisalhamento, para os solos do Brasil, ainda são poucos e majoritariamente da região sul do país, e segundo Schafer et al. (2001), são dados ainda insuficientes para obter conclusões sobre a relação destes dois parâmetros de erosão em sulcos com as propriedades do solo.

Na Figura 5, têm-se representado, num intervalo de 20 minutos de testes o aumento das perdas de solo com a elevação das vazões aplicadas.

As taxas crescentes de perdas de solo com o transcorrer da aplicação da vazão, estão relacionadas com o aumento da capacidade de desagregação e transporte pelo escoamento concentrado nos sulcos. Essas perdas mostraram-se crescentes, indicando a necessidade do controle ao livre escoamento, principalmente quando este escoamento está concentrado em pequenos canais. Esse controle, segundo Bezerra & Cantalice (2006), pode ser obtido com uso de práticas de conservação do solo para garantir um adequado controle da erosão, pois o livre escoamento tem menor resistência quando o solo apresenta-se descoberto. A mesma tendência foi notada por Giasson & Cassol (1996) e Braida & Cassol (1996).

Uma relação matemática linear foi obtida entre as perdas de solo e as vazões crescentes aplicadas, representada equação abaixo:

$$PS (kg) = 2,98Q (L \text{ min}^{-1}) + 31,73 \quad r^2 = 0,94 \quad (07)$$

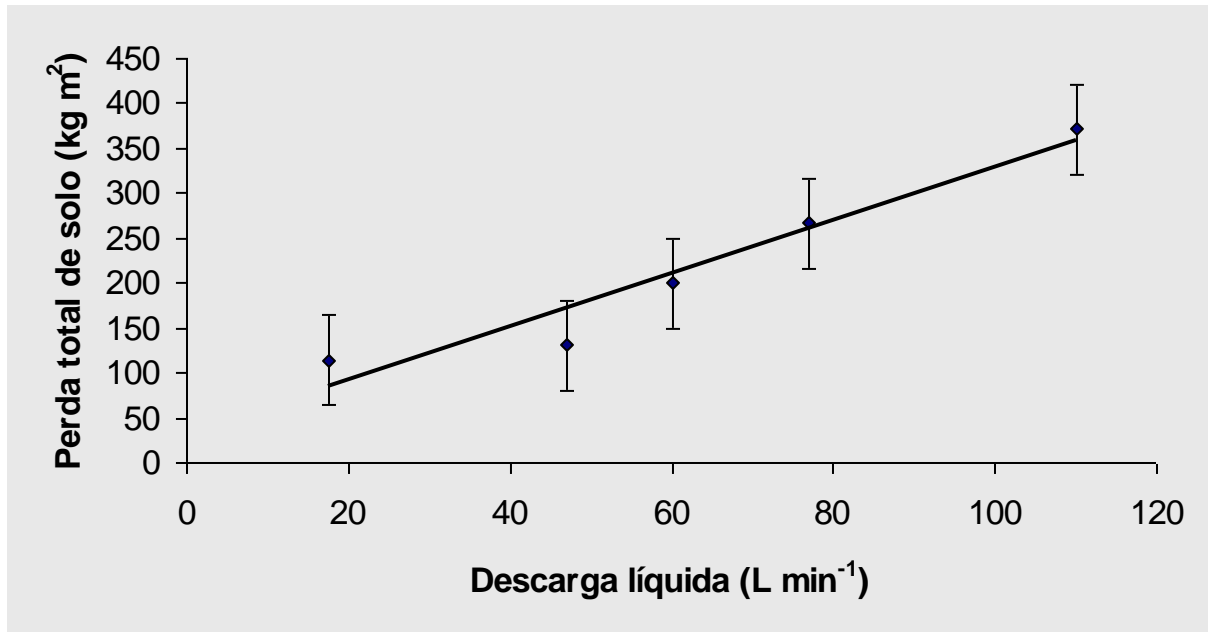


Figura 5. Perdas totais de solo obtidas por diferentes níveis de vazão aplicados em sulcos de erosão pré-formados, no semi-árido do Brasil. Valores médios de 5 repetições

CONCLUSÕES

1. Os escoamentos gerados nos sulcos elevaram significativamente as tensões de cisalhamento, sendo responsáveis pelo aumento das taxas de desagregação do solo obtidas;

2. Para o solo estudado, foi determinado o fator de erodibilidade do solo em sulcos (K_r) de $0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de $1,185 \text{ N m}^{-2}$;

3. As perdas totais de solo em sulcos aumentaram com a elevação das diferentes vazões aplicadas, proporcionando perdas de solo, com valores de até 371 kg m^2 .

LITERATURA CITADA

AL-DURRAH, M.M. & BRADFORD, J.M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. Soil Science Society of America Journal. Madison, 45:949-953, 1981.

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D. da; PRUSKI, F.F. & MATOS, A.T. de. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entressulcos. Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, 5(1):124-130, 2001.

BEATS, S. de.; POESEN, J.; GYSSELS, G. & KNAPEN, A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. Geomorphology, 76:54-67, 2006.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J.C. & RITTER, S.R. Erosão hídrica em um nitossolo háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II – perdas de nutrientes e carbono orgânico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 28:1045-1054, 2004.

BEZERRA, S.A. & CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30:565-573, 2006.

BRAIDA, J.A. Relações da erosão em entressulcos com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em um solo Podzólico Vermelho escuro. 1994, 152f. (Dissertação). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 20:127-134, 1996.

BRUNORI, F.; PENZO, M.C. & TORRI, D.F. Soil shear strenght: its measurement and soil detachability. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, 16:59-71, 1989.

CANTALICE, J.R.B.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L. de O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 29:597-607, 2005.

CANTALICE, J.R.B. Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo. 2002, 141f. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M. & MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação o solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.7, p.685-690. 2004.

CAVICHIOLO, S.R. Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de Pinus. 2005. 231f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

CHAMECKI, P.R. Metodologias de laboratório para estudos de erosão hídrica em solos: aplicação de uma argila da formação Guabirotuba. 2002, 260f. (Dissertação). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

CHOW, V.T. Open channel hydraulics. New York: Mcgraw-hill, 1959.680p.

ELLIOT, W.J.; LIEBNOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEEP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88. West Lafayette: The Ohio State University: USDA-ARS, 1989. (NSERL – National Soil erosion Research Laboratory Report, 3).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FLANAGAN, D.C. & NEARING, M.A. United States Department of Agriculture-USDA: Water Erosion Prediction Project. West Lafayette, National Soil Erosion Research laboratory – NSERL, 1995. (Technical Documentation, 10).

FOSTER, G.R. & MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: USDA-ARS (Ed.) present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington: USDA-Agricultural Research, 1975. p.190-207. (ARS-S, 40).

FOSTER, G.R; HUGGINS, L.F. & MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relations. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(3):797-804, 1984.

GIASSON, E. & CASSOL, E.A. Relações de erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um Plintossolo franco-argilo arenoso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 20:117-125, 1996

GIASSON, E. Relações da erosão em sulcos com vazões e doses de resíduos vegetais incorporados no solo. Porto Alegre, 1992. 108f. (Dissertação). Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

GRIEBELER, N.P; PRUSKI, F.F.; MEHL, H.U.; SILVA, D.D. & OLIVEIRA, L.F.C. Equipamento para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9(2): 166-170, 2005.

LAFLEN, J.M. & THOMAS, A.W. Cropland experiments for the WEPP project. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, San Joseph, 1987. Papers. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1987. 14p. (Paper n. 87-2544).

LANE, L.J. & NEARING, M.A. USDA – Water erosion prediction project: Hillslope profile model documentation. West Lafayette, USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory. 1989.

