

DANILO PAULÚCIO DA SILVA

MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM DE  
SUPERFÍCIE EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Tese apresentada à Universidade Federal  
de Viçosa, como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola, para obtenção do  
título de *Doctor Scientiae*.


VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2011


DANILO PAULÚCIO DA SILVA

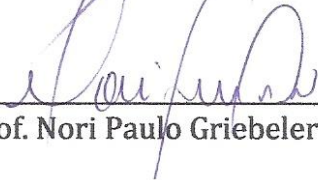
MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM DE  
SUPERFÍCIE EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.


APROVADA: 09 de dezembro de 2011.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos Alexandre B. de Carvalho

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Márcio Mota Ramos

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Nori Paulo Griebeler

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Paulo Roberto Cecon  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Fernando Falco Pruski  
(Orientador)

*Dedico este trabalho*

Aos meus pais, Darci e Neide.

Aos meus irmãos, Darcila, Daiane, Daisa e Dailson.

À Flávia Mariani Barros.

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Darci e Neide, meus grandes professores da vida. Por terem me ensinado o respeito, a educação, a honestidade e, a cima de tudo, por me amarem.

Aos meus irmãos, Darcila, Daiane, Daisa e Dailson, que me incentivaram e apoiaram sempre.

Aos meus sobrinhos, Raul, Raquel e Helena, que mesmo sem saberem, me motivaram de maneira que eu desse sempre o meu melhor.

À minha noiva Flávia Mariani Barros, pelo amor, carinho e companheirismo. Por estar sempre ao meu lado compartilhando dos momentos difíceis e de felicidade vividos durante o período em que esse trabalho foi desenvolvido.

Ao professor Fernando Falco Pruski, por tudo que me ensinou, pela confiança e pela amizade. Por mais uma vez ter sido, além de um excelente orientador, um segundo pai para mim.

Ao professor Paulo Roberto Cecon e ao Dr. José Márcio Alves da Silva, pelos conselhos durante a realização deste trabalho.

Aos professores Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Márcio Mota Ramos e Nori Paulo Griebeler, pelas valiosas sugestões.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Antônio Calazans, pessoa quem eu considero como se fosse um irmão mais velho. Pelo companheirismo, amizade, pelos conselhos e críticas e, claro, pelo habitual bom humor.

Ao amigo Luciano Zambonin, cuja competência e dedicação foram de grande importância para o êxito deste trabalho.

Aos amigos da computação, Willian e Gustavo, que, com seriedade, presteza e competência, muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos grandes amigos, André, Fabrício Moreira, Paulo Ciclone, Flávio Caxambú, João Batista e David Palomino que me aconselharam e ajudaram durante esta jornada.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Chicão e Eduardo, que, além de me ajudar, também me ensinaram.

Aos amigos Eloy, Marcelo Rocha, Marcelo Agenciano e Raimundo Alípio.

Aos amigos e colegas de trabalho, Adriana, João Paulo, Nívia e Morgana.

Aos estudantes, Andressa, Christina, Luane, Marcell e Natália, pelo empenho e competência na realização dos trabalhos

Aos Amigos do CRRH, em especial o Donizete, Hugo, Bruno, Luan e David.

Aos amigos Gustavo Sessa, Maristela Dias e Yhasmim Paiva, companheiros de graduação, mestrado, doutorado e, se Deus quiser, serão para o resto da vida.

Finalmente, aos não citados pelo esquecimento no momento em que escrevo este agradecimento, nem por isso menos importantes, aceitem além do muito obrigado, o meu pedido de desculpas.

## **BIOGRAFIA**

DANILO PAULÚCIO DA SILVA, filho de Darci Carneiro da Silva e Neide Maria Paulúcio da Silva, nasceu no dia 29 de março de 1984, em Muniz Freire, Estado do Espírito Santo.

Em fevereiro de 1999, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Alegre-ES, onde obteve a formação de Técnico Agrícola com Habilitação em Pecuária, em dezembro de 2001.

No primeiro semestre de 2002, ingressou na Universidade Federal do Espírito Santo, concluindo o curso de Agronomia em julho de 2006.

Em outubro de 2006, iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2009.

Iniciou, em março de 2009, o Doutorado em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em dezembro de 2011.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xvi
RESUMO .....	xvii
ABSTRACT .....	xix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Estradas não pavimentadas: características e importância social e econômica.....	3
2.2. Erosão em estradas não pavimentadas.....	5
2.3. Fatores que interferem na ocorrência da erosão hídrica em estradas não pavimentadas.....	7
2.4. Controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas.....	9
2.5. Sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas .....	10
2.5.1. Abaulamento e superelevação do leito da estrada.....	11
2.5.2. Canais de escoamento .....	13
2.5.3. Estruturas para retenção e infiltração da água drenada de estradas .....	14
2.6. Resistência mecânica do solo à ação erosiva.....	17
2.7. Modelagem hidrológica associada às estradas não pavimentadas.....	18
2.7.1. Modelos empíricos.....	20
2.7.1.1. WARSEM.....	20
2.7.1.2. USLE e modificações .....	21
2.7.1.3. ROADMOD .....	22
2.7.2. Modelos baseados em processos físicos.....	23
2.7.2.1. WEPP.....	23
2.7.2.2. KINEROS2.....	24

2.7.2.3. GA-UH/GA-KW associados a curvas de taxa de sedimentos .....	24
2.7.2.4. Modelo Estradas .....	25
2.7.2.5. Modelo desenvolvido por Silva (2009).....	26
2.8. Geradores de séries sintéticas de dados climáticos .....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1. Desenvolvimento do modelo para a determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros .....	30
3.1.1. Obtenção da série sintética de dados de precipitação .....	30
3.1.2. Modelagem do escoamento superficial .....	32
3.1.2.1. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial no leito da estrada .....	33
3.1.2.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial no canal da estrada .....	34
3.1.3. Determinação da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial.....	35
3.1.4. Perda de solo provocada pelo escoamento.....	36
3.1.5. Aprofundamento máximo tolerável no canal de drenagem.....	38
3.1.6. Perda de solo tolerável no canal.....	38
3.1.7. Espaçamento entre desaguadouros.....	39
3.2. Desenvolvimento do modelo computacional para o cálculo do espaçamento máximo entre desaguadouros e dimensionamento da bacia de infiltração.....	41
3.2.1. Módulo para o dimensionamento de bacias de infiltração .....	41
3.2.1.1. Cálculo do volume armazenado.....	42
3.2.1.1.1. Cálculo do volume remanescente para bacias de formato retangular com seção triangular.....	45
3.2.1.1.2. Cálculo do volume remanescente para bacias de formato retangular com seção trapezoidal.....	46
3.2.1.1.3. Cálculo do volume remanescente para bacias circulares.....	47
3.2.1.1.4. Cálculo do volume remanescente para bacias semicirculares.....	48
3.2.1.2. Volume requerido para a bacia de infiltração.....	49



3.2.2. Representação do algoritmo desenvolvido para a aplicação do software .....	49
3.3. Avaliação do modelo.....	52
3.3.1. Análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os observados em campo.....	53
3.3.1.1. Caracterização da área de estudo .....	53
3.3.1.2. Dados de precipitação .....	54
3.3.1.3. Sistema de monitoramento .....	54
3.3.1.4. Análises estatísticas para a comparação dos dados estimados e observados.....	57
3.3.1.4.1. Análise de regressão linear passando pela origem.....	57
3.3.1.4.2. Índice de concordância de Willmott.....	59
3.3.2. Análise de sensibilidade do modelo.....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
4.1. Software para a aplicação do modelo .....	63
4.2. Avaliação do modelo.....	77
4.2.1. Análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os observados em campo.....	77
4.2.2. Análise de sensibilidade do modelo.....	87
4.2.2.1. Análise do modelo com base na erodibilidade do solo.....	87
4.2.2.2. Análise do modelo com base na tensão crítica de cisalhamento .....	92
4.2.2.3. Análise do modelo com base na declividade do canal .....	95
5. CONCLUSÕES.....	97
6. RECOMENDAÇÕES.....	98
7. REFERÊNCIAS .....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  = área da seção transversal do escoamento,  $m^2$ ;
- $A_c$  = área de contribuição da estrada para a bacia de infiltração,  $m^2$ ;
- $A_{p_{est}}$  = Aprofundamento do canal da estrada estimado pelo modelo, cm;
- $A_{p_{obs}}$  = Aprofundamento do canal da estrada observado em campo, cm;
- $a_{pm}$  = aprofundamento máximo tolerável, cm;
- $A_s$  = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo da perda de solo no canal da estrada,  $cm^2$ ;
- $a, b, c, d$  = parâmetros da função dupla exponencial relativos ao evento de precipitação, adimensionais;
- $B$  = comprimento da base da bacia de infiltração;
- $d$  = índice de concordância de Willmott;
- $D$  = duração total da precipitação, h;
- $E_{max}$  = espaçamento máximo entre desaguadouros, m;
- $E_{max_1}$  = espaçamento máximo entre desaguadouros, obtido pelo modelo para o menor valor de entrada, m;
- $E_{max_2}$  = espaçamento máximo entre desaguadouros, obtido pelo modelo para o maior valor de entrada, m;
- $E_{max_{12}}$  = média dos espaçamentos máximos entre desaguadouros, obtida com os valores de entrada, m;
- $h$  = profundidade do escoamento no leito da estrada, m;
- $H_i$  = altura atingida pela água na bacia de infiltração correspondente ao volume armazenado do dia  $i$ , m;
- $i^*$  = intensidade instantânea de precipitação padronizada, adimensional;
- $I_1$  = menor valor de entrada da variável em análise;
- $I_2$  = maior valor de entrada da variável em análise;
- $I_{12}$  = média dos valores de entrada;
- $i_{med}$  = intensidade média de precipitação;
- $k$  = talude da bacia de infiltração de formato semicircular;

K	= erodibilidade do solo, $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ;
K'	= fator de frequência, adimensional;
L	= comprimento do canal da estrada, m;
LES	= lâmina de escoamento superficial, mm;
LES*	= lâmina de escoamento superficial adimensionalizada;
L <sub>B</sub>	= largura da bacia de infiltração, m;
m <sub>1</sub> e m <sub>2</sub>	= taludes do canal de drenagem da estrada com seção triangular, $\text{m m}^{-1}$ ;
n	= coeficiente de rugosidade do terreno, $\text{s m}^{-1/3}$ ;
n <sub>a</sub>	= número de anos da série histórica considerada;
P	= lâmina total precipitada, mm;
pm	= período de manutenção da estrada, anos;
$\overline{\text{PS}}_l$	= perda de solo média anual ocorrida no comprimento l considerando todos os eventos de precipitação da série sintética, g;
PS <sub>l,e</sub>	= perda de solo provocada pelo escoamento superficial, g;
PS <sub>man</sub>	= perda de solo máxima tolerável por ano durante o período de manutenção da estrada, g;
PS <sub>t</sub>	= perda de solo tolerável, g;
q	= vazão por unidade de largura na direção x, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ;
Q	= vazão escoada no canal, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;
QMR	= quadrado médio do resíduo;
r <sup>2</sup>	= coeficiente de determinação;
R'	= raio da esfera correspondente à bacia de infiltração considerado para efeito de cálculo, m;
R	= raio da bacia de infiltração, m;
R <sub>h</sub>	= raio hidráulico, m;
S	= declividade do canal, $\text{m m}^{-1}$ ;
s <sub>1</sub>	= talude de jusante da bacia de infiltração de formato retangular, $\text{m m}^{-1}$ ;
s <sub>2</sub>	= talude de montante da bacia de infiltração de formato retangular, $\text{m m}^{-1}$ ;
S <sub>f</sub>	= declividade da linha de energia, $\text{m m}^{-1}$ ;
S <sub>M</sub>	= sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;
S <sub>o</sub>	= declividade da superfície do solo, $\text{m m}^{-1}$ ;
SQ <sub>total</sub>	= soma de quadrados total;
SQ <sub>Reg</sub>	= soma de quadrados da regressão;

