

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PERDAS DE SEDIMENTOS POR EROÇÃO DE UMA ÁREA
CITRÍCOLA DA REGIÃO DE BEBEDOURO, SP.**

Gilmar Ely Cerquetani

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PERDAS DE SEDIMENTOS POR EROSÃO DE UMA ÁREA
CITRÍCOLA DA REGIÃO DE BEBEDOURO, SP.**

Gilmar Ely Cerquetani

Orientador: Prof.Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Novembro de 2004

C416p Cerquetani, Gilmar Ely
Perdas de sedimentos por erosão de uma área citrícola da região de Bebedouro, SP. Gilmar Ely Cerquetani. -- Jaboticabal, 2004
xiii, 50 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2004
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho
Banca examinadora: Gener Tadeu Pereira, Isabella Clerici de Maria
Bibliografia

1. Erosão. 2. Modelagem. 3. Equação de Yalin. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.459

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

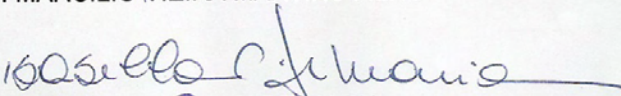
TÍTULO: PERDAS DE SEDIMENTOS POR EROÇÃO DE UMA ÁREA CITRÍCOLA DA REGIÃO DE BEBEDOURO, SP.

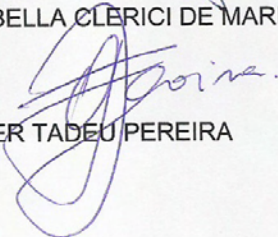
AUTOR: GILMAR ELY CERQUETANI

ORIENTADOR: Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

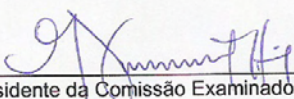
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO) pela Comissão Examinadora:


Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO


Dra. ISABELLA CLÉRICI DE MARIA


Dr. GENER TADEU PEREIRA

Data da realização: 30 de novembro de 2004.


Presidente da Comissão Examinadora
Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

EPÍGRAFE

*Em cada semente que plantamos,
em cada palavra que ecoamos,
em cada gesto e postura
diante de situações, nos revelamos.*

*Nunca sabemos o que cada curva da vida nos
reserva.*

*Sabemos sim, que de todas as experiências,
sejam elas positivas ou negativas,
nos revelam sempre um crescimento,*

*E assim somos impulsionados a galgarmos os degraus
da vida, emitindo e recebendo mensagens a todo momento.
Tendo como consequência somente o crescimento.*

Zaine

Ao meu pai

Walter Cerquetani (in memorian), o qual cumpriu e ainda cumpre, em meu coração, o papel de pai, que muitas vezes deixou de fazer por si, para fazer pelos filhos. Obrigado pelo apoio e confiança que sempre dedicou e ainda continua a dedicar.

Com amor e muita saudade dedico...

À minha mãe

Laurinda de Oliveira Cerquetani, que sempre me incentivou e ensinou lições de vida. Sempre batalhou em todos os sentidos para que eu pudesse caminhar até aqui.

Com muito amor e orgulho dedico...

Ao meu avô

Manuel (in memorian), pelo exemplo de força e vida que deixou a todos.....

Agradecimento Especial Ao Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho pela orientação, compreensão e amizade que demonstrou durante nosso convívio, por quem tenho muita gratidão e respeito.

À minha esposa **Zaine El Kadri Cerquetani**:

Que durante o desenvolvimento desse trabalho teve a difícil tarefa de cuidar praticamente sozinha dos meus filhos Amyr (7), Lara (6) e Breno (1). Que me incentivou, deu forças e foi compreensiva.

Com amor e carinho ofereço...

Às minhas irmãs:

Maria Lúcia Cerquetani e Mara Silivia Cerquetani, que foram muito importantes na minha vida, pelo companheirismo, amizade e incentivo.

Com carinho ofereço...

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mostrar-me sempre o melhor caminho, pela força nos momentos difíceis, por acrescentar pessoas maravilhosas em minha vida, por tudo que conquistei e pretendo ainda conquistar, e pela fé – que move e anima nossas vidas para que sempre estejamos aptos a enfrentar novos desafios e compromisso.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias do Campus de Jaboticabal – UNESP, através do Departamento de Solos e Adubos, o qual possibilitou a realização do presente trabalho.

À Coinbra-Frutesp Agroindustrial Ltda – em especial, Sr. Henrique Americano Carvalho de Freitas, pelo incentivo e apoio.

Aos meus colegas Rosa Maria Christiano Melo, Hélio de Rezende Triboni, Fernando Alvarinho Delgado, Carlos Dinei Costa, pela colaboração e amizade.

Ao meu amigo Renato João Marchi, pela força e incentivo.

À banca examinadora pelo carinho, conselhos e paciência.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMO | vi |
| SUMMARY..... | vii |
| CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 01 |
| REFERÊNCIAS..... | 07 |
| CAPÍTULO 2 - EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O TRANSPORTE DE SEDIMENTO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO..... | 12 |
| RESUMO..... | 12 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 16 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 21 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 25 |
| 5. REFERÊNCIAS..... | 25 |
| CAPÍTULO 3 - PERDAS DE SOLO E ÁGUA POR EROSÃO SOB CHUVA ARTIFICIAL EM POMAR CITRÍCOLA SUBMETIDO AO USO DE GRADE EM BEBEDOURO, SP..... | 29 |
| RESUMO | 29 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 29 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 31 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 36 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 40 |
| 5. REFERÊNCIAS..... | 41 |
| APÊNDICE | 44 |

PERDAS DE SEDIMENTOS POR EROSÃO DE UMA ÁREA CITRÍCOLA DA REGIÃO DE BEBEDOURO, SP.

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma rotina computacional para solução da equação de Yalin e do diagrama de Shields e estabelecer uma equação simplificada para modelar a capacidade de transporte de sedimento (T_c). A capacidade de transporte de sedimento pelo fluxo superficial foi representada como uma função potência da tensão cisalhante, a qual revelou ser uma aproximação da equação de Yalin. Esta metodologia simplificada pôde ser aplicada em resultados experimentais oriundos de uma topografia complexa. A equação foi calibrada utilizando-se a tensão cisalhante. Testes de validação com dados independentes demonstraram que a equação foi eficiente para estimar T_c .

PALAVRAS-CHAVE: erosão, modelagem, equação de Yalin

SEDIMENT YIELD BY WATER EROSION OF LATOSOLS FROM BEBEDOURO SÃO PAULO STATE

SUMMARY: The objective of the present work was development a routine computational in the solution of the Yalin equation and Shield diagram and to determine a simplified equation for modeling sediment transport capacity. Sediment transport capacity for shallow overland flow was represented as power function of the shear stress hydraulic and an approximation to the yalin equation for sediment transport capacity. The simplified for sediment transport applies to complex topografhy characteristics. The simplified equation accurately aproximated the yalin equation when calibrated using the average of the hydraulic shear stresses. Validation of independent predicted by the simplified equation showed that the equation had a good performance in predicting sediment transport capacity.

KEYWORDS: erosion, modeling, Yalin equation

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A agricultura brasileira vem batendo recordes de produção, em função da tecnologia aplicada no processo de produção de alimentos. Dentre estas tecnologias incluem-se: o uso de máquinas agrícolas cada vez mais aperfeiçoadas; a produção de sementes de alta qualidade; a aplicação de fertilizantes, corretivos e produtos químicos; a engenharia genética; o controle biológico; a irrigação e a drenagem. Há, neste contexto, por parte de setores organizados da sociedade brasileira, uma preocupação importante e louvável com os impactos ambientais relativos ao uso e manejo dos solos agrícolas e das citadas tecnologias.

Tal preocupação justifica-se por sistemas de cultivo do solo, nos quais o uso excessivo de grades no seu preparo, reconhecidamente causam a desestruturação da sua camada arável. O uso de grades é uma prática comum em muitos pomares citrícolas do Estado de São Paulo, o qual invariavelmente favorece a manifestação do processo que mais degrada o solo: a erosão.

A erosão do solo é um problema socio-econômico importante e fator essencial na avaliação de ecossistemas saudáveis e funcionais (CHMELOVÁ & SARAPATKA, 2002). Ela é um dos principais responsáveis pelo decréscimo da produtividade agrícola, provocando perdas de solo água e nutrientes (SCHAEFER et al., 2002). Segundo NOWAK et al. (1985), a redução da produtividade pela erosão do solo ocorre devido a:

- 1) perdas de nutrientes das plantas, através de íons em solução ou adsorvidos às partículas de solo;
- 2) perdas de matéria orgânica pela quebra da estabilidade estrutural;
- 3) degradação da estrutura superficial do solo inibindo a emergência de plantas e a penetração de raízes e, ainda, diminuindo a disponibilidade de água, por causa da menor capacidade de infiltração e retenção de água no solo.

A redução nos níveis de matéria orgânica na camada superficial, segundo CANNELL & HAWES (1994), é uma das principais causas da desestruturação física e biológica do solo, afetando o processo de infiltração, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Todo o controle do processo de erosão inicia-se essencialmente no planejamento de uso e manejo do solo e da água. Segundo CHMELOVÁ & SARAPATKA (2002), estimativas de erosão são essenciais em questões relativas ao uso do solo e da água tais como o transporte de sedimentos e a deposição deles em terras baixas, reservatórios, estuários e em sistemas de irrigação e hidroponia.

Segundo HERNANI et al. (1999), a erosão do solo provoca conseqüências fora das áreas de plantio que muitas vezes são ignoradas nas avaliações econômicas. Tais conseqüências relacionam-se com a contaminação e poluição de aquíferos por transporte de produtos químicos e dejetos animais oriundos de áreas rurais e, ainda, a sedimentação dos cursos e reservatórios de água, o que pode impor pesados custos à comunidade em muitos locais. Apesar de ser difícil a quantificação dos danos causados ao meio ambiente, os nutrientes e agrotóxicos chegam aos rios pelas enxurradas, a qual se constitui numa das maiores fontes de poluição da água afetando o equilíbrio deste ecossistema (SORRENSON e MONTOYA, 1989).

O processo contínuo de transporte de sedimentos erodidos pela água provoca redução na capacidade de escoamento dos rios e canais por assoreamento, aumenta os riscos de alagamento e reduz a vida útil de reservatórios (LANZER & MATTUELLA, 1988; CANNELL & HAWES, 1994).

A erosão do solo é um processo iterativo e natural, influenciado por fatores naturais e culturais: precipitação, relevo, propriedades geológicas e do solo, cobertura vegetal e uso da terra (CHMELOVÁ & SARAPATKA, 2002). Frequentemente, com a intervenção do homem no meio ambiente este fenômeno natural dá origem ao que se denomina erosão acelerada. A erosão acelerada do solo é um problema global e, apesar das dificuldades para a sua determinação ou estimativa com relativa precisão das perdas de solo, sabe-se que a magnitude destas perdas têm causado sérias conseqüências econômicas e ambientais em diversos países (LAL, 1988).

A perda por erosão pode ser definida como a quantia de solo perdido por uma área num específico período de tempo, a qual pode ser expressa por exemplo em $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ou $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ (CHMELOVÁ & SARAPATKA, 2002). Já a produção de sedimento pode ser entendida como a quantidade de sedimento que deriva de uma área específica

num dado período de tempo. Ela pode ser expressa em massa total (kg), massa por unidade de largura (kg m^{-1}) ou massa por unidade de área (kg m^{-2}).

Segundo POLYAKOV & NEARING (2003), o entendimento do processo de erosão e o desenvolvimento de modelos confiáveis requerem o entendimento da desagregação, deposição e transporte de sedimentos.

A desagregação provocada pelo impacto das gotas da chuva e o transporte por um fino fluxo superficial constituem a fase mais importante do processo de erosão (ELLISON, 1947; HUDSON, 1981; MARTINS FILHO, 1999; IZIDORIO, 2004). Nos locais onde o impacto da gota de chuva é o fator responsável pela desagregação das partículas da massa do solo, o processo erosivo tem sido designado por erosão em entressulcos (FOSTER, 1982). Nos entressulcos o impacto pode desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, que exercem forças de compressão e cisalhamento no ponto do impacto (CASSOL & LIMA, 2003). Nos entressulcos o transporte das partículas desagregadas é realizado, quase exclusivamente, pelo fluxo laminar raso, o qual é auxiliado em muito pela turbulência produzida pelo impacto das gotas de chuva, conduzindo e mantendo suspensas as partículas de solo (CASSOL & LIMA, 2003).