LIMA, V. S. de. Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes tipos de preparo do solo e manejo de resíduos culturais. 1997. 124f. (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

NASCIMENTO, M.M.A.; TABOSA, J.N.; TAVARES FILHO, J.J. Avaliação de cultivares de milho no agreste semi-árido de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, 7(1):53-56, 2003.

PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D.; MOREIRA, A.P; MAFFINI, G.F.; MELLER, A & DILL, P.R.J. Evolução de processo erosivo acelerado em trecho do Arroio Vacacaí Mirim. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 6(2):129-135, 2001.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G. & VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importante and research needs. Catena, 50:91-133, 2003.

RAUWS, G. & GOVERS, G. Hydraulics and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. Journal of Soil Science, Baltimore, 39:111-124, 1988.

REICHERT J.M.; SCHAFER, M.J.; ELTZ, F.L.F. & NORTON, L.D. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em argissolo vermelho-amarelo arênico. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, 36(7):965-973, 2001.

SAS Institute, Inc. The SAS System for windows: Release ver. 6.8, Cary, 1998. 1CD-ROM.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F. & REINERT, D.J. erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25:419-430, 2001.

SLATTERY, M.C. & BRYAN, R.B. Hydraulics conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. Earth Surface Processes and Landforms, 17:127-146, 1992.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste: Estado de Pernambuco. Recife, 1990. 363p. (Série Pluviométrica).

CAPÍTULO III

**DESEMPENHO DE EQUAÇÕES DE TRANPORTE DE SEDIMENTOS EM SULCOS
DE EROSÃO EM UM CAMBISSOLO NO SEMI-ÁRIDO DO BRASIL**

RESUMO

O transporte de sedimentos em canais aluviais envolve alguma complexidade em função da turbulência do escoamento e da dispersão e re-suspensão de partículas e agregados de solo no escoamento em movimento. Funções de transporte de sedimentos fundamentadas em turbulência e na potência do escoamento vêm sendo testadas para quantificação desse transporte numa variada amplitude de lâminas de escoamento. Diante disso, este trabalho teve por objetivo avaliar as condições hidráulicas e quantificar o transporte sólido para uma análise da adequação de equações de transporte de sedimentos na erosão em sulcos do semi-árido do Brasil. Para obtenção desses objetivos sulcos foram pré-formados em um CAMBISOLO de textura franco arenosa do semi-árido do Estado de Pernambuco-Brasil, no terço médio de uma encosta com declive médio de $0,06 \text{ m m}^{-1}$, e submetidos à aplicação de fluxos durante 20 minutos de teste, com as seguintes vazões: 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min^{-1} . Todos os regimes de escoamento ensaiados nos sulcos de erosão situaram-se na faixa de transição e supercríticos, condições essas, iniciais de formação dos sulcos. Duas equações baseadas na variável hidráulica da potência do escoamento, sendo uma ajustada neste trabalho, foram as mais eficientes na estimativa do transporte de sedimentos. A equação de DuBoys fundamentada na tensão cisalhante do escoamento apresentou menor erro de estimativa para a menor vazão ensaiada, indicando predominância de transporte por arraste no início do desenvolvimento dos sulcos.

Palavras chaves: erosão em sulcos, transporte por arraste, potência do escoamento.

ABSTRACT

The transport of sediments in aluvial chanals involves some complexity as a function of the turbulence of the stream and the dispersion and re-suspension and of soil particles and aggregates in the steam in movement. Functions of solid transport based upon the turbulence and the stream power have been tested for the quantification of this transport in a large of streams depths. Consequently this work had for objective to evaluate the hydraulics conditions and to quantify the solid transport for one analyzes of the adequacy of equations of transport of sediments in rill erosion in a CAMBISSOLO of semi-arid of Brazil. Rills was preformed under the CAMBISSOLO of sand texture, of a hillside with average declivity of $0,06 \text{ m m}^{-1}$, and submitted to the application of flows during 20 minutes of test, with the following outflows: 17,5; 47; 60; 77 and 110 L min^{-1} . The entire stream regimes observed in the erosion rills was of supercritical transiction, initial condition for the formation of the rills. Two equations based upon the hydraulic variable of the stream power, the one adjusted in this work, were most efficient in the estimate of the sediments transport. The equation of Du Boys based upon the shear stress of the flow the smallest presented of estimate for the smallest assayed outflow, indicating the predominance of drag transport at the beginning of the development of the rills.

Key Words: rill erosion, transport for drags, stream power.

INTRODUÇÃO

O movimento de sedimentos em canais abertos é um processo muito complexo e sua quantificação talvez nunca possa ser totalmente possível, por conta da existência de uma grande incerteza do conhecimento dos parâmetros responsáveis pelos processos de transporte. A turbulência e também os mecanismos de dispersão e re-suspensão possuem caráter casual, os quais podem ser correspondidos em funções estocásticas (Bechteler & Farber, 1982), que descrevem o movimento dos sólidos por princípios de probabilidade, nos quais o momento de quantidade de movimento de uma partícula é baseado em medidas de turbulência e parâmetros de escoamento. Nesse sentido, Nearing *et al.* (1997), Lei *et al.* (1998) e Cantalice *et al.* (2005) ajustaram a variável hidráulica da potência do escoamento, originalmente definida por Bagnold (1988), na forma de funções logísticas para quantificação do transporte sólido em sulcos de erosão nas áreas vertentes de bacias hidrográficas. Em termos probabilísticos, as funções logísticas descrevem distribuições acumulativas e dão suporte às condições de entrada de movimento das partículas na mecânica da erosão.

Barcelos *et al.* (2004) apresentaram uma avaliação de algumas equações de transporte de sedimentos em sulcos de erosão e constataram que as equações mais adequadas ao transporte nos sulcos de material coesivo foram às baseadas na potência do escoamento.

Na mecânica fluvial, as equações de transporte de sedimentos foram desenvolvidas para as condições de escoamento em canais aluviais, que apresentam algumas características diferenciadas do escoamento produzido em vertentes. Segundo Julien & Simons (1985), o escoamento em vertentes é caracterizado por uma fina lâmina de água que cobre a superfície do solo e converge ao longo da encosta em pequenos canais denominados de sulcos de erosão, os quais em algumas situações evoluem para grandes canais denominados voçorocas. Esta condição permite inferir que o escoamento na vertente quando difuso em entressulcos tem regime laminar (Cassol *et al.*, 2004), e quando concentrado nos sulcos de erosão, tem regime de transição no início da formação dos mesmos, e turbulentos quando o sulco se desenvolve com número de Reynolds acima de 2500 (Cantalice *et al.*, 2005).

Rauws (1987) observa que a velocidade de cisalhamento (U^*) é um parâmetro relacionado ao início da formação dos sulcos, estando relacionada com a ocorrência de eventos turbulentos em regime supercrítico e conseqüentes variações da velocidade. O mesmo autor verificou o desenvolvimento de sulcos com fundo constituído por partículas de sílica com um diâmetro mediano de 90 μm , a partir de velocidade de cisalhamento de 0,032 m s^{-1} . Nesse sentido, Slattery & Bryan (1992), apontaram o número de Froude (F_r) acima de 1,2 relacionado ao início da formação dos sulcos para solos arenosos (menos coesivos), e de 2,8 para solos de textura mais argilosa.

Para Bryan (1987), os sulcos de erosão fazem parte da paisagem e por isso têm um significado geomorfológico, por serem condutores da água e do sedimento transportado e constituírem um sistema embrionário de drenagem, não estando portanto, somente associados ao uso agrícola. Slattery & Bryan (1992) destacam que o escoamento superficial atinge sua capacidade máxima de desagregação e transporte, quando está concentrado nos sulcos de erosão, enquanto Foster et al. (1984) apontam a erosão em sulcos como uma das principais fontes de produção de sedimentos em áreas agrícolas.