$t$	= tempo, s;
$T$	= período de retorno, anos;
$t^*$	= tempo padronizado, adimensional;
$t_i^*$	= tempo de início do escoamento superficial, adimensional;
$t_f^*$	= tempo de fim do escoamento superficial, adimensional;
$Tie_{bac}$	= taxa de infiltração estável da água no solo da bacia de infiltração, mm h <sup>-1</sup> ;
$Tie_{est}$	= taxa de infiltração da água no solo do leito da estrada; mm h <sup>-1</sup> ;
$tp^*$	= tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, adimensional;
$V_A$	= volume armazenado na bacia de infiltração, m <sup>3</sup> ;
$VES$	= volume de escoamento superficial, m <sup>3</sup> ;
$\bar{V}_{max}$	= média dos volumes máximos armazenados, m <sup>3</sup> ;
$VR$	= volume armazenado remanescente do dia anterior, m <sup>3</sup> ;
$Vs$	= volume de solo a ser removido pela erosão, cm <sup>3</sup> ;
$V(\hat{\beta}_1)$	= variância de $\beta_1$ ;
$x$	= distância percorrida pelo escoamento, m;
$y$	= profundidade do escoamento no canal da estrada, m;
$\alpha$	= parâmetro para a obtenção $q$ ;
$\alpha_c$	= parâmetro obtido considerando as condições de escoamento no canal;
$\beta$	= parâmetro para a obtenção $q$ ;
$\beta_c$	= parâmetro obtido considerando as condições de escoamento no canal;
$\beta_1$	= coeficiente angular da função linear com intercepto passando pela origem;
$\Delta t$	= intervalo de tempo de ocorrência do escoamento superficial, min;
$\Delta t_{inf}$	= intervalo de tempo em que ocorre a infiltração da água no solo da bacia durante o dia $i$ , h.
$\Delta H_i$	= rebaixamento do nível da água na bacia no dia $i$ , m;
$\varepsilon_i$	= erro.
$\gamma$	= peso específico da água, kgf m <sup>-3</sup> ;
$\rho_s$	= massa específica do solo, g cm <sup>-3</sup> ;
$\sigma$	= desvio-padrão dos volumes máximos armazenados em cada ano da série, adimensional;
$\tau'$	= tensão provocada pelo escoamento, kgf m <sup>-2</sup> ;

- $\tau$  = tensão provocada pelo escoamento, Pa;
- $\tau_M$  = tensão média de cisalhamento provocada pelo escoamento durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ , Pa;
- $\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento do solo, Pa;
- $\tau_{(i)}$  = tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento no tempo  $i$ , Pa; e
- $\tau_{(i+1)}$  = tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento no tempo  $i+1$ , Pa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil transversal de uma estrada com superfície abaulada. ....	11
Figura 2 - Perfil transversal de uma estrada com superelevação.....	12
Figura 3 - Perfis de estradas com superelevação.....	13
Figura 4 - Bacias de infiltração para a contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas.....	16
Figura 5 - Perfil de precipitação adimensionalizado em formato de uma função dupla exponencial. ....	31
Figura 6 - Representação esquemática da subdivisão do leito da estrada para a determinação do hidrograma no canal de drenagem da estrada.....	32
Figura 7 - Representação dos taludes de um canal de drenagem triangular.....	35
Figura 8 - Representação da variação da tensão cisalhante com o tempo para o escoamento superficial, indicando o intervalo de tempo no qual se processa a liberação de sedimentos.....	38
Figura 9 - Bacia de infiltração retangular com seção transversal triangular.....	42
Figura 10 - Perfil de precipitação adimensionalizado.....	43
Figura 11 - Bacia de infiltração retangular com seção transversal trapezoidal.....	46
Figura 12 - Bacia de infiltração circular.....	47
Figura 13 - Representação esquemática de uma calota esférica.....	48
Figura 14 - Bacia de infiltração semicircular.....	48
Figura 15 - Fluxograma simplificado do algoritmo para a aplicação do modelo.....	51
Figura 16 - Adequação do leito da estrada. ....	55
Figura 17 - Construção do canal de drenagem da estrada. ....	56
Figura 18 - Esquema do sistema de medição do aprofundamento em uma seção transversal do canal da estrada.....	57
Figura 19 - Tela de apresentação do software. ....	63
Figura 20 - Módulo de entrada de dados da estrada. ....	64
Figura 21 - Leito da estrada com superelevação.....	65

Figura 22 - Telas para orientar o preenchimento dos valores das variáveis taxa de infiltração estável (A), semilargura (B).....	66
Figura 23 - Módulo para a inserção dos dados do canal da estrada.....	67
Figura 24 - Módulo para entrada dos dados referentes a bacias de infiltração circulares (A) e semicirculares (B). ....	69
Figura 25 - Módulo para entrada dos dados referentes a bacias de infiltração retangulares com seção triangular (A) e com seção trapezoidal (B).....	70
Figura 26 - Módulo para a inserção dos dados relacionados à precipitação.....	71
Figura 27 - Módulo de seleção da estação pluviométrica do software ClimaBr para a geração da série sintética de precipitação.....	72
Figura 28 - Tela para a orientação a respeito de dados que não foram preenchidos.....	73
Figura 29 - Tela indicando o andamento das simulações para a determinação do espaçamento entre desaguadouros e do volume da bacia de infiltração.....	73
Figura 30 - Tela apresentando os resultados gerados pelo software. ....	74
Figura 31 - Módulo para alteração das características pertinentes às bacias de infiltração.....	75
Figura 32 - Relatório gerado pelo software apresentando as variáveis de entrada consideradas e os resultados fornecidos pelo software. ....	76
Figura 33 - Dados de aprofundamento estimados pelo modelo <i>versus</i> os observados em campo obtidos ao longo do canal e em diferentes datas, sendo os valores estimados obtidos com o modelo, considerando-se o cálculo da tensão cisalhante realizado por meio da equação da resistência ao cisalhamento utilizando a profundidade de escoamento ( $y$ ) (equação 11).....	78
Figura 34 - Dados de aprofundamento estimados pelo modelo <i>versus</i> os observados em campo obtidos ao longo do canal e em diferentes datas, sendo os valores estimados obtidos com o modelo, considerando-se o cálculo da tensão cisalhante realizado por meio da equação original da resistência ao cisalhamento (equação 10). ....	80
Figura 35 - Aprofundamento observado ao longo do trecho monitorado medido em diferentes datas ao longo do período de observação. ....	81

Figura 36 - Ilustração da irregularidade do aprofundamento ao longo do canal em condições reais de campo.....	82
Figura 37 - Aprofundamento acumulado médio normalizado ocorrido no canal ao longo do período de observação em função da tensão erosiva normalizada acumulada durante o período de observação.....	83
Figura 38 - Valores médios do aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal em função dos valores observados. ....	84
Figura 39 - Aprofundamento médio estimado ( $Apf_{est}$ ) e observado nos pontos que apresentaram maior ( $Apf_{obs(ev+)}$ ) e menor ( $Apf_{obs(ev-)}$ ) evolução do aprofundamento do canal em função do comprimento do canal da estrada.....	86
Figura 40 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de erodibilidade do solo ( $K$ ), $g\ cm^{-2}\ min^{-1}\ Pa^{-1}$ .....	88
Figura 41 - Aprofundamento ao longo do canal da estrada, considerando os resultados obtidos para a erodibilidade de $0,001\ g\ cm^{-2}\ min^{-1}\ Pa^{-1}$ , sendo os campos I, II e III referentes aos trechos em que a taxa de aprofundamento foi aproximadamente igual a zero, crescente e aproximadamente constante, respectivamente.....	89
Figura 42 - Esquema ilustrativo do aprofundamento no canal da estrada, sendo que as linhas em azul representam o aprofundamento acumulado estimado pelo modelo considerando-se os diversos eventos de escoamento no canal. Os pontos presentes na figura mostram, para cada evento considerado, o comprimento do canal a partir do qual o escoamento é capaz de desprender partículas de solo. ....	90
Figura 43 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ), Pa. ....	94
Figura 44 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de declividade do canal da estrada ( $S$ ).....	95



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do trecho de estrada monitorado.....	53
Tabela 2 - Dados de entrada relativos à condição-padrão considerada para as análises de sensibilidade.....	61
Tabela 3 - Valores adotados para a realização das análises de sensibilidade do modelo às variáveis erodibilidade, tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal da estrada.....	62
Tabela 4 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável erodibilidade do solo, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros (E <sub>max</sub> ) obtidos para 10 cm de profundidade do canal .....	92
Tabela 5 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável tensão crítica de cisalhamento, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros (E <sub>max</sub> ) obtidos para 10 cm de profundidade do canal .....	94
Tabela 6 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável declividade do canal da estrada, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros obtidos para 10 cm de profundidade do canal .....	96

## RESUMO

SILVA, Danilo Paulúcio da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2011. **Modelo para dimensionamento de sistemas de drenagem de superfície em estradas não pavimentadas.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e José Márcio Alves da Silva.

A erosão causada pela concentração do escoamento superficial é um dos principais problemas relacionados às estradas não pavimentadas, uma vez que gera prejuízos expressivos de ordem social, econômica e ambiental. Tendo em vista a importância do desenvolvimento de metodologias para o controle da erosão hídrica em estradas não pavimentadas mais condizentes com os processos que ocorrem em condições reais de campo, desenvolveu-se este trabalho, cujos objetivos foram: desenvolver e avaliar um modelo para o dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas; e desenvolver um software para aplicação do modelo proposto. No modelo utilizam-se séries sintéticas de precipitação, com as quais é realizada a análise diária do escoamento no canal da estrada e do desprendimento de partículas provocado por este. O espaçamento máximo entre desaguadouros é definido como sendo aquele em que a somatória das perdas de solo que ocorrem no canal, considerando-se a análise de todos os eventos da série histórica de dados de precipitação, é inferior ao valor correspondente à perda de solo tolerável. Visando facilitar a utilização do modelo, foi desenvolvido um software. O modelo foi avaliado com base na realização de análise comparativa entre os dados estimados e os observados em condições de campo e, ainda, a partir da aplicação de testes de sensibilidade do modelo às principais variáveis de entrada. Os dados observados foram obtidos a partir do monitoramento do aprofundamento do canal de um trecho de estrada não pavimentada localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa. De acordo com os resultados, observou-se que o modelo apresentou boa estimativa do aprofundamento do canal, tanto em escala temporal (durante o período em que os dados de campo foram obtidos) quanto em escala espacial (ao longo do canal). O

modelo apresentou maior sensibilidade à variação das variáveis tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal, e menor sensibilidade à variação da erodibilidade do solo. O software desenvolvido para aplicação do modelo proposto (SiDE) permite, de forma rápida e fácil, a determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros e o dimensionamento de bacias de infiltração.

## ABSTRACT

SILVA, Danilo Paulúcio da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2011. **Model for the design of surface drainage systems for unpaved roads.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-Advisers: Paulo Roberto Cecon and José Márcio Alves da Silva.

Erosion caused by the concentration of surface runoff is one of the main problems related to unpaved roads, one which generates expressive losses at social, economical and environmental levels. Having in mind the importance of the development of methodologies for the water erosion control in unpaved roads, similar to the processes recurrent in real field conditions, this work was developed, of which the objectives were: to develop, as well as to evaluate, a model for the design of drainage systems for unpaved roads; to develop a software for application on the proposed model. In that model, synthetic rainfall data are used for the performance of daily analysis of runoff at the ditch and resulting detachment of particles. The maximum spacing between road mitre drains is defined as the one in which the sum of the ditch soil losses, taking into consideration the analysis of all events of the precipitation series data, is less than the value corresponding to the tolerable soil loss. Aiming at making it easier to use the model, a software was developed. Evaluation of the model was based on comparative analysis between predicted data by the model and observed data in field, and, also, from application of the model's sensitivity tests to the main input variables. Observed data were obtained from monitoring of ditch deepening in a portion of an unpaved road within the Viçosa Federal University campus. According to the results, it was observed that the model presented good prediction of the ditch deepening, either in temporal scale (during the period in which the field data were recorded) or in spatial scale (along the ditch). More sensitivity was displayed by the model towards the variation of the variables soil critical shear stress and the ditch slope, and less sensitivity towards the soil erodibility. The software developed for application at the proposed model (SiDE) offers an easy

and fast way for determining the maximum spacing between mitre drains and the proper design of the infiltration basins.

## 1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de uma malha rodoviária em boas condições é fundamental para garantir o avanço econômico e social de um país (CROSSLEY, 2001; LUGO; GUCINSKI, 2000). O Brasil, assim como a maioria dos países, apresenta uma malha rodoviária composta predominantemente por estradas não pavimentadas (também conhecidas como estradas vicinais, rurais ou estradas de terra). De acordo com os dados publicados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2011a), dos 1.581.106 km de estradas que compõem a malha rodoviária brasileira, 86 % são compostos por estradas não pavimentadas.

A ocorrência do processo erosivo provocado pela água que cai no leito e nas regiões marginais das estradas não pavimentadas é um dos principais problemas relacionados a estas estradas (GRIEBELER et al., 2009). De acordo com Zoccal (2007), cerca de 70% das perdas anuais de solo no Estado de São Paulo, que correspondem a um valor superior a 200 milhões de toneladas, são provenientes de estradas não pavimentadas, e que aproximadamente 50% desse volume de solo perdido chega aos cursos d'água.

As estradas não pavimentadas também têm sido citadas como sendo a principal fonte de sedimentos em áreas florestais (EGAN, 1999; MACHADO et al., 2003b; FORSYTH et al., 2006; THOMPSON et al., 2010). Rummer et al. (1997) citam estudos em que estradas florestais não pavimentadas afetadas pelo tráfego são responsáveis por até 99% das perdas de solo nestas áreas. Grace III (2002) reitera que a erosão em estradas florestais é, também, a principal causa do assoreamento dos cursos d'água em áreas de florestas plantadas.