Nos locais em que as feições da paisagem devido à topografia, rugosidade do solo, marcas ou traços de equipamentos de cultivo ou, também, da erosão pretérita favorecem o fluxo concentrado de água ocorre a erosão em sulcos (FOSTER, 1982; MARTINS FILHO, 1999). No processo de erosão em sulcos a desagregação, o transporte e a deposição de sedimentos é dependente das características hidráulicas do fluxo e da sua capacidade de transporte de sedimentos (LEI et al., 2001). A capacidade de transporte de sedimentos é conceitualmente um balanço entre a taxa de sedimento em deposição e aquela de sedimento desagregado no leito do canal (LEI et al., 2001).

Através da avaliação do processo de erosão em entressulcos, em sulcos ou em conjunto (entressulcos + sulcos), estratégias podem ser elaboradas para evitar o desperdício no uso de insumos agrícolas, controlar e minimizar impactos ambientais como a erosão e a eutrofização dos corpos d'água (NEARING et al., 2001). Para tal

intuito é necessário a possibilidade de prever ou estimar a erosão de modo confiável, o que torna a modelagem do processo de erosão um ponto crucial e fundamental neste contexto.

A modelagem do processo de erosão nada mais é do que uma descrição matemática da desagregação, do transporte e da deposição de sedimentos. Segundo CHMELOVÁ & SARAPATKA (2002) há três razões para modelar o processo de erosão:

1) modelos de erosão podem ser utilizados como ferramentas preditivas para acessar perdas de solo para planejamentos conservacionistas, projetos, inventários de erosão e regulamentação;

2) modelos de concepção física podem prever onde e quando a erosão irá ocorrer, colaborando com o planejador na condução de esforços para reduzir o processo erosivo do solo; e

3) modelos podem ser utilizados como ferramentas de entendimento do processo erosivo e suas interações e, ainda, para estabelecer prioridades.

Um dos modelos mais conhecidos e utilizados até hoje, como método de estimativa da erosão, é a equação universal de perdas de solo (USLE). A USLE é um modelo paramétrico empírico proposto por WISCHMEIER & SMITH (1978) como:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

em que,

A - perda de solo por unidade de área, $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;

R - erosividade da chuva, $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;

K - erodibilidade do solo, $t \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha h}$;

LS - fator para o efeito combinado do declive e do comprimento da rampa;

C - fator cobertura e manejo do solo; e

P - fator práticas conservacionistas.

A USLE pode ser utilizada na adequação do planejamento conservacionista de uma área agrícola e, também, para a predição de fontes não pontuais de perdas de sedimento em programas de controle da poluição (RANIERI et al., 2002). Segundo

LANE et al. (1992) é uma tecnologia de simples entendimento e fácil aplicação no direcionamento das práticas de conservação do solo e no planejamento do uso da terra. Deste modo, pode ser utilizada para diversas finalidades: 1) previsão das perdas anuais médias de solo, numa área com determinados sistemas de práticas de utilização e manejo; 2) previsão de alterações nas perdas de solo ocasionadas devido a mudanças no uso, nas práticas de cultivo e de conservação do solo; 3) avaliação de métodos de aplicação ou alteração das práticas agrícolas que permitam usos mais intensivos da terra; 4) estimar as perdas de solo para diversos fins na agricultura e meio ambiente; e 5) validar as recomendações de práticas conservacionistas.

RANIERI et al. (2002) relatou algumas limitações para o uso da USLE, tais como: 1) a necessidade de se trabalhar com áreas relativamente homogêneas com relação a solo, uso da terra e declividade; 2) o fato da equação deixar implícitos diversos parâmetros e seus efeitos; 3) o fato dos cálculos para o fator C serem válidos para condições específicas de cada região; 4) a não consideração da deposição de sedimentos; 5) a não possibilidade de estimar a erosão em sulcos.

De MARIA & DECHEN (1997), no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em parcelas unitárias, observaram que a USLE superestima os valores de perda de solo, indicando a necessidade de revisão dos parâmetros da equação. O mesmo resultado foi obtido numa bacia hidrográfica por JOHNSON (1988).

A USLE tem sido, no Brasil, o modelo mais empregado em estimativas da erosão, mesmo em face às suas limitações.

No ano de 1990, a USLE foi revisada e computadorizada originando a chamada revisão da equação universal de perdas de solo (RUSLE). Os parâmetros da RUSLE são basicamente os mesmos da USLE, mas esta calcula e corrige o fator R para refletir locais planos. Ela também apresenta novas equações para o cálculo do LS e determina o fator C de acordo com o proposto por RENARD et al. (1994).

Dada as limitações da USLE e/ou RUSLE, LAFLEN et al. (1991) comentaram sobre a necessidade do desenvolvimento de uma nova técnica para estimar as perdas de solo por erosão. A partir de então, esforços foram realizados por pesquisadores nos EUA para gerar um novo modelo de predição da erosão. Foi proposto, então, um

modelo de representação do processo de erosão com fundamentação física, o qual foi designado WEPP – **Water Erosion Prediction Project** (NEARING et al., 1989).

O WEPP é um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão em entressulcos e em sulcos (LANE et al., 1992). O WEPP permite a simulação dos processos que ocorrem em determinada área, como uma função das condições atuais de clima, solo, cobertura vegetal e resíduos culturais. O WEPP oferece diversas aplicações além das apresentadas pela USLE (LANE et al., 1992; RANIERI, 2000): 1) localização do desalojamento de sedimentos em encostas, tanto para eventos isolados de precipitação quanto para valores médios anuais; (2) avaliação dos diversos sistemas de produção agrícola; (3) estudo do efeito da rugosidade do terreno na distribuição dos sedimentos; (4) possibilidade de avaliar em tempo real a estimativa da erosão num dado local, o que constitui uma das principais vantagens do WEPP para planejamento.

Com o WEPP é possível responder diversas questões, dentre elas (LAFLEN & FLANAGAN, 1992; RANIERI et al., 2002): (1) qual o melhor manejo do solo para um controle eficiente da erosão; (2) em que local da encosta poderão ser instaladas práticas permanentes para determinada condição de clima, solo e topografia; (3) qual será o impacto da conservação do solo fora da propriedade agrícola, isto é, impactos ambientais (sedimentação dos cursos d'água e reservatórios). Segundo RANIERI et al. (2002), este último aspecto pode ser considerado como um grande avanço que pode impulsionar o início de uma nova visão com relação aos objetivos da conservação do solo. Isto permitirá que as tomadas de decisões, em nível de planejamento, considerem não somente os efeitos da erosão na produção agrícola, mas também na qualidade da água superficial.

Contudo, a aplicação confiável do WEPP, no Brasil, requer a condução de pesquisas que permitam gerar as informações mínimas necessárias para o uso do modelo, como exemplo as erodibilidades em entressulcos e em sulcos. Devido a importância do processo de erosão em sulcos, em áreas agrícolas e declivosas, grande atenção tem sido dada para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos. Este processo de erosão é conceitualmente uma função da capacidade de desagregação e da capacidade de transporte de sedimentos pelo fluxo. O WEPP usa a

equação da continuidade aplicada ao transporte de sedimento num estado de equilíbrio dinâmico. Deste modo, é fundamental a condução de pesquisas que tenham por objetivo determinar e propor métodos para estimar a capacidade de transporte de sedimentos.

Sendo assim, os principais objetivos do presente trabalho foram: 1) estabelecer uma rotina para solução da equação de Yalin e do diagrama de Shields e equação simplificada para determinação da capacidade de transporte de sedimentos e validá-la ; 2) utilizar o método simplificado para explicar processo erosivo estabelecido em pomar citrícola submetido ao uso de grade sob condições de chuva simulada.

REFERÊNCIAS

CANNELL, R. Q.; HAWES, J.D. Trends in Tillage Practices in Relation to Sustainable Crop Production with Special Reference to Temperate Climates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, n.30, v.2-4, p.245-282, 1994.

CASSOL, E.A.; LIMA, V.S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.1, p.117-124, 2003.

CHMELOVÁ, R. ; SARAPATKA, BORIVOJ. Soil erosion by water: contemporary reaserch methods and their use. **Geographica**, Olomuc, v.37., n.1, p.23-30, 2002.

De MARIA, I.C.; DECHEN, S.C.F. Comparação de modelos de predição de erosão utilizando dados obtidos em parcelas experimentais com cobertura artificial, em Latossolo Roxo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro, 1997. **Resumos**. Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 401p.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v.28, n.1, p.197-201, Jan. 1947.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p.296-380. (ASAE. Monograph, 5)

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA W.M. Sistema de manejo de solos e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1 ,p. 145-54,1999.

HUDSON, N. **Soil conservation**. 2.ed. Ithaca, Cornell University Press, 1981. 324p.

IZIDORIO, R. **Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial num latossolo vermelho sob cultivo de cana de açúcar**. 2004. 44f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

JOHNSON, R. Putting soil movement into perspective. **Journal of Production Agriculture**, v.1, n.1, p.5-12, 1988.

LAFLEN, J.M.; FLANAGAN, D.C. A powerful tool. **Agricultural Engineering**, v.73, n.4, p.28-29, 1992.

LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. WEPP: a new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, n.1, p.34-38, Jan./Feb. 1991.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: LAL, R. (Ed), **Soil erosion research methods**. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA, p.16, 1988.

LAL, R. Soil degradation in the tropics. In: SEGHAL, J.; BLUM, W.E.; GAJBHIYE, K.S. **Managing red and lateritic soils for sustainable agriculture**. Rotterdam: Balkema, 1998. p.237-252.

LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M. Development and application of modern soil erosion prediction technology. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, n.6, p.893-912, 1992.

LANZER, E.A.; MATTUELLA, J.L. **A economia da conservação de um recurso natural : O Solo agrícola no Sul do Brasil**. INPES/IPEA, 1988. 106p.

LEI, T.W. ; ZHANG, Q. ; ZHAO, J. ; TANG, Z. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.44 n.6, p. 1537-1542, 2001

MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão em sulcos em latossolos de Jaboticabal-SP**. 1999. 140f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

NEARING, M.A.; NORTON, D.L., ZHANG, X., Soil erosion and sedimentation. In: RITTER, W.F. and SHIRMOHAMMADI, A. (Eds.). **Agricultural nonpoint source pollution**. Lewis Publishers, Boca Raton, p.29-58, 2001.

NEARING, M.A. ; FOSTER, G.R. ; LANE, L. J. ; FINKNER, S.C. A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.5, p. 1587-1593, Sept./Oct. 1989.

NOWAK, P.J.; TIMMONS, J.; CARLSON, J.; MILES, R. Economics and soil perspectives on T values relative to soil erosion and crop productivity. IN: STEWART, A.; FOLLET, R. F.

(Ed.). **Soil erosion and crop productivity**. American Society of Agronomy, Madison, p.119-132, 1985.

POLIAKOV, V.O.. ; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1 , p33-43, 2003

RANIERI, S.B.L.; VAN LIER, Q.J.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D.C. Erosion database interface (EDI): a computer program for georeferenced application of erosion prediction models. **Computers & Geosciences**, Amsterdam, v.28, n.5, p.661-668, 2002.

RANIERI, S.B.L. **Estimativa da erosão do solo em uma bacia hidrografica no municipio de Piracicaba (SP) utilizando os modelos USLI e WEPP**. 2000. 95f. Tese (Doutorado – Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

RENARD, K. G., FOSTER, G. YODER, D. ET MCCOOL, D.: RUSLE revisited: status, questions, answers and future. **Journal of Soil and Water Conservation**, Arkeny, v.49, n.1., p.213-220, 1994.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SORRENSON, W.J.; MONTOYA, L.J. Implicações Econômicas da Erosão do Solo e do Uso de Algumas Práticas Conservacionistas no Paraná. IAPAR, **Boletim Técnico**, n. 21. Londrina, 1989. 110p.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (USDA. Handbook, 537).