Em adição, a hidrologia do semi-árido do Brasil apresenta um padrão distinto caracterizado pelo caráter intenso, com concentração dos volumes de chuvas, em curtos períodos de tempo. A pouca duração das chuvas do semi-árido com grande variação de recorrência, em face da irregular ocorrência espacial e temporal produzem escoamentos superficiais e sub-superficiais que ocorrem na forma de eventos extremos. Esses eventos extremos ressaltam o caráter probabilístico do transporte de sedimentos no ambiente semi-árido do Brasil.

As fórmulas de transporte sólido são expressões que associam os parâmetros hidráulicos do escoamento a parâmetros que caracterizam o material existente no fundo do canal, na sua maioria a partir de dados de laboratório. Estas fórmulas são de difícil uso, visto que são numerosas e sujeitas à precaução em razão da diversidade de condições representadas e dos resultados que fornecem. Três abordagens são identificáveis na estrutura dessas expressões de transporte de sedimentos, segundo Garcia (1983) e Yang (1996): 1) da atuação da tensão de cisalhamento sobre o leito; 2) do mecanismo de turbulência e em princípios de probabilidade, e 3) das características gerais do escoamento.

Dentre as equações que consideram a descarga sólida como uma função da atuação da tensão de cisalhamento diretamente sobre o leito, destaca-se equação de Du Boys (1876). Essa equação considera a quantidade de material transportado como dependente do excesso da tensão de cisalhamento do escoamento exercida sobre o leito, onde o escoamento se desloca em camadas e os sedimentos deslizam uns sobre os outros. A expressão proposta é a seguinte:

$$q_s = \psi \tau (\tau - \tau_{cr}) \quad (01)$$

onde q_s = Descarga sólida (kg s^{-1}); τ = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito (N m^{-2}) e os valores de ψ e τ_{cr} podem ser encontrados através de gráficos (Graf, 1996), a partir dos valores de diâmetro do sedimento (d_{50}) expressos em milímetros.

Shields (1936) apresentou um estudo do movimento incipiente de partículas baseado na tensão de cisalhamento, na forma do conhecido diagrama de Shields. Assim, a equação semi-empírica proposta para o transporte sólido tem a seguinte:

$$\frac{q_s \cdot \gamma_s}{q \cdot \gamma \cdot S} = 10 \cdot \frac{\tau - \tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} \quad (02)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); q = descarga líquida por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); d = diâmetro característico da mistura de sedimentos, d_{50} (mm); γ e γ_s = peso específico da água e do sedimento (N m^{-3}); S = declividade do sulco (m m^{-1}); τ = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito (N m^{-2}) e τ_{cr} = tensão crítica de cisalhamento, abaixo da qual não existe erosão.

Meyer-Peter & Muller (1948) baseados na hipótese de que parte da energia que está animando o líquido em movimento é usada para o transporte do material de fundo, e a outra parte é usada para o transporte líquido, e de que parâmetros semelhantes governam o início do movimento e o transporte de sedimentos, desenvolveram a seguinte expressão:

$$\gamma \frac{(K_r)^{3/2}}{K_r} R_h S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d + 0,25 \rho^{2/3} q_s^{2/3} \quad (03)$$

$$K_r = \frac{26}{d^{1/6}} \quad (04)$$

$$S_r = \frac{V^2}{K_r^2 R_h^{4/3}} \quad (05)$$

$$S = \frac{V^2}{K_s^2 R_h^{4/3}} \quad (06)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); d = diâmetro da partícula do sedimento, d_{50} (m); γ e γ_s = peso específico da água e do sedimento (N m^{-3}); S = declividade do sulco (m m^{-1}); R_h = raio hidráulico (m); ρ = massa específica da água (kg m^{-3}); k_s / K_r = Correção da resistência de superfície de forma e de fundo; S = ajuste do declive da perda de energia total, isto é, devido a resistência do sedimento S_r , é responsável pelo movimento do escoamento de leito; V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

Entre as equações de transporte de sedimentos que consideram a descarga sólida como uma função do mecanismo de turbulência e em princípios de probabilidade, a primeira desenvolvida por Kalinske (1947). O autor considera que o movimento dos sedimentos ocorre quando as forças exercidas pelo escoamento atingem um valor crítico. As variações de pressão e a turbulência do escoamento fazem com que estas forças fltuem em torno de um valor médio. Considera, então, o transporte por arraste como uma fração do número, tamanho e velocidade média das partículas em movimento.

$$\frac{q_s}{U^* d} = f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right) \quad (07)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); d = diâmetro da partícula do sedimento, d_{50} (m); U^* = velocidade de cisalhamento (m s^{-1}); τ = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito (N m^{-2}) e τ_c = tensão crítica de cisalhamento (N m^{-2}).

Outra equação baseada em mecanismos e turbulência é a de Einstein-Brown. Brown (1950) desenvolveu uma equação de transporte de sedimento de fundo baseado na equação de Einstein (1942), que segue abaixo:

$$\phi = \frac{q_s}{\gamma_s F \sqrt{g(\gamma_s - \gamma) d^3}} \quad (08)$$

$$\phi = 40 \left(\frac{1}{\psi}\right)^3 \quad (09)$$

$$f = \frac{1}{\psi} = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (10)$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g d^3 ((\gamma_s - \gamma) - 1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g d^3 ((\gamma_s - \gamma) - 1)}} \quad (11)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); d = diâmetro da partícula do sedimento, d_{50} (m); τ = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito (N m^{-2}); ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); γ , γ_s = peso específico da água e do sedimento (N m^{-3}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); e, Ψ = parâmetro de intensidade do escoamento.

Engelund & Hansen (1966) elaboraram uma teoria para transporte por arraste baseada na tensão de cisalhamento e no fator de fricção do fundo, a partir do estudo das formas de fundo e das forças de energia entre o escoamento e o material de leito. Sugerem que o ganho em energia potencial por unidade de tempo e de largura para uma carga de sedimentos (q_s) movendo-se ao longo de uma distância (L), para ser elevada a uma altura comparável à altura de uma duna (h), é igual ao trabalho feito pela força de arraste para mover as partículas no mesmo intervalo de tempo. A expressão apresentada é:

$$f' \phi = 0,1 \theta^{5/2} \quad (12)$$

$$f' = \frac{2 g S d}{V^2} \quad (13)$$

$$\phi = q_s \left[\gamma_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g d^3 \right]^{-1/2} \quad (14)$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (15)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); d = diâmetro da partícula do sedimento, d_{50} (m); γ_s = peso específico do sedimento (N m^{-3}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); e τ = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito (N m^{-2}).

Cantalice *et al.* (2005) autores ajustaram uma equação com base na potência do escoamento, originalmente obtida por Bagnold (1988), como a variável de transporte que representa a quantidade de energia disponível originada das variações hidráulicas do escoamento em um sistema aluvial, na forma de taxa de trabalho gasto para o transporte de sedimento, capaz de produzir as tensões de cisalhamento que desagregam o contorno sólido. A expressão segue abaixo:

$$\log(q_s) = -2,9678 + \frac{1,15227}{\left[1 + \left(\frac{\Omega}{1,0401}\right)^{-2,4294}\right]} \quad (16)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s⁻¹) e Ω potência do escoamento (kg s⁻³).