No controle da erosão em estradas não pavimentadas, assim como em outras áreas, é necessário atuar de maneira eficiente na origem do problema, que é o escoamento superficial. De acordo com o *Maine Department of Environmental Protection* - MDEP (2010), cerca de 80% dos problemas relacionados às estradas não pavimentadas estão associados as questões de má drenagem da estrada.

Visando ao desenvolvimento de uma ferramenta para o auxílio no controle da erosão em estradas não pavimentadas, Griebeler et al. (2005a) criaram um modelo para o cálculo do espaçamento máximo entre desaguadouro e dimensionamento de bacias de infiltração nessas estradas. O modelo desenvolvido considera, para a determinação do espaçamento entre os desaguadouros, as condições do escoamento no canal e as características de resistência do solo à erosão. Para a determinar a tensão de cisalhamento associada ao escoamento superficial, é considerada no modelo a intensidade máxima média de precipitação relativa à chuva intensa associada a determinado período de retorno.

No dimensionamento de sistemas de drenagem e estruturas hidráulicas destinadas ao controle da erosão em estradas não pavimentadas, a utilização de uma única chuva intensa é um critério muito empregado. Contudo, esse critério não é capaz de refletir as reais condições de ocorrência da erosão, uma vez que podem ocorrer, durante um ano, mais chuvas com potencial para provocar perdas de solo, ou seja, chuvas de menores magnitudes, porém com capacidade de gerar escoamento superficial com tensão cisalhante superior à tensão crítica de cisalhamento do solo.

Na modelagem das perdas de água e solo, o critério mais adequado é o que considera a análise evento a evento de precipitação, ou seja, aquele em que é levado conta o efeito aditivo de precipitações que ocorrem durante o intervalo de tempo considerado.

Tendo em vista a necessidade de se desenvolver metodologias para a implementação de técnicas mais confiáveis para o projeto de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas, realizou-se este trabalho, cujos objetivos foram:

- desenvolver um modelo físico-matemático para obtenção do espaçamento máximo entre desaguadouros em estradas não pavimentadas com base na análise evento a evento de escoamento superficial e das respectivas perdas de solo que ocorrem ao longo do canal de drenagem destas estradas;
- desenvolver um software para a aplicação da metodologia proposta e incorporar neste o modelo de dimensionamento de bacias de infiltração em estradas desenvolvido por Silva (2009); e
- avaliar os resultados obtidos pelo modelo proposto.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estradas não pavimentadas: características e importância social e econômica**

Estradas não pavimentadas, também conhecidas como estradas de terra, vicinais, agrovias ou estradas rurais, são aquelas caracterizadas pela ausência de revestimento, com pavimento constituído com materiais locais apenas conformados ou por possuírem algum tipo de revestimento primário (OLIVEIRA, 2005). Além do aspecto relacionado ao revestimento, Gallego et al. (2008b) afirmam que as estradas não pavimentadas possuem como característica baixo volume de tráfego, geralmente menor que 500 veículos por dia, cujo uso está relacionado a atividades agrícolas, pecuária ou para acesso a áreas florestais.

A disponibilidade de uma malha rodoviária em boas condições é fundamental para garantir o avanço econômico e social de um país (CROSSLEY, 2001; LUGO; GUCINSKI, 2000). Baesso e Gonçalves (2003) atribuem às estradas a capacidade de romper as barreiras que levam ao empobrecimento das comunidades, ao mesmo tempo em que são importantes agentes indutores de crescimento proporcionando assim grandes benefícios sociais e econômicos.

Do ponto de vista social, estradas não pavimentadas consistem em uma infra-estrutura essencial para as comunidades rurais, sendo variados os benefícios a elas atribuídos. Diversos trabalhos realizados no Brasil e no mundo reportam aspectos positivos associados às estradas e sua contribuição à melhoria da qualidade de vida da população rural. Lugo e Gucinski (2000) salientam a importância dessas estradas no acesso das pessoas à educação, ao trabalho e à contemplação da natureza, características estas também evidenciadas por Oliveira (2005) e Gallego et al. (2008a), que acrescentam ainda o fato de as rodovias também promoverem o acesso à saúde, ao lazer e comércio. Viviane e Ramos (2006) expõem que as estradas não pavimentadas são, na maioria das vezes, o



único caminho das comunidades rurais na busca por serviços essenciais disponíveis apenas nos centros urbanos.

De acordo com Gallego et al. (2008a), estradas não pavimentadas podem ser utilizadas para determinada finalidade que, normalmente, são atribuídas às rodovias principais, tal como a comunicação entre comunidades vizinhas e, também, para serviços de emergência.

Para Lugo e Gucinski (2000), estradas também podem ser consideradas constituintes de determinado ecossistema. Estas permitem o acesso a áreas de lazer e sua mera existência possibilita ao público um maior conhecimento do mundo rural. Estes mesmos autores destacam ainda a importância da manutenção dessas estradas para qualidade de vida da sociedade e melhoria da segurança com relação ao tráfego de veículos.

Estudos realizados por Carvalho et al. (2010) mostram que o transporte rural é importante ferramenta de integração social, uma vez que possibilita o deslocamento até as cidades mais próximas e, conseqüentemente, permite o acesso a uma ampla variedade de serviços. Esses mesmos autores evidenciaram ainda a relação entre estradas não pavimentadas com problemas de manutenção e dificuldades relacionadas ao transporte escolar e a exposição dos estudantes a situações desconfortáveis ou até mesmo de risco à segurança destes.

As estradas não pavimentadas também são de grande importância para a economia brasileira, uma vez que, de acordo com Ruas et al. (2008), a produção de produtos primários de origem agrícola representa parcela significativa da economia do país. O escoamento desses produtos depende dessas estradas em boas condições de trafegabilidade, dado que esse tipo de rodovia normalmente está presente na primeira fase do transporte, que é o caminho que vai da propriedade rural até os pontos de comercialização. Nunes (2003) afirma que essas vias exercem a função de “alimentadoras”, ou seja, por meio delas é estabelecida a ligação entre as comunidades produtoras e as grandes rodovias pavimentadas, por onde circularão as mercadorias até o seu destino final.

Rodovias que apresentam problemas de trafegabilidade afetam diretamente o valor final dos produtos, interferindo no lucro e no preço dos produtos comercializados (GRIEBELER et al., 2009). No setor florestal, Lopes et al. (2002) ressaltam o papel estratégico das estradas não pavimentadas, uma vez que o valor final da madeira está diretamente relacionado às condições de trafegabilidade

dessas. Estudos publicados por Machado et al. (2003a) indicam que os gastos com o transporte da madeira podem representar até 50% do seu custo final, dependendo das condições das rodovias.

De acordo com Crossley (1998), o desempenho e os custos operacionais dos veículos são fortemente afetados pelas condições das estradas na qual eles trafegam. Dados publicados pelo DNIT (2011b) mostram que cada R\$ 1,00 investido na melhoria das condições de tráfego das rodovias pode gerar uma economia de até R\$ 3,00 nos gastos operacionais dos veículos.

## **2.2. Erosão em estradas não pavimentadas**

Em regiões de clima tropical, o principal agente causador da erosão é a chuva, seja pelo impacto direto das gotas, seja pela eventual ocorrência do escoamento superficial (PRUSKI, 2009). Há ainda a erosão causada pela ação do vento; entretanto, esta não será considerada nesse trabalho, haja vista que a ocorrência dessa é inexpressiva diante da erosão hídrica para as condições de chuvas intensas características das regiões brasileiras.

O escoamento superficial, quando se concentra ao longo do canal de drenagem da estrada e atinge determinada tensão cisalhante com magnitude superior à tensão crítica de cisalhamento do solo, passa desprender partículas desse solo, podendo conduzir a processos erosivos intensos nesses canais, principalmente em se tratando de trechos com maior declividade. Essa forma de erosão, quando não controlada devidamente, pode causar grandes danos à estrada, podendo até chegar a comprometer as condições de tráfego (GRIEBELER et al., 2005a).

A ocorrência do processo erosivo provocado pela água que cai no leito e nas regiões marginais das estradas não pavimentadas consiste em um dos principais problemas a elas relacionados (GRIEBELER et al., 2009; SILVA, 2009). Por esse motivo, os problemas concernentes à erosão em estradas de terra devem ser analisados de forma mais criteriosa do que em estradas pavimentadas, tendo em vista a maior fragilidade do material do leito, o qual normalmente consiste do próprio material do local.

A erosão em estradas não pavimentadas é significativamente maior que aquela que ocorre em áreas adjacentes (MACDONALD et al., 2001; RAMOS-

SCHARRÓN; MACDONALD, 2005 e 2007a), uma vez que estas estradas influenciam os processos hidrológicos de determinada área de diversas formas, como: interceptação direta das gotas de chuva no leito da estrada; baixa taxa de infiltração da água no solo e, conseqüentemente, maior volume de escoamento superficial; e concentração do volume escoado em áreas adjacentes no canal de drenagem da estrada (FORSYTH et al., 2006).

Estudos relacionados à ocorrência da erosão hídrica em estradas não pavimentadas associadas a áreas agrícolas e florestais têm mostrado que essas estradas têm sido a principal fonte de sedimentos na Austrália (CONSTANTINI et al., 1999; FORSYTH et al., 2006; MOTHHA et al., 2004), Brasil (GRIEBELER et al., 2005a e 2005b; MACHADO et al., 2003b; OLIVEIRA et al., 2009;), Espanha (ARNÁEZ et al., 2004; JORDÁN e MARTÍNEZ-ZAVALA, 2008), Estados Unidos da América (RUMMER et al., 1997; ANDERSON e MACDONALD, 1998; KETCHENSON et al., 1999; RICE, 1999; ZIEGLER et al., 2000; MADEJ, 2001; KOLKA e SMIDT, 2004; RAMOS-SHARRÓN e MACDONALD, 2005, 2007a e 2007b; THOMPSON et al., 2010), Indonésia (RIJSDIJK et al., 2007), Quênia (JUNGERIUS et al., 2002), Nova Zelândia (FRANSEN et al., 2001) e Tailândia (ZINGLER et al., 2001a).

Ramos-Scharrón e MacDonald (2007a), em estudos quantitativos de produção de sedimentos em estradas não pavimentadas nas Ilhas Virgens Americanas, evidenciaram perdas de solo da ordem de  $57 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para uma estrada com 2% de declividade. Em estrada com as mesmas condições, porém, com declividade de 21%, as perdas de solo foram cerca de 10 vezes maiores, na ordem de  $580 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Estradas em condições inadequadas podem iniciar ou agravar processos erosivos em áreas agrícolas, prejudicando a produtividade e a lucratividade dos produtores rurais, além de afetarem a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos (GRIEBELER et al., 2005a). Estudos realizados por Jungerius et al. (2002), no Quênia, e por Nyssen et al. (2002), no nordeste da Etiópia, associam a construção de estradas à formação de voçorocas em áreas adjacentes a estas. Já Motha et al. (2004) e Thompson et al. (2010) destacam problemas ambientais relacionados à ocorrência do processo erosivo em estradas, como a poluição e o assoreamento de mananciais.

No setor florestal, as estradas não pavimentadas também respondem por grande parcela da ocorrência acelerada do processo erosivo nessas áreas (EGAN,

1999; MACHADO et al., 2003b; THOMPSON et al., 2010). Em estudo realizado para estimar a perda de solo em áreas florestais, Corrêa (2005) evidenciou que as áreas com cobertura florestal apresentaram perdas de solo inexpressivas quando comparadas às perdas de solo provenientes das estradas. Rummer et al. (1997) citam estudos onde estradas florestais não pavimentadas afetadas pelo tráfego são responsáveis por até 99% das perdas de solo em áreas florestais.

Estradas florestais não pavimentadas podem ocasionar mudanças nas propriedades do solo e, ainda, no comportamento geomorfológico e hidrológico de áreas adjacentes, podendo provocar aumentos significativos na erosão do solo e movimento de massa em razão da ocorrência de chuvas intensas (JORDÁN; MARTÍNEZ-ZAVALA, 2008).

Kolka e Smidt (2004) ressaltam que a erosão na camada superficial do solo pode ocasionar o decréscimo na produtividade de florestas plantadas, visto que nesta camada se encontram os maiores níveis de matéria orgânica e nutrientes. Além do processo de degradação do leito dessas vias, a erosão em estradas florestais tem sido citada como a principal causa do assoreamento e poluição dos cursos d'água nas florestas plantadas (GRACE III, 2002 e 2007; ANTONANGELO; FENNER, 2005; FORSYTH et al., 2006).