CAPÍTULO 2 - EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma rotina computacional para solução da equação de Yalin e do diagrama de Shields e testar uma equação simplificada para modelar a capacidade de transporte de sedimento (T_c). A capacidade de transporte de sedimento para o fluxo superficial foi representada como uma função potência da tensão cisalhante, a qual revelou ser uma aproximação da equação de Yalin. Esta equação simplificada pôde ser aplicada em resultados experimentais oriundos de uma topografia complexa. A equação foi calibrada utilizando-se a tensão cisalhante e a apropriada correção do declive. Testes de validação com dados independentes demonstraram que a equação simplificada foi eficiente para estimar T_c .

PALAVRAS-CHAVE: erosão, modelagem, equação de Yalin

1. INTRODUÇÃO

Diversos modelos de predição da erosão hídrica do solo utilizam a equação da continuidade aplicado ao transporte de sedimentos. Um exemplo, é o WEPP – **Water Erosion Prediction Project**. A erosão do solo no WEPP é descrita em termos dos processos de erosão em entressulcos e em sulcos, considerando-se o desalojamento, a deposição, a tensão cisalhante, o escoamento nas áreas entressulcos e em sulcos, e a capacidade do fluxo de água transportar sedimentos (NEARING et al., 1989):

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = D_f + D_i \quad (1)$$

em que,

∂q_s - taxa de transporte de sedimento por unidade de largura ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$);

∂x - comprimento do declive;

D_f - taxa de erosão em sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$);

D_i - taxa de erosão em entressulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$).

As taxas de erosão em entressulcos e em sulcos

$$D_i = C_i K_i I^2 S_f G_e (R_s/w) \quad (2)$$

$$D_f = C_r K_r (\tau - \tau_{cr}) (1 - G/T_c) \quad (3)$$

em que,

G - carga de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$);

C_i - parâmetro de cobertura do dossel nos entressulcos (adimensional);

K_i - parâmetro erodibilidade do solo entressulcos ($\text{kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$);

I - intensidade de chuva (m s^{-1});

S_f - fator declividade do entressulcos (adimensional);

G_e - cobertura efetiva da superfície do solo (adimensional);

R_s - espaçamento entre os sulcos (m);

w - largura dos sulcos (m);

C_r - parâmetro cobertura dos sulcos (adimensional);

K_r - erodibilidade do solo dos sulcos (s m^{-1});

τ - tensão cisalhante (Pa);

τ_{cr} - tensão cisalhante crítica (Pa); e

T_c - capacidade de transporte do escoamento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

A equação 2 descreve a erosão entressulcos, a qual decorre da desagregação das partículas do solo pelo impacto das gotas d'água e que são transportadas para os sulcos. Já a equação 3 descreve a taxa de erosão do solo desagregado nos sulcos pela ação conjunta do escoamento e tensão cisalhante exercida pelo fluxo concentrado de enxurrada.

Segundo LU et al. (2001), caso D_i possa ser considerada muito pequena, a equação (1) seria:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = D_f \quad (4)$$

Considerando-se o não efeito de cobertura em sulcos ($C_r = 1$), a equação 3 pode ser reescrita como:

$$D_f = K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (5)$$

O termo $1 - G/T_c$, na equação 5, representa um balanço da desagregação/deposição no decorrer de um evento demonstrando que a taxa de erosão em sulcos é uma função da carga de sedimentos em relação à capacidade de transporte do fluxo. Portanto, conforme a equação 5, a desagregação em sulcos ocorre apenas quando $\tau > \tau_c$ e se $G < T_c$, pois neste caso D_f é positiva ($G/T_c < 1$). Já a deposição de sedimentos ocorre quando $G > T_c$. Deste modo, D_f é negativa ($G/T_c > 1$) e pode ser avaliada como:

$$D_f = (\beta V_f / q) (T_c - G) \quad (6)$$

em que,

β - parâmetro de deposição igual a 0,5 (FOSTER et al., 1989);

V_f - velocidade efetiva das partículas do solo no fluxo de enxurrada (m s^{-1});

q - descarga do fluxo de escoamento por unidade de área ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Para uso do modelo WEPP, a determinação da capacidade de transporte de sedimentos, T_c , é fundamental, visto ser ela em associação com a carga de sedimentos, G , fatores que coordenam a desagregação e a deposição de partículas.

Muitos pesquisadores têm dado atenção para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos (FOSTER, 1982; FINKNER et al., 1989; SHARMA et al., 1996; LEI et al., 2001; POLYAKOV & NEARING, 2003). Várias fórmulas têm sido desenvolvidas para computar a capacidade de transporte de sedimentos. Nenhuma expressão e/ou método desenvolvidos têm ampla aceitação para fluxos superficiais e situações de sedimentação não uniforme (LEI et al, 2001). Contudo, ALONSO et al. (1981) avaliaram que a equação de Yalin foi a mais apropriada para determinar T_c . A equação de Yalin é definida como (YALIN, 1963):

$$\frac{T_c}{SG d \rho_w^{1/2} \tau_o^{1/2}} = 0.635 \delta \left[1 - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta) \right] \quad (7)$$

com β e δ expressos como:

$$\beta = 2.45 SG^{-0.4} Y_{cr}^{0.5} \delta \quad (8)$$

$$\delta = \frac{Y}{Y_{cr}} - 1 \quad (\text{quando } Y < Y_{cr}, \delta = 0) \quad (9)$$

$$Y = \frac{V^2}{(SG - 1) g d} \quad (10)$$

em que,

T_c - capacidade de transporte de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

SG - densidade de partícula, assumida neste trabalho como igual a 2,65 (adimensional);

d - diâmetro de partícula (m);

ρ_w - densidade da água (kg m^{-3});

τ_o - tensão cisalhante atuando no leito ou fundo do canal (Pa);

Y - tensão cisalhante adimensional;

Y_{cr} - tensão cisalhante crítica adimensional, obtida pelo diagrama de Shields (JULIEN, 1998).

V - velocidade cisalhante ($m s^{-1}$);

g - aceleração da gravidade ($m s^{-2}$);

δ e β - parâmetros adimensionais definidos pelas equações 8 e 9, respectivamente.

Uma simplificação da equação de Yalin foi apresentada por Finkner et al. (1989), com o intuito de reduzir o número de cálculos necessários para se obter T_c e aliviar as instabilidades associadas com soluções numéricas. Segundo SHARMA et al. (1996), a equação de Yalin em sua forma original (equações 7 a 10) é muito longa e complexa. Acrescente-se a isto o fato de ser necessário o uso do diagrama de Shields (JULIEN, 1998), o que também contribui com uma relativa morosidade para solucionar a equação de Yalin.

Deste modo, os objetivos deste estudo são: 1) desenvolver um método simplificado para solução da equação de Yalin, a fim de quantificar a capacidade de transporte de sedimentos para uso no WEPP ou em outros modelos de erosão; 2) calibrar e avaliar a equação simplificada de FINKNER et al. (1989), para um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Uma rotina computacional para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos (T_c) foi gerada para solucionar a equação de Yalin, a qual foi designada (MSEY – Modelo para Solução da Equação de Yalin). O MSEY exige como parâmetros de entrada a temperatura do fluxo (T), o diâmetro de partículas (d), a tensão cisalhante do fluxo (τ_0), a velocidade cisalhante do fluxo (V) e a densidade de partículas do sedimento (SG). Internamente, a rotina MSEY gera parâmetros de saída necessários para a solução das equações 7 a 10 e do diagrama de Shields (JULIEN, 1998). A Figura 1 apresenta o fluxograma final da rotina computacional MSEY. O MSEY é uma rotina desenvolvida numa planilha eletrônica, em ambiente WindowsTM, executa no Microsoft Excel 97® ou superior. O MSEY é composto por seis (06) planilhas: O MSEY,

ENTRADA DE DADOS, RESULTADOS, GRÁFICO, BASE 1 E BASE 2. As planilhas O MSEY, RESULTADOS, GRÁFICO, BASE 1 E BASE 2 apresentam suas células protegidas. O usuário não pode alterar, modificar ou acrescentar informações aos seus conteúdos. A única planilha não protegida é a de ENTRADA DE DADOS. Detalhes das planilhas são apresentados na Tabela 1A e nas Figuras 1A a 5A (Apêndice).

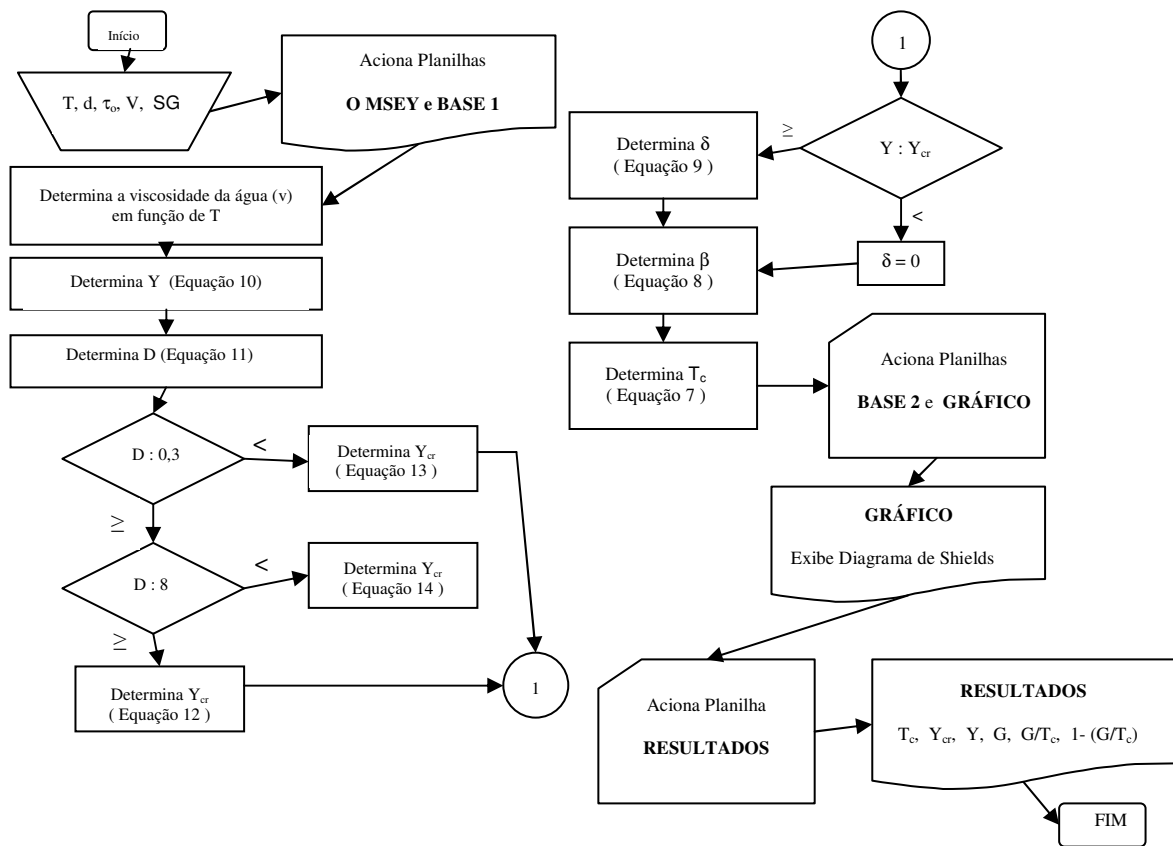


FIGURA 1. Fluxograma final da rotina MSEY – Modelo para Solução da Equação de Yalin.

O MSEY gera uma solução do diagrama de Shields e faz uma apresentação gráfica do mesmo, na qual posiciona a(s) partícula(s) em função do(s) seu(s) diâmetro(s) e Y_{cr} . O referido posicionamento, no gráfico do MSEY, aponta se há ou não

condições da(s) partícula(s) com dado(s) diâmetro(s) iniciar(em) ou não movimento. Deste modo, se $Y > Y_{cr}$ o posicionamento indicará movimento e em caso contrário não. Para compor o diagrama de Shields, o MSEY utiliza de equações apresentadas por JULIEN (1998):

$$D = \left[\frac{(SG - 1) g}{\nu^2} \right]^{1/3} d \quad (11)$$

$$Y_{cr} = \frac{0,23}{D} + 0,054 \left[1 - \exp\left(\frac{-(D)^{0,85}}{23} \right) \right] \quad (12)$$

em que,

D - diâmetro de partícula adimensional;

d - diâmetro de partícula (m);

ν - viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$).