A capacidade de transporte do escoamento superficial que desagrega as partículas do solo é expressa em termos de concentração. Para os escoamentos em sulcos, este modelo é função da potência do escoamento, usando uma relação baseada no trabalho de Govers (1990) onde mostra que a capacidade de transporte do escoamento superficial pode ser prevista por simples parâmetros hidráulicos (eq. 19) citada por Govers (1990) e Nearing et al. (1997):

$$\Omega = \rho_w g S q \quad (17)$$

sendo Ω = potência do escoamento por unidade de área expressa em kg s⁻³, ρ_w = massa específica da água em kg m⁻³, g = aceleração da gravidade em m s⁻², S = declive em m m⁻¹ e q = descarga líquida por unidade de largura em m² s⁻¹.

A equação de Schoklitsch (1934) que considera a descarga sólida como função das características globais do escoamento (semi-empíricas) é descrita a seguir. O autor desenvolveu uma fórmula baseada nas características macroscópica do escoamento, cujo valor de descarga sólida é obtido em função das características globais do escoamento, tais como, vazão, geometria e declividade do sulco. O autor definiu um valor crítico para uma vazão a partir da qual se inicia o movimento dos sedimentos, expressa da seguinte forma:

$$q_c = \frac{0,00001944 d}{S^{4/3}} \quad (18)$$

Usando este valor de descarga crítica, Schoklitsch sugere para o cálculo da descarga sólida por arraste a expressão:

$$q_s = 7000 \frac{S^{3/2}}{d^{1/6}} (q - q_c) \quad (19)$$

onde q_s = descarga sólida (kg s⁻¹); q_c e q = descarga líquida crítica e descarga líquida por unidade de largura (m² s⁻¹) d = diâmetro da partícula do sedimento, d_{50} (m); e S = declividade do sulco (m m⁻¹).

Para Machado et al. (2005) É imprescindível a realização de estudos modelando aspectos técnicos, econômicos e ambientais, visando alternativas a serem incorporadas como medidas mitigadoras de impactos ambientais. Dessa forma, os

modelos que consistem numa rotina de equações que trabalham em conjunto para descrição de fenômenos naturais, são ferramentas úteis. Diante disso, este trabalho tem por objetivo avaliar as condições hidráulicas e quantificar o transporte sólido para uma análise da adequação de equações de transporte de sedimentos na erosão em sulcos do semi-árido do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliação das condições hidráulicas e das relações de transporte sólido na erosão em sulcos foi realizada uma série de ensaios em setembro de 2005, na Estação Experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) no município de Serra Talhada, sertão do estado de Pernambuco. O Município de Serra Talhada-PE está inserido na região semi-árida do Alto Sertão do Rio Pajeú, a uma altitude de 429 m, com coordenadas geográficas de 7° 56' 15" de latitude Sul e 38° 18' 45" de longitude Oeste, distando 420 km de Recife. De acordo com a classificação de Koppen, o clima enquadra-se no tipo Bwh, denominado semi-árido, quente e seco, com chuvas de verão-outono com pluviosidade média anual para o período de 1912 a 1991 de 647 mm (SUDENE, 1990), e médias térmicas anuais superiores a 25°C.

A área experimental localizou-se no terço médio de uma pendente com aproximadamente 80 m de comprimento e declive médio de 6,5%. Esta área foi anteriormente cultivada com culturas anuais (milho, feijão), sendo mantida sem cultivo desde o mês de junho de 2005. O solo da área é um CAMBISSOLO de textura média (franco arenosa) com 59,6% de areia, 21,6 % de silte e 18,8% de argila, na profundidade de 0 a 10 cm.

Ao final do mês de Agosto de 2005, toda a área experimental foi limpa e em seguida demarcaram-se os blocos experimentais. No decorrer do mês de setembro, foram instaladas as parcelas experimentais com dimensões de 5 m de comprimento, no sentido da maior pendente, e 0,5 m de largura delimitada superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30 cm de altura, dos quais 15 cm foram enterrados. Os sulcos foram pré-formados com a utilização de uma enxada provida de cabo utilizando-se da extremidade cortante de formato triangular, num total de 25 sulcos divididos em 5 blocos de 5 sulcos cada, onde

foram imediatamente submetidos aos ensaios que se constituíram na aplicação das crescentes vazões (tratamentos) de forma aleatória:

Tratamento 1 – 17,5 L min⁻¹;

Tratamento 2 – 47 L min⁻¹;

Tratamento 3 – 60 L min⁻¹;

Tratamento 4 – 77 L min⁻¹;

Tratamento 5 – 110 L min⁻¹;

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso com 5 repetições, conforme a ilustração de um bloco encontrada na Figura 1. Os testes experimentais tiveram duração de 20 minutos com aplicação de água nos sulcos pré-formados. A água foi conduzida aos sulcos, por gravidade e através de mangueira de polietileno calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 1000 L, mantido sob carga constante, e abastecido com a água de um reservatório próximo da área experimental. Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes plásticos circulares, de tal forma que a borda superior do recipiente ficasse ao nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegava aos sulcos pelo transbordamento desses recipientes. As extremidades inferiores dos sulcos foram providas de calhas condutoras de sedimento acopladas a canos de PVC com 75 mm de diâmetro, que conduziram a descarga líquida e todo solo desagregado ao local da coleta nas suas extremidades inferiores. Cada sulco recebeu um nível de vazão que foi calibrado para cada ensaio.

Figura 1. Disposição das parcelas experimentais em um bloco no experimento de erosão em sulcos.

As análises de variância dos experimentos e de regressão foram realizadas por meio do programa estatístico SAS, e os ajustes das curvas através do TableCurve.

Na Figura 2, observa-se o aspecto dos sulcos pré-formados no CAMBISSOLO de textura franco arenosa no momento de aplicação de uma vazão. As dimensões das seções transversais nos sulcos foram aferidas por intermédio de um perfilômetro objetivando-se a determinação da área, perímetro molhado, raio hidráulico e altura da lâmina de escoamento. O perfilômetro constitui-se de 40 hastes plásticas espaçadas de 2 cm e acopladas a uma estrutura retangular de

acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura. As medições foram realizadas imediatamente após o início do escoamento provocado pela aplicação da água e 2 minutos antes do término dos testes. As medidas foram tomadas a 1,0 e 4,0 metros da extremidade superior dos sulcos conforme descrito a seguir. Com o perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas, soltaram-se suavemente as hastes plásticas até a superfície do solo, para em seguida serem fixadas as estruturas. Neste momento, o perfilômetro era removido para fora da área de testes. As formas da seção transversal dos sulcos eram, então, retratadas em cartolinas colocadas entre as hastes plásticas e a estrutura de acrílico, nas quais eram gravadas as dimensões dos sulcos com pincel atômico em escala real.



Figura 2. Aspecto do sulco pré-formado em um CAMBISSOLO com textura franco arenosa sob aplicação de 60 L m^{-1} .

Também foi determinada na cartolina, antes de retirar da área dos sulcos, a distância entre as hastes que marcavam a largura da lâmina, que quando grafadas e combinadas com a seção transversal dos sulcos, forneceram a altura de lâmina. A partir da conformação dos sulcos nas cartolinas obtiveram-se suas respectivas áreas com o auxílio de um planímetro, e os perímetros molhados através do uso de um curvímetro. Com essas dimensões foi determinado o raio hidráulico dos sulcos pela seguinte relação:

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (20)$$

sendo R_h = raio hidráulico da seção transversal do sulco (m), A = área da seção transversal (m^2), e P_m = perímetro molhado da seção transversal (m).