### **2.3. Fatores que interferem na ocorrência da erosão hídrica em estradas não pavimentadas**

De acordo com Ramos-Scharron e MacDonald (2007b), a erosão hídrica consiste, geralmente, na maior fonte de sedimentos em estradas não pavimentadas. Dentre os fatores responsáveis pela ocorrência da erosão e produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, os mais importantes são: intensidade e duração das chuvas; características do material que compõe a superfície da estrada; características da estrada relacionadas à drenagem; declividade; tráfego; e construção e manutenção das estradas e áreas externas que drenam para as estradas (MACDONALD; COE, 2008).

O impacto direto das gotas de chuva e a concentração do escoamento superficial são as principais fontes de energia que provocam a erosão hídrica nas estradas (FU et al., 2010). O fator neve também é citado na literatura como agente influenciador dos processos hidrológicos que interferem na ocorrência da erosão

hídrica em estradas. Contudo, este fator não será considerado nesse estudo, uma vez que a ocorrência da neve no Brasil se restringe a poucas localidades e em intervalos e quantidades pequenas.

Estradas não pavimentadas geralmente são construídas com materiais do próprio local em que elas estão instaladas ou das suas proximidades, podendo, portanto, apresentar características bastantes variadas no que diz respeito à erodibilidade do solo. De acordo com Geeves et al. (2000) (citado por FU et al., 2010) a erodibilidade do material da estrada é determinada por muitos atributos do solo, a exemplo da coesão, textura, estrutura e a presença de agentes cimentantes (matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio). A compactação das estradas não pavimentadas reduz as taxas de infiltração e, conseqüentemente, eleva taxa de escoamento superficial em relação a áreas agrícolas e florestais. Outro fator inerente à superfície das estradas que contribui para a ocorrência da erosão hídrica é a pouca ou nenhuma cobertura vegetal (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2007b).

A declividade do terreno em que as estradas são construídas tem sido considerada um dos fatores mais importantes na ocorrência da erosão hídrica, sendo as estradas com maiores declividades aquelas que tendem a apresentar maiores níveis de erosão. Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) mostraram resultados que sugerem aumento exponencial da produção de sedimentos, em virtude do aumento da declividade em estradas recentemente construídas ou submetidas a processos de manutenção da sua superfície de rodagem (geralmente uma a duas vezes por ano).

O volume de tráfego constitui outro fator que tem sido citado como importante agente causador do desprendimento de partículas em estradas (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2005; ZIEGLER et al., 2001b). Tal afirmação baseia-se no fato de que o esmagamento e a abrasão gerados na interface pneu/superfície do solo provocam a fragmentação de partículas grosseiras no leito da estrada e o desprendimento de finas partículas do solo (DUBÉ et al., 2004).

O aumento das perdas de solo em razão do tráfego tende a ser mais expressivo nos casos em que se tratar de uma estrada com maior intensidade de tráfego, maior quantidade de veículos pesados que se utilizam dessas estradas e tráfego durante a época das chuvas. Estudos realizados por Croke et al. (2006), no sudoeste da Austrália, indicam que para uma estrada de mesma largura e

declividade as perdas de solo foram cerca de 30 vezes maiores em estradas com maior intensidade de tráfego que aquelas com menor intensidade.

Estradas recentemente construídas apresentam, em geral, maior taxa de erosão. Isto ocorre comumente devido à maior proteção proporcionada pela vegetação que se desenvolve nos canais de drenagem, taludes ou até mesmo no leito de estradas construídas a mais tempo. De acordo com Forsyth (2006), atividades de manutenção, como o uso de máquinas motoniveladoras, pode aumentar as taxas de erosão do solo das estradas nos primeiros anos após a realização dessas. Entretanto, Fu et al. (2010) chamam a atenção para o fato de que nem todas as atividades de manutenção em estradas contribuem para o aumento do processo de produção de sedimentos. Essas atividades, quando bem manejadas, consistem em intervenções importantes para o controle da erosão por meio da melhoria das condições de drenagem do volume escoado na estrada.

Croke et al. (2006) expõem, ainda, que os taludes das estradas consiste um outro fator a ser considerado, uma vez que há situações em que, pela interceptação do escoamento sub-superficial, estes contribuem para aumento do volume escoado no canal de drenagem.

Os fatores relacionados à drenagem estão entre os mais importantes no controle da erosão hídrica em estradas não pavimentadas. Por se tratar do tema principal desse trabalho, tais fatores são discutidos separadamente e com maiores detalhes no item 2.5.

#### **2.4. Controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas**

De acordo com pesquisadores do MDEP (2010), a eficiência no controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas depende da adoção de práticas preventivas e manutenção regular da estrada, uma vez que após o início do processo erosivo, o controle deste se torna-se difícil. Dessa maneira, esses pesquisadores salientam que o controle do processo erosivo pode ser mais bem conduzido quando são observadas as seguintes práticas:

- monitorar e manter a base regular da estrada. A melhor hora para monitorar as estradas é durante a chuva, que é quando os problemas tornam-se mais evidentes;
- planejar cuidadosamente as atividades antes de colocá-las em prática;

- drenar a água da chuva para fora da estrada em intervalos frequentes e tão rápido quanto possível;
- manter a velocidade do escoamento a mais baixa possível;
- evitar a concentração do escoamento;
- evitar drenar a água escoada da estrada diretamente para os cursos d'água;
- minimizar as áreas de solo exposto nas margens da estrada, adotando práticas de estabilização, como a proteção dessas áreas a partir do uso de práticas vegetativas ou outra forma de proteção, por exemplo o uso de geotêxtil e enrocamento; e
- limitar o peso das cargas e minimizar o tráfego de veículos em épocas de chuvas.

Segundo o MDEP (2010), 80% dos problemas relacionados às estradas não pavimentadas estão associados à presença da água não drenada ou drenada de forma ineficiente da estrada. Assim, medidas voltadas para o controle dos prejuízos causados pela erosão em estradas não pavimentadas devem estar relacionadas a adoção de práticas que intervenham diretamente na causa do problema, ou seja, medidas capazes de evitar que a água proveniente do escoamento superficial, tanto aquele gerado na própria estrada como o proveniente das áreas nas suas margens, se acumule na estrada e passe a utilizá-la para o seu escoamento.

A água proveniente do escoamento do leito da estrada deve ser drenada nas suas laterais e encaminhada, de forma a não provocar erosão, para os escoadouros naturais, artificiais, bacias de infiltração ou outro sistema de retenção localizado no terreno marginal (GRIEBELER, 2002; GRIEBELER et al., 2009).

## **2.5. Sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas**

De acordo com Skorseth e Selim (2000), os três aspectos mais importantes a serem considerados na construção e manutenção de estradas não pavimentadas são drenagem, drenagem e drenagem. Mesmo em se tratando dos métodos mais adequados e do emprego de materiais mais resistentes para a construção de estradas não pavimentadas, uma drenagem inapropriada pode conduzir a

resultados insatisfatórios. Pesquisadores do *Massachusetts Department of Environmental Protection* (2001) acrescentam que o perfeito entendimento dos fundamentos da drenagem, ou do escoamento superficial, é decisivo na implantação de boas práticas para a conservação de estradas não pavimentadas.

Na implantação de um sistema de drenagem em estradas não pavimentadas devem-se considerar a declividade transversal do leito, a construção de canais de escoamento ao longo das margens da estrada e a implantação de canais para a remoção do escoamento superficial para fora da estrada. Em algumas situações, é necessário considerar a implantação de estruturas hidráulicas para a retenção e posterior infiltração do volume de escoamento superficial proveniente da estrada como sendo parte do sistema de drenagem.

A simples retirada do escoamento da estrada para áreas adjacentes que não tenham capacidade de receber esse volume de água escoado ou não se encontram preparadas para tal finalidade caracterizaria mera transferência de um problema que ocorre nas estradas para as referidas áreas.

Na sequência, são descritas as características dos componentes de um sistema de drenagem em estradas não pavimentadas.

### 2.5.1. Abaulamento e superelevação do leito da estrada

O abaulamento ou a superelevação são as principais formas de promover a retirada da água da superfície da estrada. Abaular a superfície de uma estrada significa criar um ponto de cota ligeiramente maior em seu centro, de modo que a água seja conduzida para as suas laterais (Figura 1). A superelevação (Figura 2) está relacionada à drenagem da água da superfície da estrada a partir da elevação de apenas um de seus lados (MDEP, 2010).

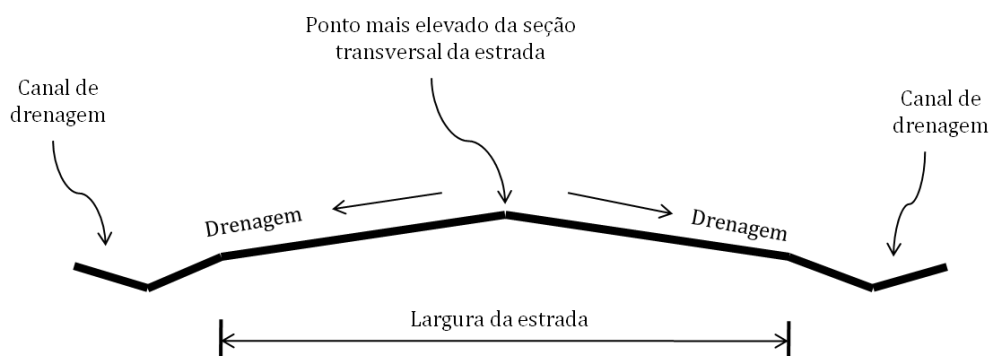


Figura 1 - Perfil transversal de uma estrada com superfície abaulada.



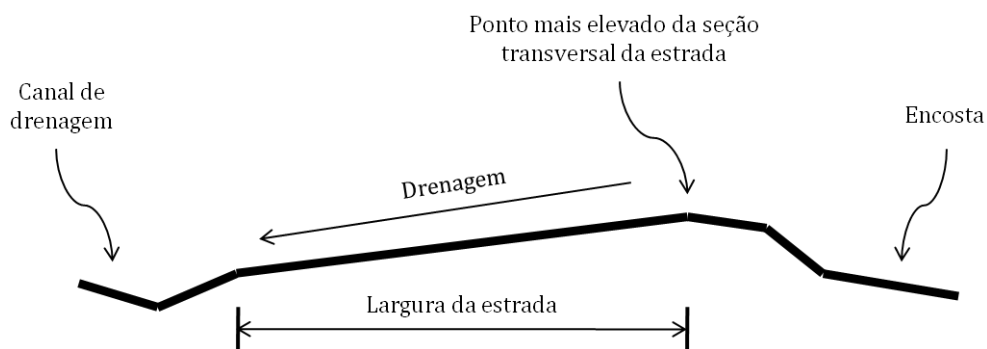


Figura 2 - Perfil transversal de uma estrada com superelevação.

De acordo com Griebeler et al. (2009), o abaulamento deve ser construído de forma que possibilite a rápida remoção da água da chuva, permitindo que a superfície não a retenha por muito tempo, evitando que a água escoe longitudinalmente sobre a estrada, concentrando-se e adquirindo força suficiente para erodi-la. Em estradas com superfície plana ou com baixa declividade transversal (sem o abaulamento) há tendência de ocorrer o empoçamento da água na sua superfície, favorecendo a ocorrência de buracos no leito da estrada (MDEP, 2010).

O abaulamento deve ser projetado levando-se em conta, além da necessidade de drenagem, a comodidade e segurança dos usuários. Baesso e Gonçalves (2003) sugerem um valor médio de 4% de declividade, uma vez que declividades transversais inferiores ao valor citado podem comprometer a drenagem superficial e, conseqüentemente, provocar a degradação da estrada, enquanto declividades mais elevadas oferecem menor segurança aos usuários da pista. Griebeler et al. (2009) citam estudos realizados por pesquisadores que sugerem que a declividade transversal do leito deve ser entre 2 e 8 %, dependendo da precipitação, do tipo de superfície e do tipo de veículos que transitam nessa estrada. Os autores chamam a atenção para o fato de que em vias nas quais trafegam veículos com cargas altas, a exemplo de caminhões com algodão ou aves, uma declividade transversal excessiva da pista poderá causar tombamento em curvas.

Em rodovias pavimentadas, a superelevação em trechos de curvas é prática comum e está relacionada a questões de segurança. Em estradas não pavimentadas essa prática também pode ser utilizada em trechos com conformação retilínea,

entretanto, com o objetivo de drenar a água que cai no leito para o canal de drenagem da estrada.

Na Figura 3 estão apresentadas duas formas de implantação da superelevação. O perfil transversal representado na Figura 3A é preferível quando possível, uma vez que é evitada a concentração da água no canal de drenagem das estradas. No dimensionamento do perfil transversal com o formato apresentado na Figura 3A é necessário levar em consideração as características da área que irá receber o escoamento e questões de segurança do tráfego.