Devido a imprecisões encontradas utilizando a equação 12, no ajuste da curva de Shields, para D menor que 8, as seguintes equações apresentadas por JULIEN (1998) foram utilizadas:

$$Y_{cr} = 0,5 \tan\phi \quad (\text{para } D < 0,3) \quad (13)$$

$$Y_{cr} = 0,25 D - 0,6 \tan\phi \quad (\text{para } D \text{ entre } 0,3 \text{ e } 8) \quad (14)$$

em que,

ϕ - ângulo de repouso e é igual a 30° para partículas do sedimento nos padrões descritos.

Resultados do experimento de avaliação de erosão em sulcos obtidos por MARTINS FILHO (1994), num Latossolo Vermelho distroférico (Tabela 1), foram utilizados para estabelecer os valores observados da capacidade de transporte de sedimentos (T_c). Com estes valores análises de regressão foram conduzidas com o programa STATISTICA (STATSOFT, 1994) com o intuito de calibrar equações entre valores de tensão cisalhante e T_c . Como critério para definir o processo de calibração utilizou-se as equações com maior valor de R^2 . Para a capacidade da transporte de sedimento (T_c), o modelo simplificado de FINKNER et al. (1989) foi a base referencial para a calibração de equações. Tal modelo pode ser descrito como:

$$T_c = K_t \tau^z \quad (15)$$

em que,

K_t – coeficiente de transporte de sedimento;

τ – tensão cisalhante, Pa;

z – expoente igual a 3/2 (Finkner et al., 1989).

Na avaliação das equações calibradas, utilizou-se resultados de erosão obtidos por PEREIRA (1989) em parcelas experimentais com 1,5 m de largura e comprimentos de declive variando de 1,0 a 8,0 m (Tabela 2). Para tal intuito, foi necessária uma conversão dos referidos resultados de macroparcels para sulcos individuais. Isto foi conduzido de modo semelhante ao realizado por GILLEY & DORAN (1998). Na referida conversão foram utilizadas as seguintes equações (GILLEY et al, 1990 e GILLEY & DORAN, 1998):

$$R_n = \frac{q}{\nu} \quad (16)$$

$$f = 1350 R_n^{-0,934} \quad (17)$$

$$y = \left(\frac{f q^2}{8 g S} \right)^{1/3} \quad (18)$$

$$\tau = \gamma_w y S \quad (19)$$

em que,

R_n - número de Reynolds;

q - taxa de descarga por unidade de largura ($m^2 s^{-1}$);

ν - viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$).

f - coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach;

y - profundidade do fluxo (m);

g - aceleração da gravidade ($m s^{-2}$);

τ - tensão cisalhante (Pa);

γ_w - peso específico da água ($N m^{-3}$);

S - razão de inclinação ($m m^{-1}$).

Para testes de validação de modelos utilizou-se parâmetros estatísticos propostos por LOAGUE & GREEN (1991) como:

$$RMSE = \sum_{i=1}^n [(P_i - O_i)^2 / n]^{0,5} (100/O_m) \quad (20)$$

$$EF = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \quad (21)$$

$$CRM = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (22)$$

em que,

RMSE - erro padrão da estimativa normalizado, %;

EF - eficiência do modelo;

CRM - coeficiente de massa residual;

P_i - valor estimado;

O_i - valor observado;

O_m - média dos valores observados;

n - espaço amostral.

Considerou-se, como descrito por MARTINS FILHO (1999), quando valores preditos e observados são iguais, que os parâmetros estatísticos RMSE, EF e CRM assumem valores iguais a 0, 1 e 0, respectivamente.

TABELA 1. Faixa de valores dos resultados obtidos por MARTINS FILHO (1994) e utilizados na rotina MSEY.

| N | S | W | τ | $G \times 10^3$ | d |
|----|---------------|-----------------|--------------|------------------------|-------------------|
| | $m \ m^{-1}$ | M | Pa | $Kg \ s^{-1} \ m^{-1}$ | m |
| 24 | 0,070 a 0,078 | 0,0174 a 0,2201 | 2,96 a 12,50 | 0,370 a 22,571 | 0,00019 a 0.00030 |

N – número de observações; S – razão de inclinação; w - largura do canal; τ – tensão cisalhante; G – carga de sedimento; d – diâmetro de partícula.

TABELA 2. Faixa de valores dos resultados obtidos por PEREIRA (1989) e utilizados no teste de comparação de modelos.

| N | λ | S | d | $G \times 10^3$ | q |
|----|-----------|------------|---------------------|--------------------|---------------|
| | m | $m m^{-1}$ | m | $Kg s^{-1} m^{-1}$ | $m^2 s^{-1}$ |
| 30 | 1,0 | 0,058 | 0,000191 a 0,000546 | 0,003 a 0,823 | 0,008 a 0,060 |
| 30 | 2,0 | 0,066 | 0,000277 a 0,000625 | 0,052 a 0,216 | 0,008 a 0,056 |
| 30 | 4,0 | 0,050 | 0,000534 a 0,000586 | 0,131 a 2,541 | 0,010 a 0,063 |
| 30 | 8,0 | 0,106 | 0,000505 a 0,000629 | 0,176 a 7,601 | 0,007 a 0,246 |

N – número de observações; λ – comprimento do declive; S – razão de inclinação; d – diâmetro de partícula; G – carga de sedimento; e q – taxa de descarga por unidade de largura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos valores de MARTINS FILHO (1994), os quais foram resumidamente apresentados na Tabela 1, determinou-se a capacidade de transporte de sedimentos (T_c) com a rotina MSEY. A Figura 1 apresenta um resultado gráfico do diagrama de Shields no MSEY, com o qual é verificado a transição da condição de não-movimento para início de movimento de sedimento. Esta condição é definida, segundo PAPHITIS (2001), como crítica ou limite de início de movimentação, a qual está relacionada com o primeiro estágio do transporte de sedimento. Na Figura 1 uma partícula com diâmetro de 0,000241 m submetida a uma tensão cisalhante de 6,44 Pa, como determinado por MARTINS FILHO (1994), apresenta condições de iniciar movimento ($Y = 1,65$). Sobre a curva de Shields está grafado o limite de Y_{cr} mínimo (0,047) necessário para que tal partícula inicie movimento. Portanto, sob estas condições foi possível determinar T_c utilizando-se a equação de Yalin, para as 24 observações de MARTINS FILHO (1994). Deste modo, as seguintes equações foram calibradas:

$$T_c = 0,04341 \tau^{1,6144} \quad R^2 = 0,95^{**} \quad (23)$$

$$T_c = 0,05653 \tau^{3/2} \quad R^2 = 0,95^{**} \quad (24)$$

As equações 23 e 24 são aquelas ajustadas ou calibradas a partir dos resultados obtidos com a rotina MSEY aplicando-se dados obtidos por MARTINS FILHO (1994). A equação 23 é uma calibração daquela proposta por FINKNER et al. (1989), na qual o expoente é fixado como sendo igual a 3/2. O expoente da equação 23 é semelhante ao obtido por BRAIDA (1994), para um Argissolo no Rio Grande do Sul, que foi de 1,65. Já o coeficiente de transporte de sedimento determinado por BRAIDA (1994) foi de 0,05421, enquanto que no presente trabalho foi de 0,04341 e 0,05653 com as equações 23 e 24, respectivamente. Estes dois últimos coeficientes são da mesma ordem de grandeza daquele obtido por BRAIDA (1994).

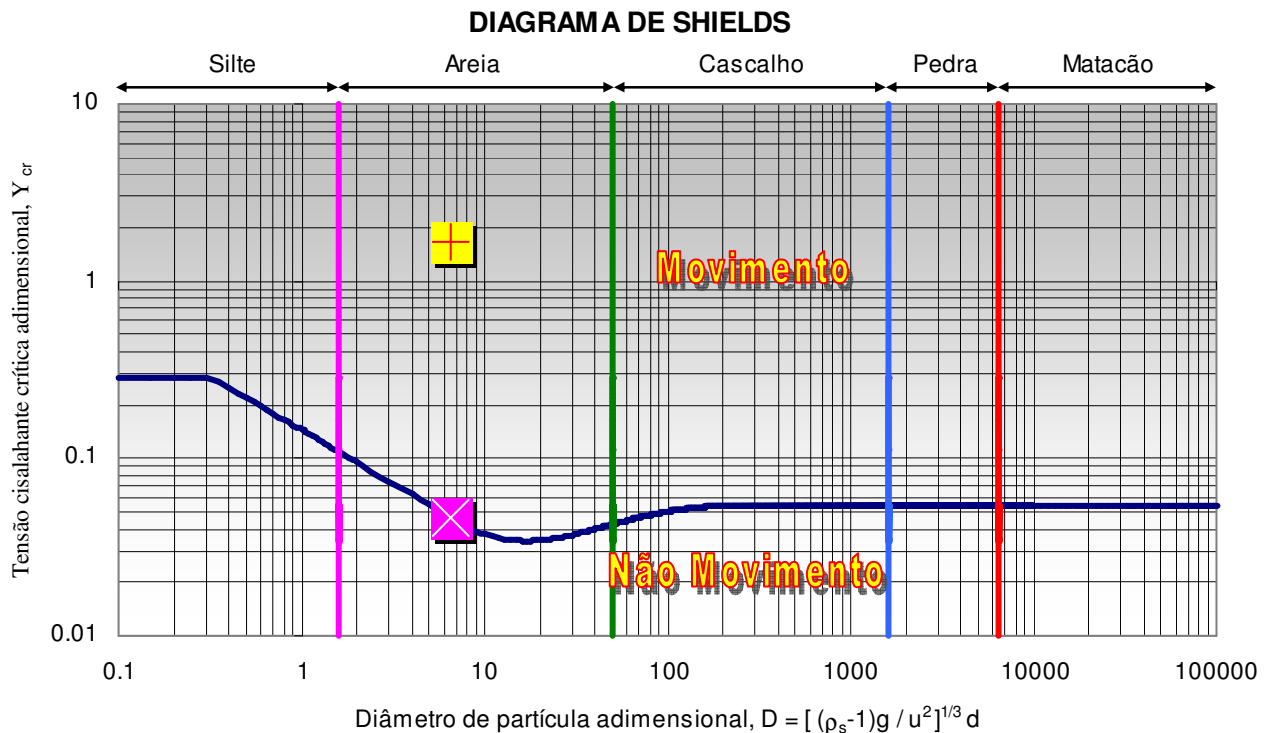


Figura 1 . Diagrama de Shields gerado com a rotina MSEY.

TABELA 3. Valores de capacidade de transporte de sedimentos obtidos para os resultados de PEREIRA (1989).

| λ | T_c (23) | G/T_c (23) | T_c (24) | G/T_c (24) | T_c (7) | G/T_c (7) |
|-----------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|-------------|
| m | $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ | | $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ | | $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ | |
| 1,0 | 2,355 c | 0,00001 c | 2,309 c | 0,00001 c | 2,435 c | 0,00001 c |
| 2,0 | 2,368 c | 0,00005 c | 2,3131 c | 0,00005 c | 2,474 c | 0,00005 c |
| 4,0 | 5,917 b | 0,00027 b | 5,427 b | 0,00027 b | 6,969 b | 0,00022 b |
| 8,0 | 10,175 a | 0,00059 a | 8,930 a | 0,00061 a | 11,783 a | 0,00051 a |

λ – comprimento do declive; T_c – capacidade de transporte de sedimento; G – carga de sedimento; números entre parênteses indicam as equações utilizadas para estimar T_c ; Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem, significativamente, pelo teste Tukey ao nível de 5%.

A capacidade de transporte média de sedimentos pelo fluxo, utilizando-se as equações 23 e 24 e MSEY para valores obtidos por PEREIRA (1989), são apresentadas na Tabela 3. Na Tabela 3, encontram-se também as relações G/T_c para as mesmas condições.

Verifica-se que, tanto a capacidade de transporte quanto a relação G/T_c variaram significativamente em função do comprimento do declive. Isto era esperado, uma vez que, aumentando-se o comprimento do declive, aumenta-se a tensão cisalhante do fluxo, ou seja, a energia disponível para o transporte de sedimentos. Esses resultados corroboram os de Braida (1994).