A velocidade superficial do escoamento foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que um corante (azul de metileno) percorresse a distância de 3 metros centrais dos sulcos. Os valores de velocidade superficiais do escoamento, assim obtidos, foram expressos em $m s^{-1}$. As velocidades superficiais foram tomadas de 3 em 3 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento. A velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$) foi determinada multiplicando-se os valores obtidos durante os testes da velocidade superficial por um fator de correção $\alpha = 0,6$, que vem sendo usado por diversos autores, como Cantalice et al. (2005), Braida e Cassol (1996) e Slattery e Bryan (1992).

As taxas de descarga foram determinadas pela medição do volume de enxurrada medido em provetas e coletados durante um tempo cronometrado (normalmente alguns segundos), sendo expressas em $m^3 s^{-1}$. Os volumes das enxurradas eram coletados em potes plásticos que foram conduzidos ao laboratório para determinar a concentração de solo e de água na enxurrada. As medições de volume de enxurrada e a amostragem para concentração de sedimentos eram efetuadas de 3 em 3 minutos, no mesmo intervalo de determinação da velocidade superficial.

Para quantificação do transporte sólido ocorrido nos sulcos de erosão pré-formados, determinou-se a descarga sólida segundo a equação (21) abaixo. Na avaliação do transporte de sólido utilizou-se as seguintes equações, já descritas acima: de Du Boys, Shields e Meyer-Peter & Muller; de Kalinske e Einstein-Brown; Schoklitsch; Engelund & Hansen, e Cantalice *et al.* (2005).

Também foi realizado ajuste das descargas sólidas obtidas, e expressas na forma da potência do escoamento de acordo com a equação (18), a algumas funções matemáticas, para melhor expressão do transporte de sedimentos ocorrido nos sulcos de erosão.

A determinação da descarga sólida (carga de sedimentos) observada do experimento foi obtida através da expressão abaixo:

$$q_s = \frac{M_{ss}}{D_c} \quad (21)$$

onde, q_s = descarga sólida (kg s^{-1}); M_{ss} = massa do solo seco (kg) e D_c = duração da coleta (s).

A todos os resultados obtidos pelas várias equações de transporte de sedimentos, foi determinado o erro de estimativa pela aplicação da expressão:

$$Er = \left[\left(\frac{q_{s\text{ calculado}} - q_{s\text{ observado}}}{q_{s\text{ observado}}} \right) \times 100 \right] \quad (22)$$

onde Er = erro de estimativa (%), q_s = descarga sólida (kg s^{-1}).

A análise de regressão foi realizada com o programa computacional TableCurve 2D, versão 5.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características hidráulicas dos sulcos de erosão utilizados na avaliação do transporte sólido

As condições hidráulicas médias dos escoamentos gerados nos sulcos de erosão encontram-se na tabela 1. Observa-se que os regimes de escoamento encontrados para todas as vazões aplicadas situaram-se na faixa de transição rápido, com Re entre 1125 a 2031 e $Fr > 1$, característicos dos sulcos de erosão (Barcelos et al., 2004; cantalice et al., 2005; Simons & Senturk, 1992). Todos esses escoamentos gerados na faixa de transição, indicam que foram obtidos sulcos de erosão na fase inicial de desenvolvimento dos mesmos.

Ainda observa-se na tabela 1, números de Froude acima de 1,2 para todas as vazões aplicadas, que é o limite sugerido por Slattery & Bryan (1992) para o início de formação de sulcos e, velocidades de cisalhamento acima de $0,032 \text{ m s}^{-1}$, que atestam a ocorrência de eventos turbulentos em regime supercrítico (Rauws, 1987).

Tabela 1. Características hidráulicas dos sulcos e dos escoamentos, a partir dos dados gerados em campo, em um Cambissolo do semi-árido de Pernambuco. Média de cinco repetições.

vazão	V	$R_h \times 10^{-3}$	R_e	F_r	S	U _*	d_{50}	Regime de escoamento
$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	m s^{-1}	m	adm.	adm.	m m^{-1}	m s^{-1}	mm	

0,0003c	0,489c	1,97c	1125,25c	2,31 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,0350b	0,1076b	Transição supercrítico
0,0008b	0,573b	2,49b	1714,33b	2,48 ^{ns}	0,061 ^{ns}	0,0386ab	0,1264ab	Transição supercrítico
0,0010ab	0,603a	2,69a	1927,08ab	2,46 ^{ns}	0,056 ^{ns}	0,0386ab	0,1158ab	Transição supercrítico
0,0013ab	0,605a	2,71a	1950,72 ^a	2,52 ^{ns}	0,059 ^{ns}	0,0394a	0,1243ab	Transição supercrítico
0,0018a	0,627a	2,86a	2031,54a	2,49 ^{ns}	0,057 ^{ns}	0,0400a	0,1427a	Transição supercrítico

V, velocidade média; R_h , raio hidráulico; R_e , número de Reynolds; F_r , número de Froude; S, declive; U_* , velocidade de cisalhamento e, d_{50} , diâmetro da partícula. Médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%, ns – não significativo

Avaliação das equações de transporte sólido

Na avaliação do transporte de sedimentos deste trabalho, foi ajustada uma relação potencial obtida entre o logaritmo da descarga sólida e a potência do escoamento, representada na Figura (3), e expressa pela equação (23). Cada ponto na curva da Figura (3) representa cinco repetições para cada vazão aplicada, e cada repetição representa a análise de oito intervalos estudados para cada parcela, num total de $n = 200$ pontos. A relação obtida tem a seguinte expressão:

$$\log(qs) = -3,557 + 0,199 \Omega^{0,976} \quad r^2 = 0,80 \quad (23)$$

onde Ω = potência do escoamento em kg s^{-3} , na forma da equação (17) citada por Govers (1990) e Nearing et al. (1997):

$$\Omega = \rho_w g S q$$

sendo Ω = potência do escoamento por unidade de área expressa em kg s^{-3} , ρ_w = massa específica da água em kg m^{-3} , g = aceleração da gravidade em m s^{-2} , S = declive em m m^{-1} e q = descarga líquida por unidade de largura em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