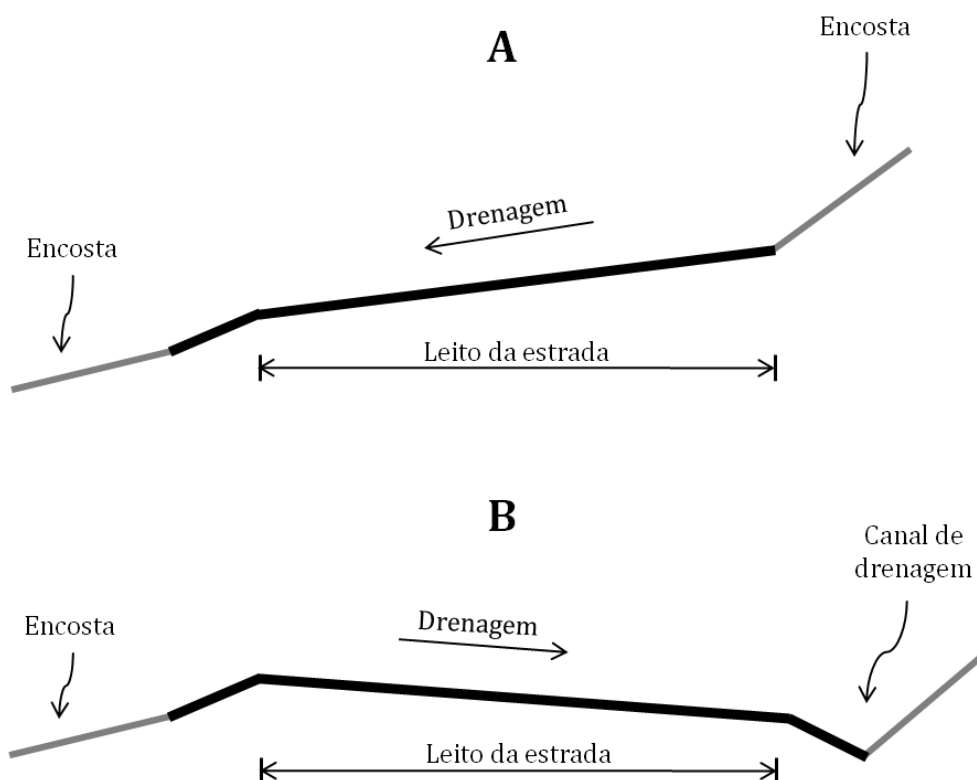


Figura 3 - Perfis de estradas com superelevação.

De acordo com MDEP (2010), o formato ilustrado na Figura 3B é mais utilizado em situações em que a estrada se encontra em regiões de relevo mais acidentado e onde os veículos trafegam com maior velocidade.

### 2.5.2. Canais de escoamento

Outra estrutura de grande importância a ser considerada na implantação de um sistema de drenagem é o canal de escoamento. Comumente chamado de “sarjeta”, este consiste em uma estrutura construída às margens das estradas, com o objetivo de coletar e conduzir as águas provenientes do escoamento superficial

gerado na própria pista e, eventualmente, de áreas de drenagem adjacentes às estradas (BAESSO; GONÇALVES, 2003). Estes autores afirmam ainda que, mesmo estando a drenagem da água no leito da estrada funcionando corretamente, canais de drenagem em condições inapropriadas podem provocar séria degradação da estrada já nas primeiras chuvas.

No que diz respeito à concentração do escoamento ao longo do canal, é de grande importância a instalação de canais desaguadouros, com a finalidade de drenar a água das estradas. A implantação desses canais evita que o escoamento atinja energia erosiva capaz de degradar o canal de drenagem e, conseqüentemente, comprometer as condições de tráfego da estrada (BAESSO; GONÇALVES, 2003).

Preferencialmente, o escoamento superficial proveniente da estrada deveria ser transferido para áreas vegetadas com boa capacidade de infiltração da água no solo. Esse cenário seria ideal e traria diversos benefícios, como a dispersão do escoamento superficial antes que este provocasse erosão e filtragem de nutrientes e partículas finas transportadas pela água. Entretanto, nas situações em que o leito das estradas se encontra encaixado, ou seja, se encontra rebaixado em relação ao nível do terreno, a construção de canais desaguadouros é geralmente difícil, uma vez que é necessária a remoção de um volume muito grande de solo para a sua construção.

Quando as estradas se encontram em maiores trechos encaixados, o volume de escoamento que se concentra ao longo desse trecho é maior e, conseqüentemente, possui maior capacidade de degradação da pista de rolamento. Santos (1988) sugere que, nesses casos, é necessária a implantação de estruturas para a dissipação da energia do escoamento, como barreiras de estacas de madeira ou de pedras, até que seja possível a retirada adequada dessa água, escoada para fora da estrada.

### **2.5.3. Estruturas para retenção e infiltração da água drenada de estradas**

No dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas é importante considerar a estrada como um componente do ambiente rural, haja vista a interferência mútua entre estas e as áreas marginais (GRIEBELER et al., 2009). Assim, mesmo estando a drenagem do escoamento no leito e no canal da estrada funcionando satisfatoriamente, se não houver

destinação adequada para essa água, prejuízos expressivos podem ser causados em áreas adjacentes.

Diante desse contexto, o dimensionamento de estruturas hidráulicas para a retenção e posterior infiltração do escoamento superficial proveniente de estradas não pavimentadas consiste em um fator de grande importância a ser considerado no projeto de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas.

Quando a estrada é integrada a áreas de cultivo, recomenda-se que o escoamento superficial coletado nas estradas seja conduzido para essas, a fim de que seja infiltrado, uma vez que a capacidade de infiltração nestas áreas é superior à das estradas. Segundo Griebeler et al. (2009), uma alternativa para esse tipo de situação, seria a criação de sistemas especiais para o escoamento e infiltração da água, de modo a não provocar nenhum tipo de prejuízo às áreas agrícolas. Estes sistemas podem ser implantados com o avanço de camalhões ou segmentos de terraços partindo da estrada, em cota superior, adentrando nas áreas agrícolas, em cota inferior, de maneira que a água seja conduzida lentamente.

Em estradas localizadas em áreas com terraceamento, é possível dimensionar os canais desaguadouros de maneira que estes conduzam o escoamento para dentro dos terraços. Nesse sistema, a água é direcionada à área de cultivo para ser retida pelo sistema de terraceamento, o qual, para evitar o rompimento destes, deve-se ter atenção para que estes sejam dimensionados já prevendo o volume adicional de escoamento proveniente das estradas. A diferença entre o sistema com segmento de terraços e aquele integrado ao sistema de terraceamento é que no primeiro a extensão da estrutura corresponde ao comprimento necessário para a infiltração da água para posterior infiltração, não sendo preciso que funcione como sistema de terraceamento agrícola (GRIEBELER et al., 2009).

A implantação de bacias de infiltração, destinadas à contenção do escoamento superficial proveniente das estradas, é também uma alternativa de grande importância, sendo viável, principalmente, para as situações em que o terreno não permite a construção de terraços. Kalainesan et al. (2009) afirmam que bacias de infiltração consistem em uma das principais práticas conservacionistas para a retenção de sedimentos provenientes de estradas.

De acordo com Griebeler (2002), a técnica para a implantação de bacias de infiltração consiste na escavação do solo das áreas marginais às estradas para

permitir a captação e o armazenamento da água escoada e, conseqüentemente, a posterior infiltração. Na Figura 4 estão apresentadas bacias de infiltração construídas às margens de uma estrada não pavimentada para a contenção do escoamento superficial.



Figura 4 - Bacias de infiltração para a contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas.

Fonte: SILVA, 2009.

Além de constituir prática de grande importância no controle do processo erosivo, a implantação de estruturas hidráulicas para a contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas também proporciona benefícios expressivos à bacia hidrográfica na qual elas se encontram instaladas, como: redução do pico de vazão e o volume total de água que escoava para fora da bacia hidrográfica via cursos d'água e, assim, reduzir a probabilidade de ocorrência de erosão nas calhas dos rios (MORZARIA-LUNA et al., 2004); aumento da recarga do lençol freático e o escoamento de base (DATRY et al., 2003; MORZARIA-LUNA et al., 2004; STARZEC et al., 2005); e retenção de sedimentos e outros poluentes (DECHESNE et al., 2004; LASSABATERE et al., 2010).

## 2.6. Resistência mecânica do solo à ação erosiva

A resistência mecânica do solo à ação erosiva proveniente da concentração do escoamento superficial é fator de grande importância a ser considerado no delineamento de medidas a serem adotadas para o controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas. De acordo com Knapen et al. (2007), a estimativa das perdas de solo geradas pela concentração do escoamento superficial depende não somente das características pertinentes ao escoamento superficial, mas também da estimativa confiável dos fatores relacionados à resistência do solo à ação erosiva.

Nachtergaele e Poesen (2002) afirmam que diversos estudos têm evidenciado que a resistência do solo à erosão provocada pela concentração do escoamento superficial é influenciada por quase todas as propriedades do solo, tornando-a um conceito complexo e com alta variabilidade espacial e temporal que ainda não é totalmente entendido. Hanson e Simon (2001) acrescentam que dentre as numerosas propriedades do solo que influenciam na resistência à erosão, estão o teor de água, mineralogia e proporção de argila, densidade, estrutura do solo, teor de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio e porosidade.

De acordo com Knapen et al. (2007), os principais parâmetros que descrevem a resistência à erosão de um solo são erodibilidade ( $K$ ) e tensão crítica de cisalhamento ( $\tau_c$ ). Nogami e Villibor (1995) complementam que a determinação desses parâmetros é fundamental para calcular a capacidade resistiva do solo a erosão e, conseqüentemente, escolher o projeto mais apropriado no controle da erosão ao longo das estradas.

A determinação dos parâmetros tensão crítica de cisalhamento e erodibilidade de diferentes solos que possibilitem a avaliação de sua resistência, juntamente com modelos de direcionamento e controle de drenagem em estradas não pavimentadas deve fazer parte de estudos que visem combater a erosão e proteger o meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2009).

A erodibilidade do solo, sob condições de escoamento superficial, corresponde à quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e de tensão aplicada. De acordo com Bastos (1999), a erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que expressa a maior ou menor facilidade com que suas partículas são desprendidas por um agente erosivo. Lima et al. (1992)

salientam que erodibilidade não é sinônimo de erosão, devendo portanto serem analisados de forma diferenciada. Conforme Wischmeier e Smith, citados por Lima et al. (1992), enquanto a erosão depende de fatores como a declividade, características das chuvas, cobertura vegetal, entre outras, a erodibilidade é um fator intrínseco de cada solo.

Segundo Bastos (1999), a erodibilidade é uma das características mais complexas do solo, em virtude do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. No Brasil, quanto ao estudo da erosão, a erodibilidade do solo constitui parâmetro de maior custo e morosidade para determinação, tendo em vista a extensão do território e a diversidade de solos evidenciada no país (DENARDIN, 1990). Nogami e Villibor (1995) salientam que a erodibilidade é dependente de características como a granulometria e constituição mineralógica e química do solo, da estrutura, permeabilidade, capacidade de infiltração e coesão entre partículas.

Sob condições de estradas, Ziegler et al. (2000) obtiveram resultados que indicam que a erodibilidade é variável, sendo o material mais solto inicialmente transportado sob taxas de erosão mais elevadas, com a camada inferior apresentando maior resistência à erosão. Este processo é denominado erodibilidade dinâmica, sendo alterada ao longo do escoamento.

A tensão crítica de cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desagregação de suas partículas (OLIVEIRA et al., 2009; GRIEBELER, 2002). Soares et al. (2006) abordam o conceito de tensão crítica de cisalhamento como "equilíbrio limite", que implica considerar o instante de ruptura, quando as tensões atuantes igualam a resistência do solo, sem atentar para as deformações. Quando este máximo é excedido, diz-se que o solo se rompeu, tendo sido totalmente mobilizada a sua resistência.

## **2.7. Modelagem hidrológica associada às estradas não pavimentadas**

O conhecimento da relação entre os fatores que causam perdas de solo e os que permitem reduzi-las é de fundamental importância (MORETI et al., 2003). As estradas são construídas em diferentes tipos de solo, declividades transversais e longitudinais, com variadas larguras e em regiões com características de precipitação diferentes. Portanto, dependendo das condições locais, o volume e a

energia associada ao escoamento superficial podem apresentar diferenças expressivas.

Diante da grande complexidade dos processos envolvidos no dimensionamento de estruturas hidráulicas para o controle do escoamento superficial de estradas não pavimentadas e, conseqüentemente, do processo erosivo, é de grande importância a utilização de técnicas de modelagem com as quais é possível alcançar maior grau de eficiência e segurança no projeto dessas estruturas.

De acordo com Tedeschi (2006), um modelo pode ser definido como a representação matemática de determinado processo ou dos mecanismos que governam dado fenômeno natural. Hoogenboom (2000) acrescenta que, mesmo sendo uma representação simplificada dos processos naturais, é possível a simulação de variadas condições que podem intervir nesse processo. Contudo, este autor ressalta que é impossível incluir todas as interações que ocorrem no ambiente em um único modelo.