A relação G/T_c indica quanto da capacidade de transporte do fluxo está sendo ocupada com o transporte de sedimentos. No presente trabalho, verificou-se que a carga média de sedimentos transportados pelo fluxo foi sempre inferior à da sua capacidade de transporte, independentemente do método utilizado para determinar T_c . Assim sendo, foi possível assumir que a taxa de desagregação do solo durante os testes realizados por PEREIRA (1989) foi muito semelhante à capacidade de desagregação do fluxo, ou seja, que o termo $1 - G/T_c$ da equação 5 tendeu para a unidade. Estes resultados, também concordam com aqueles obtidos por BRAIDA (1994).

TABELA 4. Parâmetros estatísticos do desempenho das equações 23 e 24 para a predição da capacidade de transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho.

| Equação | RMSE | EF | CRM |
|---------|-------|------|------|
| | % | | |
| 23 | 17,87 | 0,95 | 0,13 |
| 24 | 30,77 | 0,83 | 0,21 |

RMSE - erro padrão da estimativa normalizado, EF - eficiência do modelo; e CRM - coeficiente de massa residual.

Quanto a eficiência das equações 23 e 24, EF, pôde-se inferir que a 23 foi, em geral, mais eficiente na predição da capacidade de transporte de sedimentos. Risse et al. (1993) afirmaram que o parâmetro EF compara valores observados à linha 1:1, na qual valores medidos e estimados são iguais. Um valor igual a 1,0 para EF indica um modelo perfeito (MARTINS FILHO, 1999), o que não é o caso dos valores apresentados na Tabela 4.

Segundo LOAGUE & GREEN (1991), valores de CRM > 0,0 indicam que valores observados de T_c são subestimados, pelos valores preditos, pelo uso das equações 23 e 24. Deste modo, pelos valores de CRM não é possível inferir qual é melhor equação entre as duas (Tabela 4).

Os erros padrões da capacidade de transporte de sedimentos quando do uso das equações 23 e 24 foram baseados no RMSE, o qual representa o erro padrão das estimativas normalizado (Tabela 4). O RMSE para a equação 23 foi de 17,87, enquanto que para a equação 24 foi de 30,77. Observa-se, portanto, que no geral a ordem de magnitude dos erros cometidos, ao se estimar os valores observados pelo uso da equação 23 foi menor do que com a equação 24.

Em função do exposto, pôde-se inferir que existe maior confiabilidade e acuracidade das estimativas obtidas para T_c , quando do uso da equação 23.

4. CONCLUSÕES

- 4.1. A rotina desenvolvida MSEY (Modelo de Solução da Equação de Yalin) é viável para uma solução rápida da equação de Yalin e do diagrama de Shields, quando da determinação da capacidade de transporte de sedimentos;
- 4.2. É possível utilizar uma equação simplificada para estimar a capacidade de transporte de sedimentos (T_c) a partir da tensão cisalhante do fluxo (τ), no Latossolo Vermelho estudado, como: $T_c = 0,04341 \tau^{1,6144}$ ($R^2 = 0,95^{**}$).

5. REFERÊNCIAS

ALONSO, C.V.; NEIBLING, W.H.; FOSTER, G.R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.24, n.5, p.1211-1220, 1981.

BRAIDA, J.A. **Relações da erosão entressulcos, com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em solo podzólico vermelho-escuro**. 1994. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FINKNER, S.C.; NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; GILLEY, J.E. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.5, p.1545-1550, 1989.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p.296-380. (ASAE. Monograph, 5)

FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Transport of soil particles by shallow flow. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.15, n.1, p.99-102, 1972.

FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; NEARING, M.A.; FINKNER, S.C.; FLANAGAN, D.C. In: LANE, L.J. & NEARING, M.A., ed. **USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation**. West Lafayette, National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service, 1989. p.10.1-10.12. (NSREL. Report, 2).

GILLEY, J.E.; DORAN, J.W. Soil erosion potential former conservation reserve program sites. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.41, n.1, p.97-103, 1998.

GILLEY, J.E.; E.R. KOTTWITZ; J.R. SIMATION. Hydraulic characteristics of rills. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.33, n.6, p.1900-1906, 1990.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 280p.

LEI, T.W.; ZHANG, Q.; ZHAO, J.; TANG, Z. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.44 n.6, p.1537-1542, 2001.

LOAGUE, K. ; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, n.1, p.51-73, Jan. 1991.

LU, J.K.; CASSOL, E.A.; MOLDENHAUER, W.C. Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Saint Joseph**, v.32 n.6, p.1923-1931, 2001.

MARTINS FILHO, M.V. **Erodibilidade inter e intra-sulcos dum latossolo vermelho-escuro textura argilosa da região de Jaboticabal - SP**. Piracicaba: ESALQ, 1994. 143p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal – SP**. Lavras: UFLA. 1999. 140 f. Tese. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S.C. A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.5, p.1587-1593, 1989.

PAPHITIS, D. Sediment movement under unidirectional flows: na assessment of empirical threshold curves. **Coastal Engineering**, Amsterdam, v.43, n.1, p.227-245, 2001.

PEREIRA, V.P. **Perda de solo em Latossolo Vermelho-Escuro, textura argilosa, devida a impacto de gotas de chuva simulada e a comprimento de rampa**. 1989. 106 f. Tese (Livre-Docência em Conservação do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

POLYAKOV, V.O.; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1, p.33-43, 2003.

RISSE, L.M.; NEARING, M.A.; NICKS, A.D.; LAFLEN, J.M. Error assessment in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.57, n.3, p.825-833, May/June 1993.

SHARMA, K.D.; MURTHY, J.S.R.; DHIR, R.P. Modeling sediment delivery in arid upland basins. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.39, n.2, p.517-524, 1996.

STATSOFT. **Statistica**: Quick reference. Tulsa: StatSoft, 1994. 148p.

YALIN, Y.S. An expression for bed load transportation. **Journal of Hydraulic Division**, Saint Joseph, v.3, n.1, p.221-250, 1963.

CAPÍTULO 3 - PERDAS DE SOLO E ÁGUA POR EROSIÃO SOB CHUVA ARTIFICIAL EM POMAR CITRÍCOLA SUBMETIDO AO USO DE GRADE EM BEBEDOURO, SP.

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da cobertura do solo pela cultura de citrus, através do seu dossel, no controle das perdas de solo e água e, também, da sua eventual influência na carga e no transporte de sedimentos, num Latossolo Vermelho, em área citrícola submetida ao uso de grade para o controle de plantas daninhas.

1. INTRODUÇÃO

Na citricultura a principal forma de degradação do solo, dentre todas as existentes, é a erosão hídrica. O uso de grade para controle de plantas daninhas nas entrelinhas dos pomares citrícolas é prática usual no Estado de São Paulo.

Dada a grande importância da citricultura, cuja maior parte da produção brasileira de fruta e suco concentra-se no Estado de São Paulo, a qual gera 400 mil empregos e divisas da ordem de US\$ 1,5 bilhões por ano, e que contribui com metade de todo suco produzido no mundo e 80% do suco concentrado do mercado internacional, é de se esperar que neste setor do agronegócio brasileiro haja uma preocupação constante para o entendimento e o controle do fenômeno de erosão.

É evidente que as atuais condições de liderança em termos de produção de fruta e de comercialização de sucos e outros derivados cítricos, em nível mundial, não serão permanentes e duradouras, razão pela qual a citricultura brasileira precisa estruturar-se em sólida tecnologia científica (AMARO, 1996).

Segundo FURTADO (2002), é preciso convencer os produtores que estes poderão lucrar mais se empregarem métodos obtidos e indicados pela pesquisa e experimentação.

No caso específico da erosão, poucos ou raros são os trabalhos desenvolvidos pela pesquisa e experimentação científica sobre os impactos deste fenômeno neste importante setor do agronegócio brasileiro.

O Estado de São Paulo apresenta boa parte de seu território sob o domínio da classe dos Latossolos, os quais são considerados de baixa susceptibilidade à erosão. Em alguns locais, estes solos têm sido beneficiados pela manutenção sobre a sua superfície das plantas daninhas e dos seus resíduos, quando controladas mecanicamente por roçadeiras ou com o emprego de herbicidas. Porém, como mencionado, em muitos pomares tal sistema não é empregado.

Segundo FOSTER (1982), o efeito da cobertura vegetal do solo sobre a erosão pode ser: 1) tipo I (C_{II}), relativo à cobertura vegetal oferecida pelo dossel; 2) tipo II (C_{III}), relativo à cobertura vegetal em contacto direto com a superfície do solo; e, 3) tipo III (C_{III}), efeito da incorporação de resíduos vegetais ao solo em função do seu uso e manejo.

O efeito tipo I é aquele decorrente da interceptação das gotas da água da chuva propiciada pelo dossel ou parte aérea das culturas, o qual é dependente da altura e densidade do dossel (LAFLEN et al., 1985). A cobertura em contacto direto com a superfície do solo, efeito tipo II, permite que a energia cinética das gotas da chuva seja dissipada junto à superfície, além de constituir-se num obstáculo à ação cisalhante da enxurrada (FOSTER, 1982; BRAIDA, 1994). O efeito tipo III é aquele resultante dos resíduos incorporados e do efeito residual do uso e manejo do solo na desagregação e transporte de sedimentos erodidos. BRAIDA (1994) afirmou que o efeito II possibilita maior controle do processo de erosão do que o efeito I.

Segundo FOSTER (1982), o efeito tipo I pouco ou nada controla a erosão em sulcos. Em áreas citrícolas gradeadas o principal efeito da cobertura vegetal é o tipo I, ou seja, aquele oferecido apenas pelo dossel. O efeito tipo III, quando resíduos são incorporados ao solo, é aquele que apresenta um controle mais efetivo sobre o processo de erosão em sulcos. Portanto, a erosão em sulcos ganha demasiada importância em pomares com as entrelinhas gradeadas e que apresentam apenas a cobertura oferecida pelo dossel.

Em função do exposto, para se avaliar a eficiência da cobertura do solo pela cultura de citrus, através do seu dossel, no controle das perdas de solo e água e, também, da sua eventual influência na carga e no transporte de sedimentos, foi realizado o presente trabalho na região de Bebedouro - SP, num Latossolo Vermelho Escuro, em área citrícola submetida ao uso de grade para o controle de plantas daninhas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área do presente trabalho localiza-se na Estação Experimental de Bebedouro, no município de Bebedouro - SP, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 20° 53' 16" S e Longitude 48° 28' 11" W.

O clima, segundo a classificação de Köppen, denominado de clima subtropical Cwa, apresenta inverno moderado e seco e verão quente e chuvoso, com precipitação média de 1400 mm, com temperatura média máxima de 31 °C e mínima de 17 °C.

Foi utilizado um pomar de laranja Pera (*Citrus sinensis*, L. Osbeck) enxertado em limão Cravo (*Citrus limonia*, L. Osbeck), com espaçamento de 7,0 m de entrelinhas por 5,0 m entre plantas. A faixa etária das plantas era da ordem de 6 anos.

A área é caracterizada por apresentar um relevo plano a suave ondulado, com declividade média de 5,5%, numa altitude média de 601 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 1997). Alguns atributos químicos do solo são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Atributos químicos do solo.

| Horizonte | pH | MO | P | K | Ca | Mg | SB | CTC | V |
|-----------|-----|--------------------|---------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| | | g dm ⁻³ | µg dm ⁻³ | mmol _c dm ⁻³ | | | | | % |
| A | 5,0 | 16 | 34 | 2,0 | 20 | 9 | 31 | 48,9 | 63,4 |
| B | 4,6 | 10 | 2,0 | 0,1 | 3,0 | 1,0 | 4,1 | 32,1 | 13,0 |

Um experimento num delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos constituídos pela variação da porcentagem de cobertura oferecida por plantas de laranja pera e com duas repetições. As quatro condições de cobertura vegetal oferecida ao solo pelo dossel foram testadas em parcelas experimentais: 1) ausência de cobertura; 2) 35,3 % de cobertura; 3) 53,0 % de cobertura; e 4) 70,6% de cobertura. A porcentagem de área de solo coberta pelo dossel foi avaliada com uma régua graduada de 4,0 m, conforme método descrito por ADAMS & ARKIN (1977). Na Figura 1 é apresentado um esquema da disposição das plantas de laranja Pera nas parcelas experimentais: a) com 35,3% de cobertura (1 planta); e b) com 53,0% ou 70,6% de cobertura (2 plantas). Todas as plantas foram locadas nas laterais das parcelas.