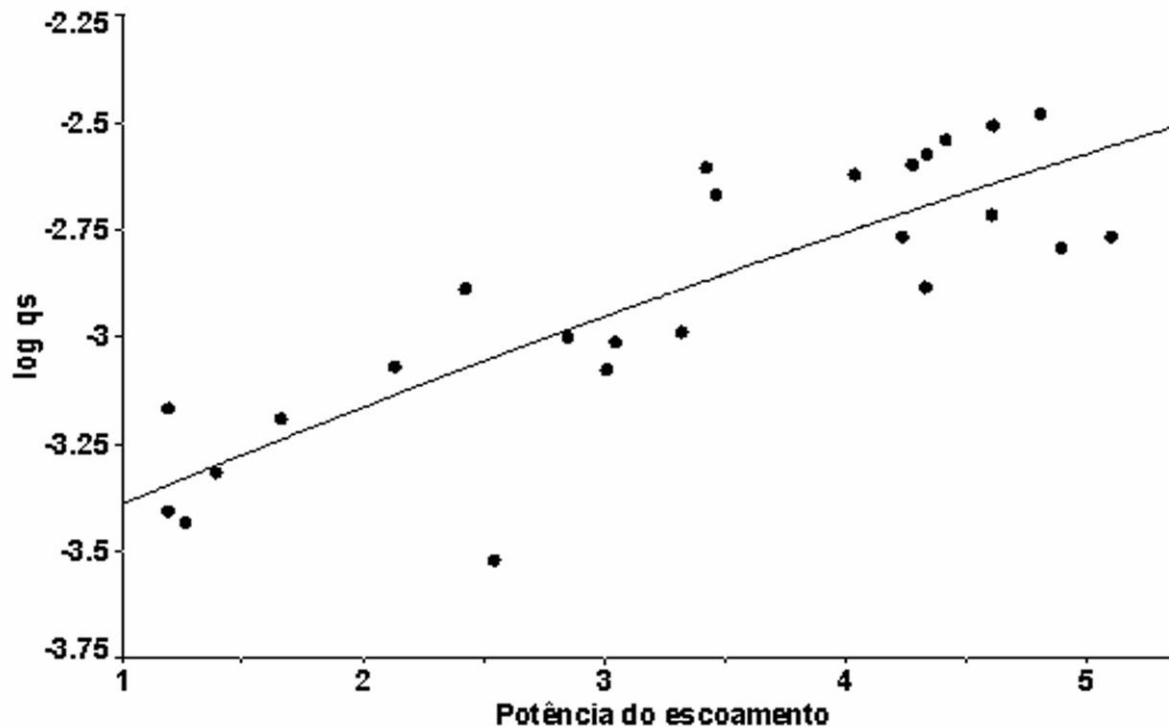


Figura 3. Representação da descarga sólida (kg s^{-1}) estimada pela potência do escoamento ($\Omega = \rho_w g S q$ em kg s^{-3}), para as vazões de 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min^{-1} , aplicadas em sulcos de erosão pré-formados em um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil.

Como pode ser verificada na tabela 2, a carga de sedimentos transportada pelos escoamentos gerados aumentou para as diferentes vazões, como também, os valores de transporte sólido observados e os valores estimados pelas equações de transporte de sedimentos.

Tabela 2. Carga de sedimentos observada e estimada, e avaliação do erro médio de estimativa da descarga sólida em (kg s^{-1}), através das equações utilizadas para as vazões de 17,5; 47; 60; 77 e 110 L min^{-1} , aplicadas em sulcos de erosão pré-formados em um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil.

Vazão aplicada	Carga de sedimentos observada	Du Boys	Shields	MP&M	Schoklitsch	E & H	E & B	Kalinske	Cantalice 2005	Eq. 23
$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	----- $\text{kg s}^{-1} (10^{-4})$ -----									
0,0003	5,2	4,6	3,5	0,08	35,2	6,7	0,42	6,2	6,0	5,3
0,0008	11,6	6,7	8,9	0,10	60,2	3,2	0,79	6,3	12,6	11,0
0,0010	18,1	6,8	12,6	0,11	69,3	2,5	0,89	5,7	12,8	16,0
0,0013	18,8	7,4	13,1	0,11	76,0	2,6	0,83	6,2	13,5	18,0

0,0018	26,2	7,8	10,5	0,11	76,8	2,7	0,68	6,2	11,6	23,0
----- Erro médio de estimativa (%) -----										
0,0003		11,60	32,95	98,29	584,24	31,01	91,92	20,78	17,29	38,72
0,0008		42,67	23,60	99,10	416,71	72,42	93,22	45,96	8,01	30,18
0,0010		62,24	30,11	99,40	283,20	86,34	95,05	68,63	29,04	15,25
0,0013		60,65	30,33	99,41	304,61	86,26	95,61	66,80	27,95	1,56
0,0018		70,36	59,80	99,58	193,33	89,74	97,40	76,27	55,56	11,24
Desvio médio		49,50	35,36	99,16	356,42	73,15	94,64	55,69	27,57	19,39

MP&M – Meyer-Peter & Muller; E & H – Engelund & Hansen; E & B - Einstein & Brow.

Observa-se, para as condições hidráulicas dos escoamentos gerados nos sulcos de erosão, que as equações de melhor ajuste, avaliadas através do erro médio de estimativa, foram as equações (23) ora ajustada, e a de Cantalice et al. (2005), que se baseia na potência de escoamento, com respectivos erros de estimativa de apenas 19,39 % e 27,57%.

Verifica-se que a equação 23 apresentou melhores estimativas de descarga sólida para as maiores descargas líquidas obtidas: 0,0010; 0,0013 e 0,0018 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, o que corresponde aos momentos em que se teve escoamentos mais estabilizados. As menores descargas líquidas (0,0003 e 0,0008 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), foram mais sujeitas à variação experimental de lâminas menores em sulcos pré-formados em solo utilizado pela atividade agrícola em condições de campo.

Em seguida vem as equações de Shields, Du Boys, Kalinske e Engelund-Hansen com bom a razoável desempenho de 35,36; 49,50, 55,69 e 73,15 % de erro médio, respectivamente. Em conjunto, essas equações baseiam-se no excesso de tensão cisalhante do escoamento, na turbulência do escoamento, e a de Engelund & Hasen em probabilidade.

A equação de Du Boys, fundamentada na tensão cisalhante do escoamento apresentou menor erro de estimativa para a menor vazão aplicada, o que pode estar relacionado à predominância de transporte por arraste no início do desenvolvimento dos sulcos obtidos.

As demais equações de Einstein-Brow e Meyer-Peter & Muller, também baseadas em princípios de probabilidade e tensão cisalhante do escoamento, respectivamente, não foram eficientes em descrever com precisão o comportamento

da carga de sedimentos sob aplicação de diferentes vazões. A equação de Shoklitsch apresentou um erro de estimativa muito elevado.

Assim, percebe-se, pelo menos para as condições de escoamento em sulcos de erosão, que algumas equações baseadas nos mesmos princípios ora realizaram boas e ruins estimativas de transporte de sedimentos. Para essas equações, o desempenho pode estar ligado as menores lâminas ensaiadas neste trabalho.

Para melhor compreensão e entendimento do comportamento do transporte de sedimentos nos sulcos de erosão estudados, a Figura 4 mostra a estimativa de cada curva de equação em relação a cada nível de vazão aplicado. Observa-se que as equações de pior desempenho erraram mais subestimando as descargas sólidas para as vazões maiores. Pode-se, também, perceber que equação (23), ora ajustada neste trabalho, distinguiu-se de todas as outras, pelo menor erro médio entre os valores de descarga sólida observados, e pelos menores erros dos valores estimados para as maiores descargas líquidas.