Em estradas, o entendimento do processo hidrológico relacionado ao escoamento superficial decorrente das chuvas é menos complexo que em áreas sob terrenos reflorestados ou agricultáveis. Entretanto, mesmo envolvendo maior complexidade, diversos são os estudos e modelos desenvolvidos para a compreensão e atenuação do processo erosivo em áreas cultivadas, enquanto modelos voltados à minimização do processo erosivo em estradas não pavimentadas ainda são escassos (GRIEBELER et al., 2009).

A representação de processos físicos e a sua complexidade variam bastante em modelos matemáticos utilizados em estradas não pavimentadas, assim, tais modelos podem ser classificados de diferentes maneiras. Merritt et al. (2003) afirmam que esses modelos podem se enquadrar em dois grupos principais: empíricos e baseados em processos físicos.

Modelos empíricos baseiam-se em relações estatísticas entre as variáveis dependentes e independentes, sendo estas derivadas de observação empíricas (FU et al., 2010). Modelos que se baseiam em processos físicos estão relacionados a uma resposta da aplicação da modelagem hidrológica que simula os processos de infiltração e escoamento superficial, e utilizam-se das equações de conservação de massa ou energia que descrevem, com grande nível de detalhes, os processos erosivo e de produção de sedimentos (MERRITT et al., 2003).



Dependendo da escala temporal de simulação considerada, os modelos utilizados em estradas não pavimentadas podem ser classificados como baseados em um evento específico de precipitação ou em eventos contínuos.

Modelos baseados em um único evento de precipitação consideram, na simulação do processo erosivo, uma chuva intensa associada a determinado período de retorno, enquanto modelos contínuos relacionam à produção de sedimentos provenientes de múltiplos eventos de precipitação. A variável resposta dos modelos contínuos consiste, na maioria das vezes, no volume médio anual de produção de sedimentos. Modelos empíricos geralmente são contínuos e os que se baseiam em processos físicos utilizam, normalmente, um único evento de precipitação (FU et al., 2010).

Modelos também podem ser classificados tendo como base a escala espacial em que estes são aplicados, ou seja, em parcelas experimentais, em segmentos de encosta ou em escala de bacias hidrográficas.

De acordo com Fu et al. (2010), muitos modelos foram desenvolvidos para a aplicação em segmentos de encosta e incluem parâmetros descritivos que caracterizam melhor as feições da estrada. Em escala de parcelas experimentais, os modelos focam na quantificação detalhada do escoamento superficial e infiltração e na ocorrência do processo erosivo em determinada feição da estrada, como a superfície da estrada e canal de drenagem. Modelos que estimam as perdas de solo em escala de bacias hidrográficas consideram estradas como um componente da bacia e, frequentemente, envolvem todas as feições da estrada, incluindo as áreas adjacentes.

A seguir serão apresentados alguns dos principais modelos disponíveis atualmente no Brasil e no mundo, destinados ou que têm o potencial de serem utilizados no controle da erosão hídrica em estradas não pavimentadas.

### **2.7.1. Modelos empíricos**

#### **2.7.1.1. WARSEM**

O modelo *Washington Road Surface Erosion Model* (WARSEM) é usado para estimar o valor médio das perdas de solo e transporte de sedimentos para cursos d'água provenientes de estradas não pavimentadas. O modelo foi desenvolvido para ser aplicado em estradas florestais no estado de Washington, nos Estados

Unidos da América, e pode ser usado em variadas escalas, desde um único segmento de estrada a todas as estradas existentes em determinada bacia hidrográfica. O modelo foi desenvolvido com interface para ser utilizado em associação com Sistemas de Informação Geográfica, quando houver disponibilidade de dados (DUBÉ et al., 2004).

O número de variáveis requeridas pelo modelo varia de acordo com as características e objetivo do trabalho no qual este está sendo utilizado, podendo chegar a um número máximo de 15 variáveis (DUBÉ et al., 2004). Estas variáveis incluem precipitação média anual, material que compõe o leito da estrada, cobertura vegetal, declividade longitudinal da estrada, tráfego e manutenção, área de contribuição da própria estrada e de áreas adjacentes e característica do canal de drenagem.

De acordo com Fu et al. (2009) alguns dos fatores considerados no WARSEM têm muitas similaridades com os considerados na Equação Universal de Perdas de Solo (USLE); entretanto, salientam que os considerados no WARSEM estão relacionados diretamente à modelagem da erosão em superfícies de estradas, enquanto os da USLE estão relacionados a áreas agrícolas.

Aplicando o modelo WARSEM em estradas não pavimentadas na região sudoeste da Austrália, Fu et al. (2009) estimaram perda de solo anual de aproximadamente 56.000 toneladas em 3.210 km de estradas, sendo cerca da metade dessas perdas proveniente de apenas 4% do total da rede de estradas. Os autores, entretanto, indicam que o modelo superestimou os resultados das taxas de erosão e produção de sedimentos e reconhecem a necessidade de estudos mais aprofundados a respeito dos fatores intervenientes no processo erosivo em estradas florestais, inclusive aqueles não considerados no modelo utilizado por eles.

#### **2.7.1.2. USLE e modificações**

A equação universal de perdas de solo (*Universal Soil Loss Equation* – USLE, WISCHMEIER; SMITH, 1978, citados por AMORIM et al., 2009), comumente utilizada para estimar as perdas de solo em encostas, foi desenvolvida na década de 1950 para a aplicação em terras agrícolas na região oriental dos Estados Unidos. A USLE tem sido modificada nas últimas décadas e estas modificações incluem a equação universal de perdas de solo modificada (*Modified Universal Soil*

*Loss Equation* – MUSLE) e a equação universal de perdas de solo revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE, RENARD et al., 1991). A variável estimada pela USLE e suas modificações consiste na perda de solo média anual.

Ziegler et. al. (2000) afirmam que a maior limitação do uso da USLE e suas modificações para a modelagem do processo erosivo em estradas não pavimentadas é que mesmo estando ela baseada em relações estatísticas obtidas com base em dados observados em 10.000 parcelas padrão, nenhuma delas é originada a partir de segmentos de estradas não pavimentadas. Conseqüentemente, o uso desse modelo para estimar perdas de solo em superfície de estradas é questionável (ZIEGLER et al., 2000), considerando as diferenças nas propriedades e uso do solo para a agricultura e como superfície de rodagem de uma estrada não pavimentada.

Apesar das peculiaridades das estradas não pavimentadas, alguns estudos têm sido realizados aplicando a USLE à modelagem do processo erosivo nessas estradas, a exemplo de Megahan et al. (2001), Farabi e James (2005), Sheridan et al. (2006), Corrêa et al. (2007) e Corrêa e Dedecek, (2009).

Os trabalhos desenvolvidos por Corrêa et al. (2007) e Corrêa e Dedecek (2009) foram realizados para as condições brasileiras, sendo obtidos resultados considerados satisfatórios pelos autores. De maneira geral, em ambos os trabalhos, os autores concluíram que a RUSLE apresenta potencial de uso para a predição das perdas de solo por erosão em estradas, no entanto, fazem uma ressalva a respeito da necessidade de formulação de um banco de dados dos fatores que compõem a equação, para um adequado ajuste.

### **2.7.1.3. ROADMOD**

A partir da aplicação de um sistema de informação geográfica, o ROADMOD estima a produção de sedimentos considerando uma relação empírica entre taxas de erosão e as condições de superfície da estrada (ANDERSON; MACDONALD, 1998).

Os principais fatores considerados neste modelo são a declividade e a área de drenagem da estrada. De acordo com estimativa realizada por Anderson e MacDonald (1998), a produção de sedimentos está linearmente relacionada com a declividade e a área de drenagem da estrada.

É considerado no modelo que a superfície da estrada é a única fonte de sedimento, não sendo levadas em conta as perdas de solo provenientes dos taludes e dos canais de drenagem da estrada (ANDERSON; MACDONALD, 1998). Fu et al. (2010) afirmam que uma das maiores limitações do modelo é que tais relações empíricas foram desenvolvidas exclusivamente para às condições inerentes as Ilhas Virgens Americanas, sendo, portanto, restrita a sua aplicação em condições diferentes daquelas nas quais ele foi concebido.

## **2.7.2. Modelos baseados em processos físicos**

### **2.7.2.1. WEPP**

O *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) foi gerado a partir de um esforço multidisciplinar, envolvendo vários pesquisadores e instituições de pesquisa americanas (AMORIM et al., 2009).

O WEPP consiste em um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão entressulcos e em sulcos. Com a sua utilização é possível simular os processos que ocorrem em determinada área de acordo com o estado atual do solo, cobertura vegetal, restos culturais e umidade do solo. Para cada dia, as características do solo e da cobertura vegetal são atualizadas. Quando ocorre chuva, com base nas características atuais do terreno, é determinada a produção ou não de escoamento superficial. Nos casos em que há escoamento superficial, o modelo simula os processos de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos (AMORIM et al., 2009).

O WEPP foi originalmente desenvolvido para ser aplicado em áreas agrícolas, mas também tem sido utilizado para estimar a erosão em estradas florestais. Forsyth et al. (2006) aplicaram o modelo para estimar o volume total de escoamento superficial e perdas de solo e nutrientes em estradas florestais no estado de Queensland, Austrália, obtendo resultados satisfatórios.

Estudos realizados por Grace III (2007) no estado do Alabama também mostram estimativas de produção de sedimentos em estradas florestais a partir da aplicação do WEPP com boa concordância com os dados observados. Entretanto, Machado et al. (2003b) compararam taxas de erosão em estradas florestais com valores estimados pelo WEPP obtidos para as condições brasileiras e concluíram que este não se encontra devidamente calibrado para tais condições.

Para a aplicação em estradas não pavimentadas o WEPP pode incluir múltiplas feições da estrada, por exemplo superfície, canais de drenagem e áreas adjacentes. Uma aplicação simplificada do modelo direcionada às estradas pode ser realizada a partir do WEPP:Road, que consiste em uma base na web para modelagem de segmentos individualizados de estradas (ELLIOT et al., 2000 e 2004). No WEPP: Road, as variáveis de entrada do modelo incluem os dados de clima, textura do solo, encascalhamento, topografia do terreno, espaçamento entre drenos, condições de superfície e do canal de drenagem.

#### **2.7.2.2. KINEROS2**

O KINEROS2 consiste na segunda versão do modelo *Kinematic Runoff and Erosion Model* desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. O modelo não se baseia nos conceitos de erosão em sulcos e entre sulcos, mas sim naqueles relacionados ao impacto das gotas de chuva e tensão cisalhante associada ao escoamento superficial. As variáveis estimadas pelo modelo incluem o hidrograma de escoamento superficial, produção de sedimentos e deposição de sedimentos para determinado evento de precipitação (ZIEGLER et al., 2001a).

KINEROS2 não foi desenvolvido originalmente para ser aplicado em estradas não pavimentadas, porém estudos têm demonstrado que pode ser aplicado para estimativa do escoamento e produção de sedimentos em segmentos de estradas (ZIEGLER et al., 2001a e 2002).

#### **2.7.2.3. GA-UH/GA-KW associados a curvas de taxa de sedimentos**

Os modelos *Green-Ampt – Unit Hydrograph* (GA-UH) e *Green-Ampt – Kinematic Wave* podem ser usados para simular o escoamento proveniente da superfície de estradas não pavimentadas. Esses modelos foram utilizados juntamente com curvas de taxa de sedimentos para estimar a produção de sedimentos em segmentos de estradas nas Ilhas Virgens Americanas (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2007b). Os modelos de infiltração de Green-Ampt e de ondas cinemáticas (Kinematic Wave) baseiam-se em processos físicos, enquanto o hidrograma unitário (*Unit Hydrograph*) e a curva de taxa de sedimentos são modelos empíricos.

#### **2.7.2.4. Modelo Estradas**

Os modelos apresentados anteriormente consistem em importantes ferramentas que visam auxiliar no processo de entendimento dos fatores intervenientes no processo erosivo em estradas não pavimentadas bem como na adoção de medidas e das técnicas conservacionistas mais convenientes para determinada situação. No entanto, a aplicação desses modelos é restringida às condições nas quais estes foram concebidos (modelos empíricos), ou então exige minuciosa calibração dos parâmetros considerados por estes (modelos baseados em processos físicos).

Visando ao desenvolvimento de uma metodologia mais representativa para as condições brasileiras, Griebeler et al. (2005a) desenvolveram um modelo para determinar o espaçamento máximo entre desaguadouros e dimensionamento de bacias de infiltração. A metodologia desenvolvida por Griebeler et al. (2005a) foi implementada na forma de um software, denominado Estradas.