As parcelas experimentais, com 3,50 m de largura e 11,00 m de comprimento (38,5 m²), foram delimitadas com chapas metálicas nas laterais e parte superior, e por calhas coletoras metálicas em seus limites inferiores. As calhas coletoras com 3,50 m de largura convergiam para a saída de 0,08 polegadas de diâmetro. Amostras de enxurrada foram coletadas nestas calhas para quantificar as perdas de solo. Todas as parcelas foram alinhadas no sentido da declividade do terreno, a qual em média foi de 5,5%. O preparo do solo e gradagem da área também foram realizados no sentido do declive, quinze dias antes das simulações de chuvas.

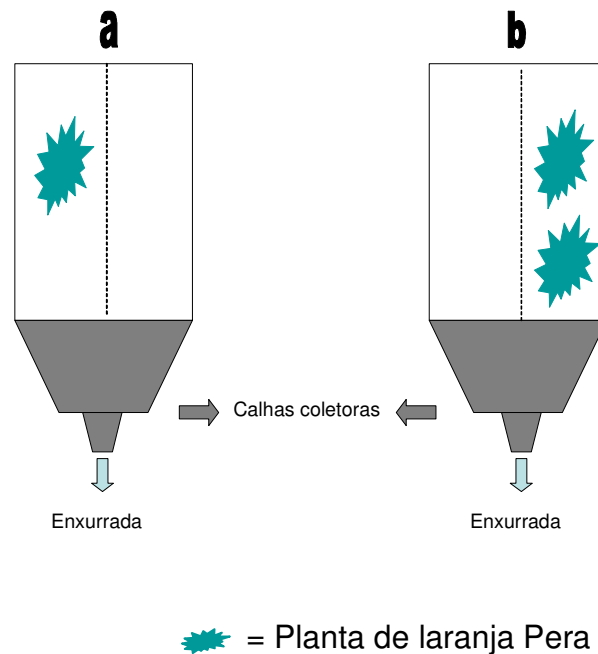


Figura 1. Esquema da disposição das plantas de laranja Pera nas parcelas experimentais: a) com 35,3% de cobertura (1 planta); e b) com 53,0% ou 70,6% de cobertura (2 plantas).

As parcelas experimentais foram submetidas a chuvas simuladas com intensidade média de $64,2 \text{ mm h}^{-1}$, durante 60 minutos. Utilizou-se, para realizar as referidas precipitações, um simulador de chuva de hastes rotativas do tipo Swanson, com bicos veejet 801000, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por SWANSON (1965).

Trinta e seis pluviômetros, alinhados no sentido do declive, na área de ação do simulador de chuvas, como descritos por PEREIRA & MOLINA (1986), foram utilizados para determinar as intensidades das precipitações produzidas pelo simulador, nas áreas ocupadas pelas parcelas experimentais.

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos foram realizadas de minuto em minuto até o sexto minuto após o início da enxurrada e a partir daí de três em três minutos até o décimo segundo minuto e, posteriormente a cada cinco minutos até completar 60 minutos.

Amostras foram coletadas em recipientes de vidro com capacidade de 1 L, cronometrando-se o tempo de coleta. Logo após as coletas os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório, para quantificação da concentração de sedimentos e volume de solução e, conseqüente, determinação das taxas de perdas de solo e água. Os volumes de solução coletados foram avaliados gravimetricamente, em balança com resolução de 0,01 g e, em seguida, as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas para a deposição de sedimentos. Após o período de repouso de 24 horas, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C até secagem completa. Após secagem, as amostras foram pesadas determinando-se o peso de sedimento de cada uma. A concentração de sedimentos foi obtida considerando-se o volume da solução, a densidade da água e do sedimento na solução conforme descrito por VANONI (1975). Deste modo, determinou-se para cada parcela e tratamento as perdas totais por erosão hídrica durante cada uma das chuvas simuladas.

Os resultados obtidos nas macroparcelas (3,5 m x 11,0 m) foram convertidos para sulcos individuais de modo semelhante ao realizado por GILLEY & DORAN (1998). Na referida conversão foram utilizadas as seguintes equações (GILLEY et al, 1990 e GILLEY & DORAN, 1998):

$$R_n = \frac{q}{\nu} \quad (1)$$

$$f = 1350 R_n^{-0,934} \quad (2)$$

$$y = \left(\frac{f q^2}{8 g S} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\tau = \gamma_w y S \quad (4)$$

$$w = 3,75002 Q^{0,503} \quad (5)$$

em que,

R_n - número de Reynolds;

q - taxa de descarga por unidade de largura ($m^2 s^{-1}$);

ν - viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$).

f - coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach;

y - profundidade do fluxo (m);

g - aceleração da gravidade (m s^{-2});

τ - tensão cisalhante (Pa);

γ_w - peso específico da água (N m^{-3});

S - razão de inclinação (m m^{-1});

w - largura do fluxo num canal (m);

Q - vazão de enxurrada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A equação 19 foi ajustada a partir de resultados obtidos por MARTINS FILHO (1994).

Para as avaliações da capacidade de transporte de sedimentos (T_c) utilizou-se da seguinte equação:

$$T_c = 0,04341 \tau^{1,6144} \quad R^2 = 0,95^{**} \quad (6)$$

em que,

τ - tensão cisalhante, Pa.

No presente trabalho a taxa de erosão em sulcos foi relacionada à tensão cisalhante como:

$$D_f = D_r \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (7)$$

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (8)$$

em que,

D_f - taxa de erosão em sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

D_r - taxa de erosão por um fluxo de água limpa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

G - carga de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

T_c - capacidade de transporte de sedimentos ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

K_r - erodibilidade do solo dos sulcos (s m^{-1});

τ - tensão cisalhante (Pa);

τ_c - tensão cisalhante crítica (Pa).

As análises de variância, regressões lineares e não lineares foram realizadas, utilizando-se o programa Statistica (STATSOFT, 1994).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos diferentes tratamentos, quanto as perdas por erosão expressas em $t\ ha^{-1}$ permitem observar que o dossel foi eficiente no controle da erosão global (entressulcos + sulcos, Tabela 2). Entretanto, deve-se ressaltar que o valor médio de perdas de solo de $10,4\ t\ ha^{-1}$ das parcelas testemunhas (sem cobertura vegetal) é inferior ao valor crítico de tolerância estabelecido por BERTONI & LOMBARDI NETO (1990), para latossolos, que é da ordem de $13,6\ t\ ha^{-1}$. Deve-se ressaltar, ainda, ser o valor de perdas de $10,4\ t\ ha^{-1}$ obtido em local de topografia plana (5,5 % de declividade), o qual pode ser crítico para tal condição. Contudo, áreas gradeadas e sem cobertura favorecem a concentração de sedimentos na enxurrada.

Observa-se que a carga de sedimento variou significativamente com a cobertura oferecida pelo dossel (Tabela 2). O mesmo não pode ser observado para a capacidade de transporte de sedimento, perdas de água e tensão cisalhante. Pesquisadores como LEI et al. (2001) e POLYAKOV & NEARING (2003) demonstraram que o transporte de sedimentos é combinação da taxa de descarga do fluxo, da sua largura do fluxo, velocidade, declividade, características do sedimento e geometria do sulco. Deste modo, pouco ou nenhum efeito houve do dossel sobre T_c . Além disso, a que ser considerado que as parcelas foram submetidas a chuvas de mesma intensidade, duração e que as parcelas experimentais e que, exceto pela cobertura oferecida pelo dossel, não apresentaram outras características diferenciais.

O valor da relação G/T_c indica quanto da capacidade de transporte do fluxo está sendo ocupada com o transporte de sedimentos. É possível verificar que a carga média de sedimentos transportados pelo fluxo variou de 0,1 a 1,6% da sua capacidade de transporte (Tabela 2). Analisando-se a relação $1-(G/T_c)$ observa-se que os seus valores ficaram próximos e não diferiram significativamente da unidade pelo teste t ao nível de 5%. Tal fato indica que a taxa de desagregação em sulcos (D_i) foi igual à da desagregação do fluxo (D_r), o que evidencia a importância do fenômeno de erosão em sulcos em pomares gradeados. É conhecido que um fluxo de água limpa, ou seja, sem a presença de sedimentos tem maior capacidade de desagregar do solo. Num sulco, a

energia do fluxo concentrado é utilizada para a desagregação e transporte de partículas do solo. Como apresentado na equação 7: $D_f = D_r [1-(G/T_c)]$. Quando a relação $1-(G/T_c)$ tende para a unidade, ou seja, que a desagregação do solo é quase tão grande quanto a capacidade de desagregação do fluxo, pressupõe-se que a carga de sedimento é muito pequena quando comparada à sua capacidade de transporte. Além deste fato, pela análise da Tabela 2, fica também evidente a pouca influência do dossel no controle do processo de erosão por sulcos, principalmente sobre a capacidade de transporte do fluxo. Portanto, é possível supor que, a cobertura em contato direto com a superfície ou aquela incorporada ao solo deverá propiciar maior controle da produção e do transporte de sedimentos em área citrícolas.

TABELA 2. Resultados do processo de erosão em função da cobertura vegetal oferecida pelo dossel de laranja Pera.

| Cobertura | A | CS | G | T_c | G/T_c | $1-(G/T_c)$ | Perda de | τ |
|-----------|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------|----------|--------|
| Dossel | | | | | | | Água | |
| % | t ha ⁻¹ | kg L ⁻¹ | Kg m ⁻¹ s ⁻¹ | Kg m ⁻¹ s ⁻¹ | | | L | Pa |
| 0,0 | 10,4 a | 0,032 a | 0,018 a | 1,129 a | 0,016 a | 0,984 c † | 1074,3 a | 7,51 a |
| 35,3 | 3,5 b | 0,016 b | 0,009 b | 0,998 a | 0,009 ab | 0,991 ab† | 1122,6 a | 6,97 a |
| 53,0 | 2,1 b | 0,010 bc | 0,005 b | 1,040 a | 0,005 ab | 0,995 ab† | 1315,1 a | 7,14 a |
| 70,6 | 0,7 b | 0,002 c | 0,001 b | 1,015 a | 0,001 c | 0,999 a † | 1570,2 a | 7,04 a |

A – perda de solo por erosão; CS – concentração de sedimento; G – carga de sedimento; T_c – capacidade de transporte de sedimento; e τ – tensão cisalhante. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem, significativamente, pelo teste Tukey ao nível de 5%. † - não difere de um, pelo teste t ao nível de 5%.

No presente trabalho, as perdas médias de água não foram reduzidas significativamente com o aumento da cobertura do solo pelo dossel da cultura (Tabela 2). Isto não implicou, também, na redução da tensão cisalhante média aplicada no solo pelo fluxo. Tais resultados conduzem a supor que a gradagem do solo do pomar reduziu a taxa de infiltração de água no solo e, ainda, que o dossel de plantas realmente não teve influência na redução do processo de erosão em sulcos. A redução na taxa de infiltração como uma consequência da gradagem pode estar relacionada a dois fatores: 1) compactação da camada superficial do solo (0,00 a 0,20 m); e

2) pulverização excessiva do solo favorecendo o selamento e o encrostamento da camada superficial (0,0 a 0,05 m). Estes fatores afetam a taxa de infiltração de água no solo e o processo de erosão (MARTINS FILHO, 1994).