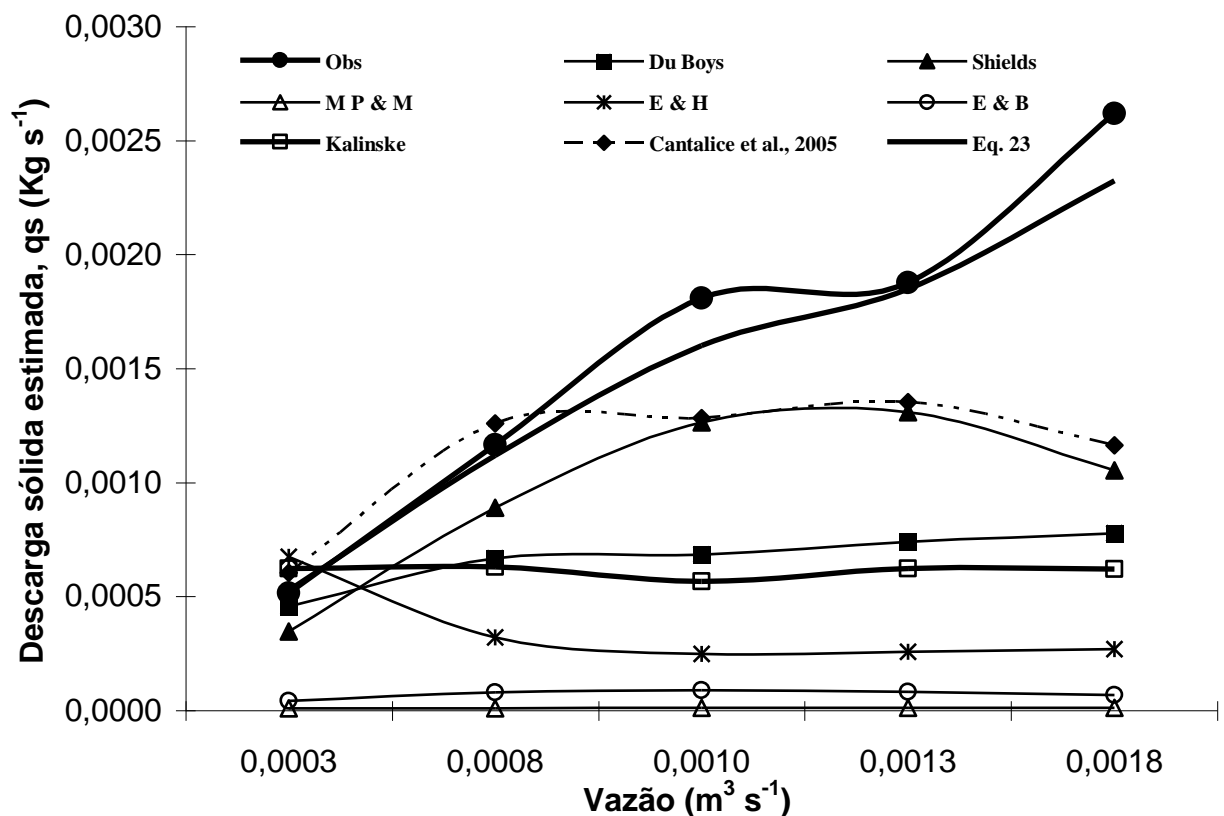


Figura 4. Valores de descarga sólida observada e estimada pelas equações de transporte sólido, para as vazões de 17,5; 47; 60; 77 e 110 $L min^{-1}$, aplicadas em sulcos de erosão pré-formados em um CAMBISSOLO do semi-árido do Brasil.

CONCLUSÕES

As condições experimentais dos escoamentos ensaiados sobre um CAMBISSOLO de Serra Talhada, semi-árido pernambucano, permitem concluir:

1. Os regimes de escoamento em todos os sulcos de erosão em condições de solo descoberto e recém-preparado ficaram na faixa de transição, indicando sulcos nas fases iniciais de desenvolvimento;
2. As equações baseadas na variável hidráulica da potência do escoamento, a ajustada neste trabalho e a equação de Cantalice et al. (2005), foram as mais eficientes na estimativa do transporte de sedimentos, em regime de escoamento de transição supercrítico;
3. A equação de Du Boys fundamentada na tensão cisalhante do escoamento apresentou menor erro de estimativa para a menor vazão ensaiada, indicando predominância de transporte por arraste no início do desenvolvimento dos sulcos;

LITERATURA CITADA

BAGNOLD, R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics. In: THIRNE, C.R.; MACARTHUR, R.C. & BRADLEY, J.B., eds. The physical of sediment transport by win and water. New York, American Society of Civil Engineers, p.231-291, 1988.

BARCELOS, A. A.; BOFFO, C. H.; BORGES, A. L. DE O.; BELLINASSO. T. B. Adequação de equações de transporte de sedimentos para estudos de erosão em meio coesivo. IN: Anais do VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Vitória, dezembro 2004. p.109-113.

BECHTELER, W.; FARBER, K. (1982). Stochastic model for particle movement in turbulent open channel flow. In: Proceedings of Euromech 156 / mechanics of sediment transport, Istanbul, p.106-171, 1982.

BRAIDA, J. A. ; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 20(1):127-134, 1996.

BRAYN, R.B. Processes and significance of rill development. *Catena*, Cremlingen-Destedt, supp. 8:1-15, 1987.

CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. DE O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 29(4):597-607, 2005.

CANTALICE, J. R. B. Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo. Porto Alegre, 2002. 141f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39:685-690, 2004.

FOSTER, G. R.; HUGGINS, L. F.; MEYER, L. D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relations. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 27(3):797-804, 1984.

GARCIA, E.P. Contribuição à previsão do transporte de sedimentos em canais a fundo fixo e móvel. Porto Alegre, 1983. 108f. (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

GOVERS, G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. *International Association of Hydrological Sciences*, Publication 189, 45-63, 1990.

GRAF, W.H. *Hydraulics of sediment transport*. USA. Water Resources Publications, LLC. 2ª ed. 1996. 513p.

HUANG, C.; WELLS, L.K.; NORTON, L.D. Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality. *Earth Surface Processes and Landforms*. 24:503-516, 1999.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; LAFLEN, J.M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:734-739, 1996.

JULIEN, P.Y. & SIMONS, D.B. Sediment transport capacity of overland flow. *Transaction of ASAE*. 28(3):755-762, 1985.

LEI, T.; NEARING, M. A.; HAGHIGHI, K.; BRALTS, V. F. Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. *Water Resources Research*, Washington, 34(11):3157-3168, 1998.

MACHADO, C.C.; GARCIA, A.R.; SILVA, E. FONTES, A. M. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water erosion prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. *Rev. Árvore*, 27(3):295-300, 2003.

NEARING, M.A.; NORTON, L.D.; BULGAKOV, D.A.; LARIONOV, G.A.; WEST, L.T.; & DANTSOVA, K.M. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, Washington, 33(4):865-876, 1997.

RAUWS, G. The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena Verlag*, Cremlingen-Destedt, suppl. n.8:1-15, 1987.

SLATTERY, M. C. & BRYAN, R. B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, 17:127-146, 1992.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste: Estado de Pernambuco. Recife, 1990. 363p. (Série Pluviométrica).

YANG, C.T. Sediment transport: theory na practice. New York, McGraw-Hill, 1996.
366p.

APÊNDICE

APÊNDICE 1. Declividade das parcelas do experimento de erosão em sulcos

Vazão	Bloco				
	I	II	III	IV	V
$L \text{ min}^{-1}$			$m \text{ m}^{-1}$		
17,5	0,07	0,06	0,06	0,08	0,05
47	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05
60	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
77	0,06	0,06	0,06	0,05	0,07
110	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06

APÊNDICE 2. Umidade gravimétrica do solo nos sulcos, antes dos testes

Vazão	prof.	Bloco				
		I	II	III	IV	V
L min ⁻¹	cm	kg kg ⁻¹				
17,5	0 -10	0,194	0,183	0,195	0,182	0,181
47	0 -10	0,202	0,195	0,201	0,182	0,188
60	0 -10	0,172	0,181	0,208	0,191	0,190
77	0 -10	0,175	0,186	0,184	0,179	0,192
110	0 -10	0,185	0,169	0,175	0,185	0,179

APÊNDICE 3. Tamanho médio dos sedimentos, dado pelo d_{50} oriundos da erosão em sulcos em função da vazão aplicada

Vazão L min ⁻¹	Bloco				
	I	II	III	IV	V
17,5	0,1201	0,0981	0,1023	0,1107	0,1070
47	0,0930	0,1575	0,1470	0,1260	0,1084
60	0,1130	0,1110	0,1505	0,1055	0,0962
77	0,1338	0,1037	0,1260	0,1318	0,1260
110	0,1220	0,1506	0,1555	0,1410	0,1445

APÊNDICE 4. Área, perímetro molhado e raio hidráulico da seção transversal dos sulcos