Para a determinação do espaçamento entre desaguadouros é gerado o hidrograma de escoamento no canal por meio da aplicação do modelo de ondas cinemáticas. A partir da associação do hidrograma de escoamento no canal com as características de resistência do solo à erosão, como a tensão crítica de cisalhamento e erodibilidade do solo, é feita a quantificação da perda de solo no canal e a comparação desta com um limite considerado tolerável. Para obtenção do hidrograma no canal é necessário determinar os hidrogramas de escoamento referentes à estrada e a área de contribuição externa a esta. Tais hidrogramas também são obtidos a partir da aplicação do modelo de ondas cinemáticas.

No Estradas, os usuários devem inserir os dados relativos às características geométricas da estrada, canal de drenagem, aprofundamento máximo tolerável do canal de drenagem, características do solo, precipitação do local em que o projeto será executado e, se for o caso, da área externa que drena para a estrada. O evento de precipitação considerado neste modelo corresponde à chuva máxima esperada para um período de retorno de projeto, cujos parâmetros da função que representam a mesma são obtidos para inúmeras localidades brasileiras (PRUSKI et al., 1997), a partir de um banco de dados disponível no modelo.

No modelo, além da aplicação da modelagem hidrológica voltada para controlar o processo erosivo na estrada, é possível o dimensionamento de bacias

de infiltração para armazenar e, posteriormente, infiltrar o volume de escoamento gerado na estrada.

No Estradas não é abordada a modelagem da produção e transporte de sedimentos para cursos d'água, uma vez que estes ficam retidos nas bacias de infiltração.

#### **2.7.2.5. Modelo desenvolvido por Silva (2009)**

No dimensionamento de estruturas hidráulicas destinadas à contenção do escoamento superficial e, conseqüentemente, do controle do processo erosivo, é normalmente considerada apenas uma única chuva intensa associada ao período de retorno de projeto. Contudo, nesse critério não é levado em consideração o efeito acumulativo dos eventos de escoamento superficial que ocorrem de forma sucessiva na série. Esses eventos podem provocar condição mais crítica para o projeto da bacia de infiltração do que o evento específico associado a determinado período de retorno.

Ao desenvolver esse modelo, baseou-se no princípio de que para o cálculo do volume de uma bacia de infiltração destinada à contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas, a realização de uma análise dia-a-dia do volume escoado em cada evento da série é um critério mais coerente, uma vez que é considerado o efeito acumulativo de precipitações que ocorrem de forma sucessiva na série.

Nesse modelo são utilizados dados sintéticos de precipitação, advindos do modelo ClimaBr (OLIVEIRA et al., 2005a e 2005b), para a obtenção de uma série diária de volumes escoados, com a qual é realizado o balanço diário do volume armazenado na bacia. A partir da série de volumes armazenados é identificado o maior valor obtido em cada ano e, assim, é criada uma série anual de volumes máximos armazenados na bacia, à qual é aplicada a distribuição de Gumbel para a obtenção do volume requerido para a bacia de infiltração.

### **2.8. Geradores de séries sintéticas de dados climáticos**

Nos estudos que visam melhor compreensão do comportamento hidrológico de determinada região, ou entendimento mais amplo de processos que ocorrem normalmente na natureza, a utilização de modelos que requerem dados climáticos é de relevante importância.

Na literatura estão disponíveis trabalhos que relatam a importância da disponibilidade de variáveis climáticas para modelos voltados ao dimensionamento de obras hidráulicas (WILKS; WILBY, 1999; TAULIS e MILKE, 2005; KHALILI et al., 2011), manejo dos recursos hídricos, disponibilidade e qualidade de água (KHALILI et al., 2011), modelos do crescimento de plantações (WILKS e WILBY, 1999; SOLTANI et al., 2000; BRISSETTE et al., 2007), modelos para simulação de mudanças climáticas (WILKS; WILBY, 1999; BRISSETTE et al., 2007; HASHMI, 2011); modelos ecológicos (BIRT et al., 2010); dentre outros.

De acordo com Hoogenboom (2000), uma questão crítica a ser considerada na utilização de modelos que necessitam de dados climáticos é a disponibilidade e a confiabilidade dos dados relativos a dada região em análise. Segundo o autor, os problemas mais comuns relacionados às séries de dados climáticos incluem: período de registro curto demais para a aplicação de determinado modelo; períodos longos de dados, porém com erros; disponibilidade apenas de médias mensais; e número pequeno de variáveis monitoradas, por exemplo temperatura máxima e mínima, ou somente dados de precipitação.

Wilks e Wilby (1999) e Taulis et al. (2005) acrescentam ainda a ocorrência de problemas relacionados à cobertura da rede de coleta de dados e séries históricas com falhas, respectivamente. Nas condições brasileiras, Evangelista et al. (2006) afirmam que a grande limitação para o uso de modelos hidrológicos para as regiões brasileiras consiste na falta de alguns elementos climáticos não registrados nas estações climáticas locais.

Em todos os problemas citados anteriormente, uma alternativa que tem sido amplamente utilizada é a aplicação de modelos estocásticos para se obterem séries sintéticas de dados com características estatísticas idênticas às da série histórica de dados observados (BIRT et al., 2010). De acordo com Wilks e Wilby (1999), esses modelos estocásticos são conhecidos como “geradores de séries sintéticas de dados climáticos” e são capazes de realizar o preenchimento de falhas ou mesmo produzir uma série histórica de tamanho ilimitado por meio de propriedade chaves de dados meteorológicos observados. Baena et al. (2005) acrescentam que, com tais modelos, pode-se, a baixo custo, obter informações sobre o clima local, permitindo, por meio de simulações, avaliar a sua influência tanto nos processos naturais quanto naqueles decorrentes da intervenção humana.



Ao longo dos anos, muitos geradores de séries sintéticas têm sido desenvolvidos. Segundo Chen et al. (2010), dentre os principais estão: Weather Generation (WGEM)(RICHARDSON e WRIGHT, 1984); USCLIMATE (HANSON et al., 1994); CLIGEN - Climate Generator (NICKS et al., 1995); Climate Generation (ClimGen) (STOKLE et al., 1999, citado por CHEN et al., 2010), Long Ashton Research Station-Weather Generator (LARS-WG) (SEMENOV e BARROW, 2002).

Apesar da grande importância e da indiscutível relevância dos modelos utilizados para a obtenção de séries sintéticas citados, é imprescindível a realização de ajuste criterioso de boa parte dos parâmetros, a fim de que estes possam ser usados em condições brasileiras.

Segundo Baena et al. (2005) a utilização de geradores climáticos desenvolvidos no exterior não tem conduzido a resultados satisfatórios em condições brasileiras, pelo fato de terem sido desenvolvidos para condições edafoclimáticas muito diferentes das observadas no País.

Diante desses obstáculos, o desenvolvimento de modelos para as condições brasileiras é fundamental para a viabilização de dados consistentes que representem de forma confiável as características climáticas locais, principalmente com relação às singularidades das precipitações que ocorrem em clima tropical.

Com o objetivo de apresentar alternativas para as pesquisas envolvendo a perda de água e solo, Oliveira et al. (2005a e 2005b) desenvolveram e testaram uma metodologia para a geração de séries sintéticas diárias de precipitação a partir de séries históricas de registros pluviométricos diários para as condições climáticas encontradas no Estado do Rio de Janeiro. O modelo desenvolvido, denominado ClimaBr, foi capaz de gerar séries sintéticas de valores mensais de precipitação total diária ocorrida nesses dias, além das informações relativas ao perfil de precipitação: duração, tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea dos eventos.

A metodologia desenvolvida por Oliveira et al. (2005a, 2005b) foi aperfeiçoada por Zanetti et al. (2005) e por Baena (2005), permitindo assim o aprimoramento das variáveis associadas ao perfil de precipitação além de gerar séries sintéticas de temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Baena et al. (2005), visando otimizar a aplicação do modelo, desenvolveram ainda um programa computacional

denominado ClimaBr 2.0 e concluíram que este permitiu a geração de séries sintéticas de dados climáticos para diversas localidades brasileiras.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho foi desenvolvido em três etapas distintas. A primeira delas consistiu no desenvolvimento do modelo físico-matemático para determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros. Posteriormente, visando conferir maior praticidade na aplicação do modelo físico-matemático, foi desenvolvido um modelo computacional. Por fim, foi feita a avaliação do modelo a partir da realização da análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os observados em campo e a aplicação de testes de sensibilidade do modelo às principais variáveis de entrada por ele consideradas.

#### **3.1. Desenvolvimento do modelo para a determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros**

Neste modelo são utilizados dados sintéticos de precipitação advindos do modelo ClimaBr, com os quais é realizada a análise diária do escoamento no canal da estrada e do desprendimento de partículas provocado por este. O espaçamento máximo entre desaguadouros é definido como aquele em que a somatória das perdas de solo que ocorrem no canal, considerando a análise de todos os eventos da série histórica de dados de precipitação, é inferior ao valor correspondente à perda de solo tolerável.

##### **3.1.1. Obtenção da série sintética de dados de precipitação**

O modelo ClimaBr tem como finalidade gerar séries sintéticas de dados diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Neste trabalho, o ClimaBr foi utilizado para gerar séries sintéticas de precipitação.

O perfil de precipitação considerado no ClimaBr é representado por uma função dupla exponencial, que consiste em uma exponencial crescente do início do evento até o momento em que ocorre a intensidade de precipitação máxima e, a

partir deste momento, uma exponencial decrescente descreve o comportamento do perfil. Na Figura 5 é apresentado um perfil de precipitação adimensionalizado no formato de uma função dupla exponencial que representa a variação da intensidade instantânea de precipitação padronizada ( $i^*$ ) em função do tempo padronizado ( $t^*$ ).

A função dupla exponencial que representa o perfil de precipitação é dada por:

$$i^* = \begin{cases} ae^{bt^*}, & 0 \leq t^* \leq tp^* \\ ce^{-dt^*}, & tp^* \leq t^* \leq 1,0 \end{cases} \quad (1)$$

em que:

- a, b, c, d = parâmetros da função dupla exponencial relativos ao evento de precipitação, adimensionais;
- $t^*$  = tempo padronizado, adimensional; e
- $tp^*$  = tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, adimensional.

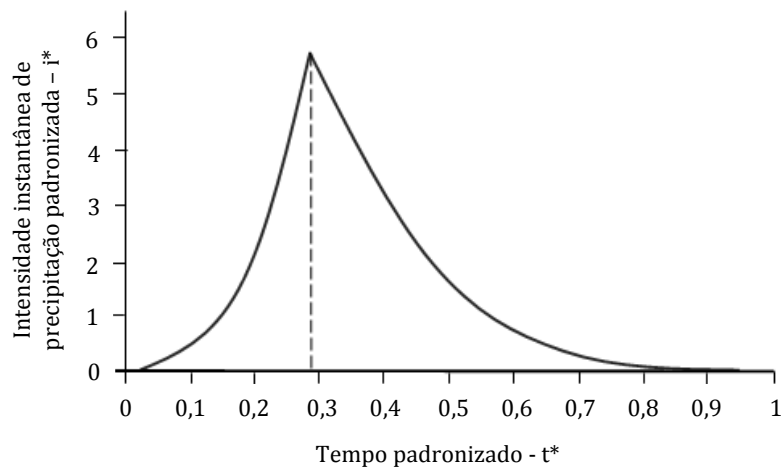


Figura 5 - Perfil de precipitação adimensionalizado em formato de uma função dupla exponencial.

A intensidade instantânea de precipitação padronizada representa a relação entre a intensidade instantânea de precipitação ( $i^*$ ) e a intensidade média de precipitação ( $i_{med}$ ), sendo a intensidade média de precipitação obtida a partir da relação entre a lâmina total precipitada ( $P$ ) e a duração total da precipitação ( $D$ ).

O tempo padronizado representa a relação entre o tempo em que ocorre determinada intensidade  $i_i^*$  e a duração total da precipitação, sendo os valores compreendidos entre zero e um.

As variáveis  $P$ ,  $D$  e  $tp^*$  são obtidas diretamente do modelo ClimaBr.

### 3.1.2. Modelagem do escoamento superficial

O escoamento superficial no canal da estrada é consequência da água que precipita diretamente sobre seu leito e depende, principalmente, da intensidade de precipitação. Existem ainda as estradas que recebem escoamento provindo de áreas externas à essas, contudo, não foram consideradas neste trabalho estradas com essa configuração.

Para a determinação do hidrograma de escoamento superficial no canal da estrada, o leito dessa é dividido em linhas e colunas, sendo o hidrograma obtido para a última coluna relativa ao sentido do escoamento superficial. Este escoamento é considerado somente no sentido transversal ao canal. A Figura 6 representa, esquematicamente, a divisão da área de contribuição ao escoamento relativa ao leito da estrada em linhas e colunas, para a determinação do hidrograma no canal.