Como exposto, verificou-se no presente trabalho que $D_f = D_r$. Deste modo, na Figura 1 relacionou-se a taxa de erosão em sulcos (D_f) e a tensão cisalhante (τ) estimadas para uma parcela sem cobertura e com 11,0 m de comprimento. Determinou-se, portanto, a erodibilidade em sulcos (K_r) como sendo igual a $0,877 \times 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$ e a tensão cisalhante crítica foi de 5,591 Pa (Figura 1). MARTINS FILHO (1994) encontrou, para os mesmos parâmetros em ordem, valores de $7,75 \times 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$ e 2,48 Pa num Latossolo Vermelho em Jaboticabal – SP. Uma explicação para tamanha diferença pode ser, provavelmente, a origem das informações e as condições experimentais. No caso da Figura 1 dados obtidos em macroparcelas foram convertidos para sulcos. Enquanto que no caso de MARTINS FILHO (1994) os sulcos foram pré-formados no campo. Uma segunda possibilidade, em termos de condições experimentais, seria a presença de camadas consolidadas e compactadas no solo do pomar avaliado na profundidade de 0,00 a 0,20 m. A compactação e a consolidação aumentam a resistência mecânica do solo, o que conduz a um aumento de τ_c e a uma redução de K_r (MARTINS FILHO, 1994). Logo, os valores encontrados carecem de melhor avaliação num futuro experimento no mesmo local, para dirimir dúvidas. Nenhuma avaliação foi conduzida para averiguar a presença ou não de camadas compactadas ou consolidadas. Contudo, é sabido que o uso intensivo de equipamentos de preparo induz à formação de camadas compactadas na profundidade de 0,0 a 0,20 cm, o denominado pé-de-grade.

Os resultados anteriormente apresentados na Figura 1 não podem levar à seguinte suposição: a compactação reduz a erosão em sulcos, visto reduzir K_r e aumentar o valor de τ_c do solo necessário para iniciar o processo de erosão em sulcos, como foi observado por MARTINS FILHO (1994). Contudo, HANSON (1989) observou que em condições de elevado estresse a estrutura do solo torna-se um importante fator na taxa de erosão em sulcos. Ele observou que solos compactados foram equivalentes em termos de erodibilidade quando ocorreu erosão em massa. A erosão em massa

ocorre quando o estresse na interface solo/água é maior que a resistência da macroestrutura do leito do canal, causando a separação de grandes pedaços de material coeso passíveis de serem removidos (HANSON, 1989). Devido a este fato, pode-se entender o porque da presença de formas de erosão em sulcos e/ou em voçorocas em algumas áreas citrícolas.

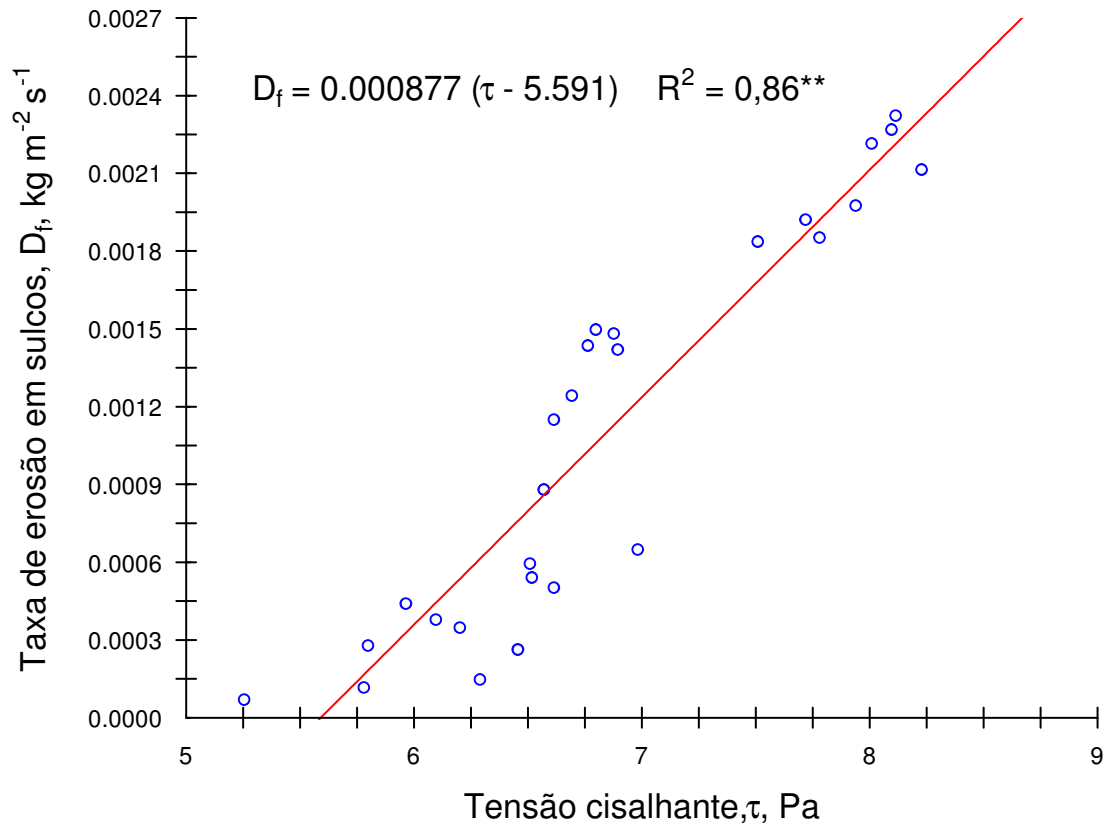


Figura 1. Taxa de erosão em sulcos em função da tensão cisalhante para parcela sem cobertura e com 11,0 m de comprimento de rampa.

4. CONCLUSÕES

4.1. A cobertura oferecida pela planta não tem efeito significativo sobre a capacidade de transporte de sedimento pelo fluxo concentrado de enxurrada, nem sobre o volume de água perdido por erosão. Contudo, o tem sobre a carga de sedimento.

4.2. O uso de grade em pomar citrícola, propicia condições ideais para a expressão do processo de erosão em sulcos.

5. REFERÊNCIAS

ADAMS, J.E.; ARKIN, G.F. A lighth interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, Jan./Fev. 1977.

AMARO, A. A. Situação e perspectivas da citricultura. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 26,n. 10, p.23-26 out. 1996.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo, Livroceres, 1990. 355p.

BRAIDA, J.A. **Relações da erosão entressulcos, com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em solo podzólico vermelho-escuro**. 1994. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997,212p.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers,1982. p.296-380. (ASAE. Monograph, 5)

FURTADO, A. T. Impactos econômicos da ciência e tecnologia. in:LANDI, F. R. (coord.). **Indicadores de ciência e tecnologia e inovação em São Paulo**: 2001. São paulo: FAPESP, 2002

GILLEY, J.E.; DORAN, J.W. Soil erosion potential former conservation reserve program sites. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.41, n.1, p.97-103, 1998.

GILLEY, J.E.; KOTTWITZ, E.R.; SIMATION, J.R. Hydraulic characteristics of rills. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.33, n.6, p.1900-1906, 1990.

HANSON, G.J. Channel erosion study of two compacted soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32, n.2, p.485-490, 1989.

LAFLEN, J.M., FOSTER, G.R.; ONSTAD, C. Simulation of individual storm soil losses for modeling the impact of soil erosion on cropland productivity. In: EL-SWAFY, MULDENHAUER AND LO (ed.). **Soil Erosion and Conservation**. Ankeny: SCSA, 1985. p.285-295.

LEI, T.W.; ZHANG, Q.; ZHAO, J.; TANG, Z. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.44 n.6, p.1537-1542, 2001.

LU, J.K.; CASSOL, E.A.; MOLDENHAUER, W.C. Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.32 n.6, p.1923-1931, 2001.

MARTINS FILHO, M.V. **Erodibilidade inter e intra-sulcos dum latossolo vermelho-escuro textura argilosa da região de Jaboticabal - SP**. Piracicaba: ESALQ, 1994. 143p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PEREIRA, V.P. ; MOLINA, D.S. Método para medição da intensidade de chuva produzida por um simulador de hastes rotativas. In: CONGRESSO BRASILEIRO, 6., ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 6., 1986, Campo Grande. **Resumos**. Campo Grande: Fundação Cargil, 1986. p.69.

POLYAKOV, V.O.; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1 , p.33-43, 2003.

SWANSON, N.P. Rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.8, n.1, p.71-72, Jan./Feb. 1965.

VANONI, V.A. **Sedimentation engineering**. The American Society of Civil Engineers, New York, 1975. 745p.

APÊNDICE

TABELA 1A- Conteúdo da planilha O MSEY.

| MSEY - MODELO PARA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE YALIN | |
|--|--|
| Versão 1.0 - Desenvolvida por Marcílio Vieira Martins Filho (Dezembro - 2004) | |
| <p>Descrição: O MSEY é uma rotina desenvolvida numa planilha eletrônica, em ambiente Windows™, executada no Microsoft Excel 97^(R) ou superior.</p> <p>O MSEY possui 06 planilhas (O MSEY, ENTRADA DE DADOS, RESULTADOS, GRÁFICO, BASE 1 E BASE 2) As planilhas O MSEY, RESULTADOS, GRÁFICO, BASE 1 E BASE 2 apresentam suas células protegidas. O usuário não pode alterar ou modificar ou acrescentar informações aos seus conteúdos. A única planilha não protegida é a de ENTRADA DE DADOS. Contudo esta última planilha apresenta algumas restrições para a sua utilização que são descritas abaixo.</p> <p>ENTRADADA DE DADOS - Digitar valores correspondentes às variáveis descritas nas células grafadas na cor azul. As unidades de entrada estão grafadas em azul claro. Digite o valor de cada variável nas células verde claro. Células grafadas na cor amarela = controle de entrada de variáveis (1 a 1000);</p> <p>AVISOS: Não altere o posicionamento das variáveis nesta planilha; Não altere o posicionamento das linhas e colunas nesta planilha; Não insira ou apague linhas e/ou colunas nesta planilha. (Vide ENTRADADA DE DADOS)</p> <p>A planilha BASE 1 gera solução para a equação de Yalin a partir de informações do diagrama de Shields.</p> <p>As planilhas BASE 1 E BASE 2 geram uma solução para o diagrama de Shields e na planilha GRÁFICO há uma apresentação gráfica do mesmo, na qual há o posicionamento da(s) partícula(s) em função do(s) parâmetros de shields: diâmetro (D) e tensão crítica (Y_{cr}). Na presente versão o gráfico gerado irá representar apenas a informação da primeira linha de dados (Controle = 1) da planilha ENTRADA DE DADOS.</p> <p>Na planilha RESULTADOS a Capacidade de transporte (T_c) pela equação de Yalin, parâmetros de Shields, carga de sedimentos (G) e avaliações entre G e T_c podem ser observadas e impressas para até 1000 análises.</p> | |

Microsoft Excel - MSEY-V.1.0

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

Arial 10

MSEY - MODELO PARA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE YALIN

Versão 1.0 - Desenvolvida por Marcílio Vieira Martins Filho (Dezembro-2004)

ENTRADA DE DADOS - Digitar valores correspondentes às variáveis descritas nas células grafadas na cor azul. As unidades de entrada estão grafadas em azul claro. Digite o valor de cada variável nas células verde claro.

Células grafadas na cor amarela = controle de entrada de variáveis (1 a 1000);

AVISOS: Não altere o posicionamento das variáveis nesta planilha;
 Não altere o posicionamento das linhas e colunas nesta planilha;
 Não insira ou apague linhas e/ou colunas nesta planilha.

| | Temperatura | Diâmetro | Tensão | Velocidade | Densidade | Carga |
|----------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|--------------------|
| | do fluxo | partícula | Cisalhante | cisalhante | partícula | Sedimento |
| Controle | T | d | τ_0 | V | ρ_s | G |
| | °C | mm | $N m^{-2}$ | $m s^{-1}$ | $g cm^{-3}$ | $kg s^{-1} m^{-1}$ |
| 1 | 25 | 0.241282 | 6.44 | 0.52 | 2.65 | 1.781609 |
| 2 | 25 | 0.206691 | 11.64 | 0.49 | 2.65 | 2.257053 |
| 3 | 25 | 0.191197 | 9.88 | 0.47 | 2.65 | 0.619658 |
| 4 | 25 | 0.192088 | 8.98 | 0.88 | 2.65 | 0.448549 |
| 5 | 25 | 0.297862 | 3.32 | 0.31 | 2.65 | 0.173913 |
| 6 | 25 | 0.206691 | 5.69 | 0.45 | 2.65 | 0.361991 |
| 7 | 25 | 0.206691 | 0.40 | 0.47 | 2.65 | 0.100455 |

O MESEY \ ENTRADA DE DADOS \ RESULTADOS \ GRÁFICO \ BASE

Desenhar AutoFormas

Pronto MAIÚ NÚM

Iniciar Microsoft Excel - MSE... PT 8:00 PM

FIGURA 1A- Detalhes da planilha ENTRADA DE DADOS.