Vazão	Bloco	Área	Perímetro molhado	Raio hidráulico
L min ⁻¹		m ²	m	m
17,5	I	0,0003	0,1375	0,0020
	II	0,0003	0,1361	0,0020
	III	0,0003	0,1345	0,0019
	IV	0,0003	0,1388	0,0020
	V	0,0003	0,1394	0,0020
47	I	0,0004	0,1649	0,0024
	II	0,0004	0,1700	0,0025
	III	0,0004	0,1726	0,0025
	IV	0,0004	0,1719	0,0025
	V	0,0004	0,1733	0,0025
60	I	0,0005	0,1853	0,0027
	II	0,0005	0,1889	0,0028
	III	0,0005	0,1884	0,0028
	IV	0,0004	0,1729	0,0025
	V	0,0005	0,1801	0,0026
77	I	0,0004	0,1670	0,0024
	II	0,0006	0,1950	0,0029
	III	0,0005	0,1894	0,0028
	IV	0,0005	0,1825	0,0027
	V	0,0005	0,1860	0,0027
110	I	0,0006	0,2048	0,0030
	II	0,0006	0,1909	0,0028
	III	0,0006	0,1935	0,0029
	IV	0,0005	0,1875	0,0028
	V	0,0006	0,1900	0,0028

APÊNDICE 5. Valores médios de características hidráulicas do escoamento nos sulcos experimentais em solo recém preparado, determinados durante 20 minutos de aplicação de vazões.

Vazão	Descarga Líquida Q L S ⁻¹	Velocidade média V m s ⁻¹	Conc. de sedimentos CS kg kg ⁻¹	Número de Reynolds R _e adm.	Número de Froude F _r adm.	Veloc. De Cisalhamento U _* m s ⁻¹	Reynolds Partículas d ₅₀ adm.	Desagregação do solo D _r kg m ⁻² s ⁻¹	Rugosidade de Manning n S m ^{-1/3}	Tensão Crítica cisalhamento τ _c Pa	Perda de solo PS kg m ⁻²
17,5 L min⁻¹											
R1	0,2993	0,4904	0,0022	1100,0	2,39	0,036	4,86	0,0010	0,0082	1,27	118,0
R2	0,2840	0,4867	0,0018	1098,6	2,41	0,035	3,91	0,0008	0,0080	1,19	92,4
R3	0,2687	0,4826	0,0017	1037,4	2,02	0,034	3,87	0,0007	0,0079	1,16	84,9
R4	0,3127	0,4936	0,0025	1190,1	2,38	0,038	5,14	0,0011	0,0088	1,48	136,0
R5	0,3200	0,4953	0,0025	1200,3	2,38	0,032	4,19	0,0012	0,0074	1,05	138,2
MÉDIA	0,2969	0,4897	0,0022	1125,3	2,32	0,035	4,39	0,0009	0,0081	1,23	113,9
47 L min⁻¹											
R1	0,7300	0,5591	0,0005	1676,3	1,81	0,037	4,32	0,0004	0,0078	1,39	50,9
R2	0,7765	0,5715	0,0012	1715,6	2,67	0,040	7,67	0,0012	0,0083	1,62	126,8
R3	0,8012	0,5777	0,0012	1762,2	2,65	0,040	7,09	0,0013	0,0081	1,60	131,0
R4	0,7993	0,5761	0,0020	1750,0	2,65	0,038	5,86	0,0021	0,0079	1,48	225,9
R5	0,8001	0,5794	0,0011	1667,5	2,64	0,037	4,53	0,0012	0,0075	1,35	120,4
MÉDIA	0,7814	0,5728	0,0012	1714,3	2,48	0,039	5,89	0,0012	0,0079	1,49	131,0
60 L min⁻¹											
R1	1,0025	0,6080	0,0017	1975,2	2,55	0,043	5,63	0,0023	0,0084	1,81	199,8
R2	0,9936	0,6165	0,0013	2044,8	2,52	0,040	5,25	0,0020	0,0077	1,58	150,1
R3	1,0201	0,6155	0,0019	2036,3	2,52	0,039	6,98	0,0028	0,0076	1,51	217,6
R4	0,9200	0,5785	0,0016	1718,6	2,12	0,034	4,22	0,0017	0,0069	1,16	204,2
R5	1,0233	0,5952	0,0018	1860,5	2,60	0,038	4,24	0,0024	0,0075	1,41	229,2
MÉDIA	0,9919	0,6027	0,0017	1927,1	2,46	0,039	5,26	0,0023	0,0076	1,49	200,2

APÊNDICE 5. Continuação...

Vazão	Descarga Líquida Q L S ⁻¹	Velocidade média V m s ⁻¹	Conc. de sedimentos CS kg kg ⁻¹	Número de Reynolds R _e adm.	Número de Froude F _r adm.	Veloc. De Cisalhamento U. m s ⁻¹	Reynolds Partículas d ₅₀ adm.	Desagregação do solo D _r kg m ⁻² s ⁻¹	Rugosidade de Manning n S m ^{-1/3}	Tensão Crítica cisalhamento τ _c Pa	Perda de solo PS kg m ⁻²
77 L min⁻¹											
R1	1,2865	0,5642	0,0013	1682,0	2,69	0,036	5,97	0,0012	0,0076	1,33	253,5
R2	1,2669	0,6309	0,0011	2165,8	2,78	0,041	5,04	0,0019	0,0078	1,66	150,2
R3	1,2901	0,6178	0,0010	1992,6	2,82	0,040	5,82	0,0015	0,0078	1,60	147,6
R4	1,2369	0,6015	0,0025	1922,9	2,30	0,037	5,88	0,0033	0,0074	1,40	380,3
R5	1,2779	0,6099	0,0027	1990,2	2,03	0,042	6,35	0,0038	0,0083	1,79	402,8
MÉDIA	1,2717	0,6049	0,0017	1950,7	2,53	0,039	5,81	0,0023	0,0078	1,56	266,9
110 L min⁻¹											
R1	1,8523	0,6537	0,0017	2253,4	2,41	0,038	5,22	0,0036	0,0070	1,42	308,4
R2	1,7558	0,6212	0,0021	1984,8	2,51	0,040	6,83	0,0032	0,0077	1,60	405,0
R3	1,8965	0,6273	0,0013	2103,6	2,49	0,042	7,69	0,0022	0,0081	1,77	274,9
R4	1,7239	0,6134	0,0023	1922,8	2,53	0,040	6,45	0,0034	0,0079	1,63	461,3
R5	1,7025	0,6191	0,0021	1893,0	2,51	0,040	6,28	0,0033	0,0077	1,59	405,9
MÉDIA	1,7862	0,6270	0,0019	2031,5	2,49	0,040	6,50	0,0031	0,0077	1,60	371,1

V I T A



Sandro Augusto Bezerra, filho de Severino Maurício Bezerra e Maria do Socorro Bezerra, nascido no décimo primeiro dia do mês de junho do ano de mil novecentos e setenta e sete, é natural da cidade do Recife capital do estado de Pernambuco. Residente na cidade de Paulista desde os sete anos de idade, ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural de Pernambuco no ano de mil novecentos e noventa e cinco, tendo concluído o referido curso em fevereiro de dois mil e um. Iniciou o curso de Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo na mesma instituição em dois mil e um, que foi concluído no ano de dois mil e três. No mesmo ano entrou para o curso de Doutorado ainda na UFRPE. Casou-se com Patrícia Regina Bezerra dos Santos no décimo dia do mês de setembro de dois mil e cinco. Com quem teve seu primeiro filho, Victor Augusto Bezerra dos Santos, no décimo terceiro dia do mês de Janeiro de dois mil e sete. E no mesmo ano concluiu o curso de Doutorado em Ciência do Solo, sob orientação do Dr. José Ramon Barros Cantalice.