Microsoft Excel - MSEY-V.1.0

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

Arial 10

E17

Parâmetros para cálculo do τ_*

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|---|----------|-------------------------|------------|----------------------------|----------|----------|----------|--|--|-------------------------|-------------------------|
| 12 | Parâmetros para cálculo do τ_* | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | Controle | T | v_w | g | ρ_s | d | d | D | Y_{cr} ou τ_{cr} | Y ou τ_* | Y_w | Y_c |
| 16 | | °C | $m^2 s^{-1}$ | $m s^{-2}$ | $g cm^{-3}$ | mm | m | | | | $N m^{-3}$ | $N n$ |
| 17 | 1 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.241282 | 0.000241 | 6.556553 | 0.047 | 1.646905 | 9781.000 | 25987 |
| 18 | 2 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.206691 | 0.000207 | 5.616583 | 0.051 | 3.474873 | 9781.000 | 25987 |
| 19 | 3 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.191197 | 0.000191 | 5.195552 | 0.054 | 3.188477 | 9781.000 | 25987 |
| 20 | 4 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.192088 | 0.000192 | 5.219764 | 0.054 | 2.884587 | 9781.000 | 25987 |
| 21 | 5 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.297862 | 0.000298 | 8.094048 | 0.041 | 0.68775 | 9781.000 | 25987 |
| 22 | 6 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.206691 | 0.000207 | 5.616583 | 0.051 | 1.698628 | 9781.000 | 25987 |
| 23 | 7 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.256072 | 0.000256 | 6.958454 | 0.045 | 2.286713 | 9781.000 | 25987 |
| 24 | 8 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.281793 | 0.000282 | 7.657391 | 0.043 | 2.132732 | 9781.000 | 25987 |
| 25 | 9 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.297862 | 0.000298 | 8.094048 | 0.041 | 0.870045 | 9781.000 | 25987 |
| 26 | 10 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.206691 | 0.000207 | 5.616583 | 0.051 | 2.418082 | 9781.000 | 25987 |
| 27 | 11 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.191197 | 0.000191 | 5.195552 | 0.054 | 3.291748 | 9781.000 | 25987 |
| 28 | 12 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.192088 | 0.000192 | 5.219764 | 0.054 | 3.44994 | 9781.000 | 25987 |
| 29 | 13 | 25 | 8.98E-07 | 9.80665 | 2.65 | 0.297862 | 0.000298 | 8.094048 | 0.041 | 1.435574 | 9781.000 | 25987 |

RESULTADOS / GRÁFICO / BASE 1 / BASE 2

Desenhar AutoFormas

Pronto MAIÚ NÚM

Iniciar Microsoft Excel - MSE... PT 7:48 PM

FIGURA 2A . Detalhes da planilha BASE 1.

The screenshot displays the Microsoft Excel application window titled "Microsoft Excel - MSEY-V.1.0". The spreadsheet is open to the "BASE 2" sheet, showing a grid of data from column B to M and row 1 to 22. The active cell is E2, which contains the value 0.523599. The data in the spreadsheet is as follows:

| | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|------|----------|----------|----------|---|----------|-----|----|------|------|---|
| 1 | | | | 0.523599 | | | | | | | | |
| 2 | | 0.1 | 0.288675 | 0.1 | 2.300331 | | 0.01 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 3 | | 0.15 | 0.288675 | 0.15 | 1.533799 | | 0.288675 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 4 | | 0.2 | 0.288675 | 0.2 | 1.150594 | | 0.288675 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 5 | | 0.25 | 0.288675 | 0.25 | 0.920718 | | 0.288675 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 6 | | 0.3 | 0.288675 | 0.3 | 0.767504 | | 0.288675 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 7 | | 0.35 | 0.270981 | 0.35 | 0.658096 | | 0.270981 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 8 | | 0.4 | 0.250117 | 0.4 | 0.576067 | | 0.250117 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 9 | | 0.45 | 0.233051 | 0.45 | 0.512289 | | 0.233051 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 10 | | 0.5 | 0.218775 | 0.5 | 0.461287 | | 0.218775 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 11 | | 0.55 | 0.206615 | 0.55 | 0.419576 | | 0.206615 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 12 | | 0.6 | 0.196105 | 0.6 | 0.384833 | | 0.196105 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 13 | | 0.65 | 0.186909 | 0.65 | 0.35545 | | 0.186909 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 14 | | 0.7 | 0.178781 | 0.7 | 0.330278 | | 0.178781 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 15 | | 0.75 | 0.171531 | 0.75 | 0.308474 | | 0.171531 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 16 | | 0.8 | 0.165016 | 0.8 | 0.289408 | | 0.165016 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 17 | | 0.85 | 0.159121 | 0.85 | 0.272595 | | 0.159121 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 18 | | 0.9 | 0.153757 | 0.9 | 0.25766 | | 0.153757 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 19 | | 0.95 | 0.148849 | 0.95 | 0.244307 | | 0.148849 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 20 | | 1 | 0.144338 | 1 | 0.232298 | | 0.144338 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 21 | | 1.05 | 0.140173 | 1.05 | 0.22144 | | 0.140173 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |
| 22 | | 1.1 | 0.136315 | 1.1 | 0.211578 | | 0.136315 | 1.6 | 50 | 1600 | 6500 | |

FIGURA 3A . Detalhes da planilha BASE 2.

Microsoft Excel - MSEY-V.1.0

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Digite uma pergunta

Arial 10

100%

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|----|----------------------|-----------------------|-------------------------|--|----------------------|---------|----------|--------------|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | RESULTADOS - | | | Capacidade de transporte (T_c) pela equação de Yalin, parâmetros de Shields, | | | | |
| 3 | | | | | carga de sedimentos (G) e avaliações entre G e T_c . | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | Capacidade | PARÂMETROS DE SHIELDS | | | Carga | Relação | Balanco | Resultado |
| 6 | | Transporte | | | | Sedimentos | | | |
| 7 | | T | D | Y_{cr} ou τ_{cr} | Y ou τ_* | G | G/T | 1-(G/T) | Processo |
| 8 | | $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$ | | | | $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$ | | | |
| 9 | 1 | 0.88011 | 6.55655 | 0.04671 | 1.64690 | 1.78161 | 2.02430 | -1.02430 | Deposição |
| 10 | 2 | 2.17801 | 5.61658 | 0.05125 | 3.47487 | 2.25705 | 1.03629 | -0.03629 | Deposição |
| 11 | 3 | 1.60225 | 5.19555 | 0.05370 | 3.18848 | 0.61966 | 0.38674 | 0.61326 | Desagregação |
| 12 | 4 | 1.37344 | 5.21976 | 0.05355 | 2.88459 | 0.44855 | 0.32659 | 0.67341 | Desagregação |
| 13 | 5 | 0.30000 | 8.09405 | 0.04066 | 0.68775 | 0.17391 | 0.57971 | 0.42029 | Desagregação |
| 14 | 6 | 0.66289 | 5.61658 | 0.05125 | 1.69863 | 0.36199 | 0.54608 | 0.45392 | Desagregação |
| 15 | 7 | 1.73775 | 6.95845 | 0.04507 | 2.28671 | 0.48845 | 0.28108 | 0.71892 | Desagregação |
| 16 | 8 | 1.90241 | 7.65739 | 0.04255 | 2.13273 | 0.34693 | 0.18236 | 0.81764 | Desagregação |
| 17 | 9 | 0.46223 | 8.09405 | 0.04066 | 0.87004 | 0.22609 | 0.48913 | 0.51087 | Desagregação |
| 18 | 10 | 1.20157 | 5.61658 | 0.05125 | 2.41808 | 0.61798 | 0.51431 | 0.48569 | Desagregação |
| 19 | 11 | 1.68777 | 5.19555 | 0.05370 | 3.29175 | 0.45455 | 0.26932 | 0.73068 | Desagregação |
| 20 | 12 | 1.84000 | 5.21976 | 0.05355 | 3.44994 | 0.31136 | 0.16922 | 0.83078 | Desagregação |

RESULTADOS / GRÁFICO / BASE 1 / BASE 2

Desenhar AutoFormas

Pronto MAIÚ NÚM

Iniciar Microsoft Excel - MSE...

PT 7:54 PM

FIGURA 4A . Detalhes da planilha RESULTADOS.

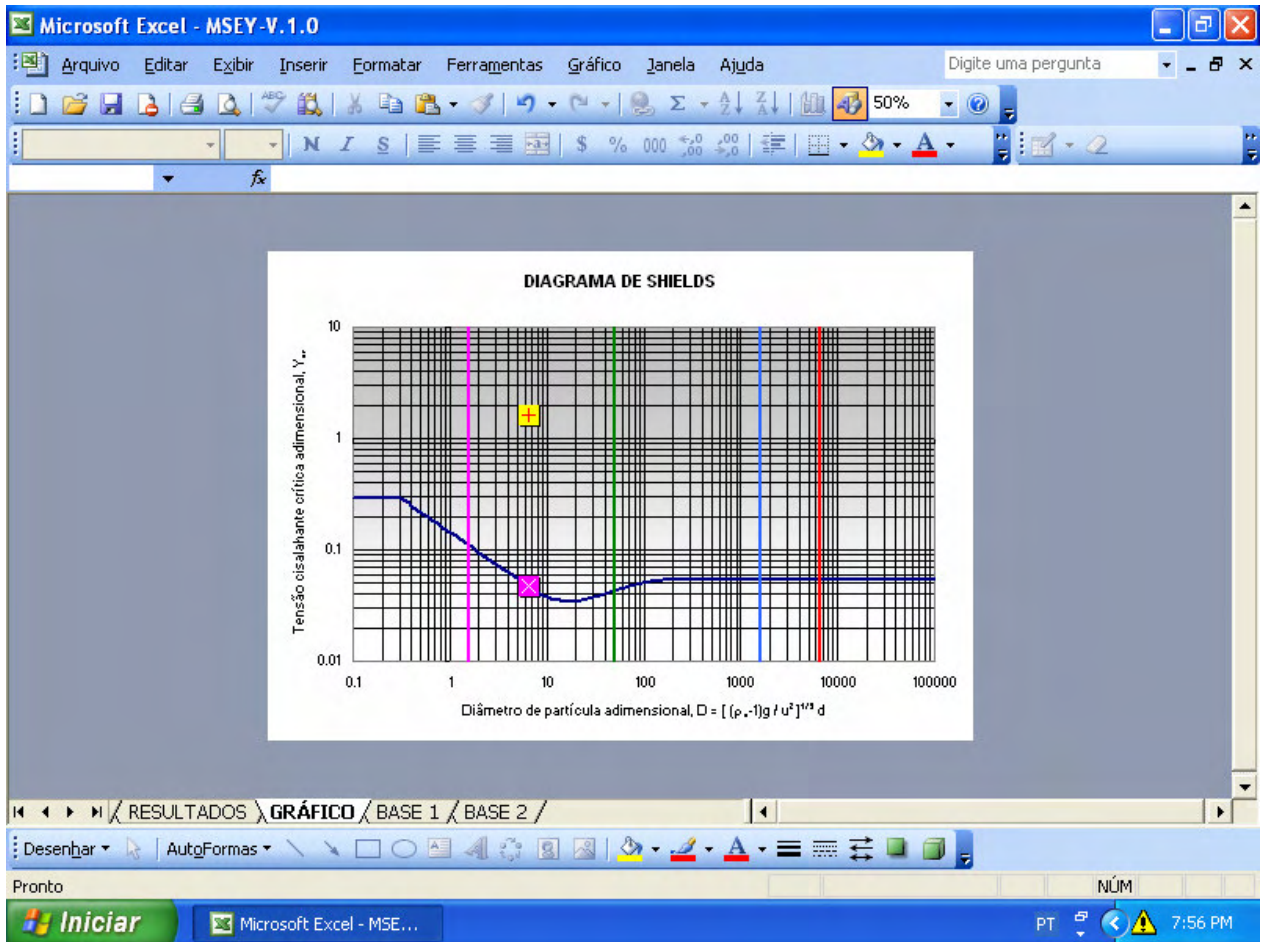


FIGURA 5A . Detalhes da planilha GRÁFICO.