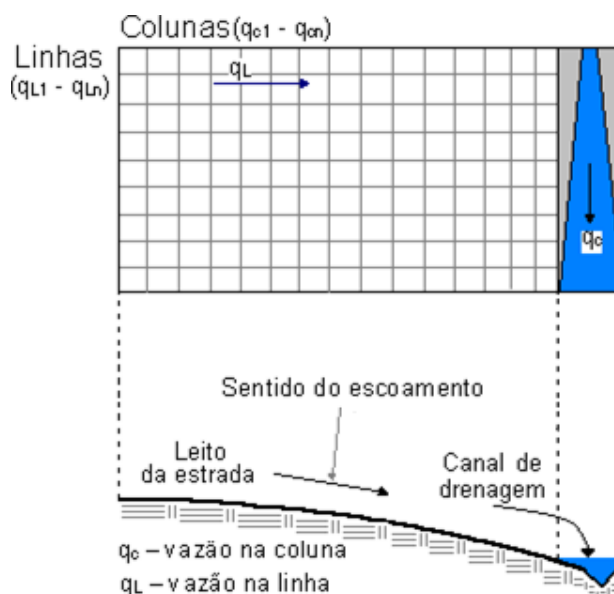


Figura 6 - Representação esquemática da subdivisão do leito da estrada para a determinação do hidrograma no canal de drenagem da estrada.

Fonte: GRIEBELER, 2002.

Os hidrogramas de escoamento superficial são obtidos pelo procedimento desenvolvido no modelo denominado Hidrograma, criado por Silva et al. (2006).

No desenvolvimento deste modelo foram consideradas as condições de ocorrência do escoamento no leito da estrada e no canal de drenagem, sendo estabelecida a premissa de que o solo apresenta umidade próxima à saturação, ou seja, a taxa de infiltração da água está próxima da taxa de infiltração estável.

### 3.1.2.1. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial no leito da estrada

O escoamento superficial proveniente do leito da estrada é obtido por meio da aplicação do modelo de ondas cinemáticas. Este modelo consiste em uma das formas de aplicação das equações de Saint-Venant (SINGH, 1996) e descreve os princípios físicos de conservação de massa (equação da continuidade) e da conservação da quantidade de movimento (equação de dinâmica). O modelo de ondas cinemáticas aplicado à modelagem do escoamento superficial ao longo de uma encosta, de acordo com Chua et al. (2008), Naik et al (2009) e Chua e Wong (2011), pode ser assim expresso:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T i_{e_{est}} \quad (2)$$

$$S_o = S_f \quad (3)$$

em que:

h = profundidade do escoamento no leito da estrada, m;

t = tempo, s;

q = vazão por unidade de largura na direção x, m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>;

x = distância percorrida pelo escoamento, m;

T*i*<sub>e<sub>est</sub></sub> = taxa de infiltração da água no solo do leito da estrada; mm h<sup>-1</sup>;

S<sub>o</sub> = declividade da superfície do solo, m m<sup>-1</sup>; e

S<sub>f</sub> = declividade da linha de energia, m m<sup>-1</sup>.

O modelo de ondas cinemáticas considera a declividade da linha de energia (S<sub>f</sub>) igual à da superfície do leito da estrada (S<sub>o</sub>), adimidindo-se uma seção transversal média de escoamento. Com o auxílio de equações que são utilizadas em

condições de regime uniforme, obtém-se a relação entre a vazão e a profundidade de escoamento, que é expressa por:

$$q = \alpha h^\beta \quad (4)$$

em que  $\alpha$  e  $\beta$ , utilizando-se a equação de Manning, podem ser assim expressos:

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_f}}{n} \quad e \quad \beta = \frac{5}{3} \quad (5)$$

em que  $n$  é o coeficiente de rugosidade do terreno,  $s \text{ m}^{-1/3}$ .

Substituindo a equação 4 na equação 2, tem-se que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial h^\beta}{\partial x} = i_i - T i e_{est} \quad (6)$$

A equação 6 é resolvida utilizando-se o método de diferenças finitas segundo o algoritmo proposto por Braz (1990), sendo que o valor da profundidade do escoamento calculado é transformado em vazão, utilizando-se a equação 4.

### 3.1.2.2. Obtenção do hidrograma de escoamento superficial no canal da estrada

De acordo com Rai et al. (2010) e Chua e Wong (2010), para canais abertos, o modelo de ondas cinemáticas é dado por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (7)$$

em que:

$A$  = área da seção transversal do escoamento,  $\text{m}^2$ ;

$t$  = tempo,  $s$ ;

$Q$  = vazão escoada no canal,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e

$x$  = distância percorrida pelo escoamento,  $m$ .

A vazão escoada no canal é obtida a partir da equação 7, resolvida pelo método de diferenças finitas. A área de escoamento é obtida pela equação:

$$Q = \alpha_c A^{\beta_c} \quad (8)$$

em que  $\alpha_c$  e  $\beta_c$  são parâmetros obtidos considerando-se as condições de escoamento no canal.

Com base na equação de Manning e considerando um canal com seção triangular, os parâmetros  $\alpha_c$  e  $\beta_c$  são obtidos pelas respectivas equações:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{S_f}}{n} \frac{(m_1 + m_2)^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{1}{3}} (\sqrt{m_1^2 + 1} + \sqrt{m_2^2 + 1})^{\frac{2}{3}}} \quad \text{e} \quad \beta_c = \frac{4}{3} \quad (9)$$

em que  $m_1$  e  $m_2$  são os taludes do canal de drenagem da estrada com seção triangular (Figura 7).

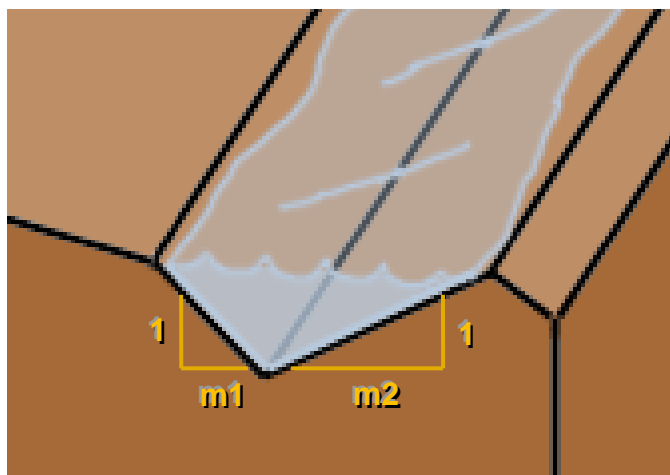


Figura 7 - Representação dos taludes de um canal de drenagem triangular.

### 3.1.3. Determinação da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial

O cálculo da tensão cisalhante associada ao escoamento é realizado com base na equação da resistência ao cisalhamento (equação 10).



$$\tau' = \gamma R_h S \quad (10)$$

em que:

$\tau'$  = tensão provocada pelo escoamento, N m<sup>-2</sup>;

$\gamma$  = peso específico da água, kgf m<sup>-3</sup>;

$R_h$  = raio hidráulico, m; e

$S$  = declividade do canal, m m<sup>-1</sup>.

Dessa forma, foi considerado inicialmente, de acordo com o proposto por Griebeler et al. (2005), o cálculo da tensão cisalhante realizado utilizando-se a profundidade do escoamento no canal ( $y$ ) substituindo o  $R_h$  na equação 10, conforme apresentado na seguinte equação:

$$\tau = \frac{\gamma y S}{0,102} \quad (11)$$

em que:

$\tau$  = tensão provocada pelo escoamento, Pa; e

$y$  = profundidade do escoamento no canal da estrada, m.

#### 3.1.4. Perda de solo provocada pelo escoamento

A perda de solo que ocorre em determinado comprimento ( $l$ ) do canal da estrada durante certo evento de precipitação ( $e$ ) da série sintética, é obtida a partir do somatório das perdas ocorridas em todos os intervalos de tempo de ocorrência do escoamento superficial em que a tensão provocada pelo escoamento supera a tensão crítica de cisalhamento do solo, conforme a seguinte equação:

$$PS_{l,e} = \Delta t K A_s \sum_{i=1}^{i=n-1} (\tau_{M_i} - \tau_c) \quad \tau_M > \tau_c \quad (12)$$

em que:

$PS_{l,e}$  = perda de solo provocada pelo escoamento superficial, g;

$\tau_M$  = tensão média de cisalhamento provocada pelo escoamento durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ , Pa;

- $\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento do solo, Pa;  
 $\Delta t$  = intervalo de tempo, min;  
 $K$  = erodibilidade do solo,  $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ; e  
 $A_s$  = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo,  $\text{cm}^2$ .

O valor de  $\tau_M$  é obtido empregando-se a equação:

$$\tau_M = \frac{\tau_{(i)} + \tau_{(i+1)}}{2} \quad (13)$$

em que:

- $\tau_{(i)}$  = tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento no tempo  $i$ , Pa; e  
 $\tau_{(i+1)}$  = tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento no tempo  $i+1$ , Pa.

A partir das características do canal e da vazão obtida e utilizando-se a equação 11, o modelo transforma o hidrograma de escoamento em um gráfico que indica a variação da tensão cisalhante com o tempo (Figura 8).

A perda de solo que ocorre em determinado comprimento ( $l$ ) do canal da estrada durante um ano da série sintética ( $PS_{l,ano}$ ), é obtida a partir da somatória das perdas ocorridas para este mesmo comprimento em todos os eventos de precipitação do ano considerado, conforme a equação a seguir:

$$PS_{l,ano} = \sum_{e=1}^{e=365} PS_{l,e} \quad (14)$$

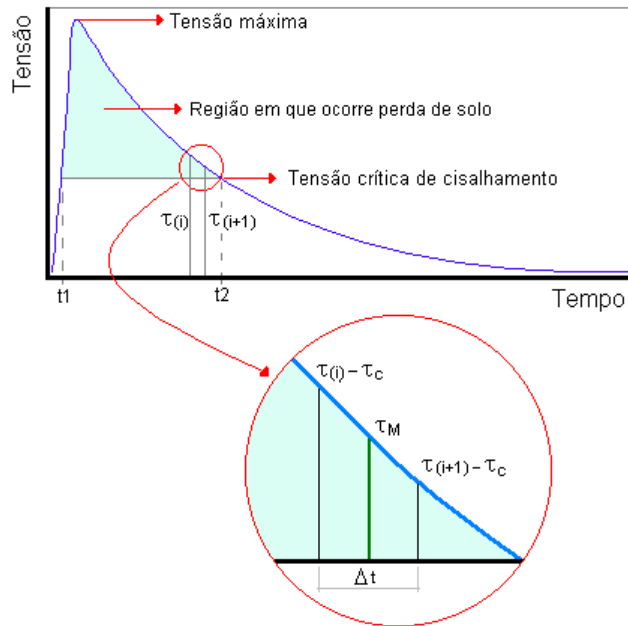


Figura 8 - Representação da variação da tensão cisalhante com o tempo para o escoamento superficial, indicando o intervalo de tempo no qual se processa a liberação de sedimentos.

Fonte: GRIEBELER, 2002.

### 3.1.5. Aprofundamento máximo tolerável no canal de drenagem

Visando à determinação de limites para os quais as perdas de solo devidas à erosão possam ser consideradas toleráveis do ponto de vista de trafegabilidade da estrada, deve-se tomar como critério um aprofundamento máximo tolerável ( $a_{pm}$ ) para o canal de drenagem na seção correspondente ao comprimento máximo. Esta seção corresponde ao comprimento final do canal onde deverá ser locado o desaguadouro.

O aprofundamento considerado tolerável é aquele que não compromete o tráfego e que possibilita fácil correção por intermédio das operações periódicas de manutenção das estradas.

### 3.1.6. Perda de solo tolerável no canal

Para que não ocorra erosão no canal, a tensão provocada pelo escoamento deve ser inferior ou, no máximo, igual àquela que o solo é capaz de resistir. Este critério é bastante rigoroso, uma vez que, em razão do desgaste provocado pelo próprio tráfego, há necessidade da realização de manutenções periódicas no leito da estrada. Assim, quando da realização da manutenção da estrada, pequenos

danos provocados pela erosão nos canais podem ser facilmente recuperados. Outro aspecto a ser considerado refere-se ao custo de implantação do sistema de drenagem e das bacias de infiltração, o qual aumenta para as condições em que as perdas sejam consideradas nulas.

Griebeler et al. (2005a) apresentaram uma proposta metodológica em que se leva em conta a possibilidade de ocorrência de perdas de solo em limites tido como toleráveis, ou seja, que não representem comprometimento ao tráfego na estrada ao final do intervalo considerado para a realização da manutenção.

A perda de solo correspondente ao aprofundamento máximo tolerável é determinada empregando-se a equação:

$$PS_t = V_s \rho_s \quad (15)$$

em que:

$PS_t$  = perda de solo tolerável, g;

$V_s$  = volume de solo a ser removido pela erosão,  $\text{cm}^3$ ; e

$\rho_s$  = massa específica do solo,  $\text{g cm}^{-3}$ .

O valor de  $V_s$  é determinado pela equação:

$$V_s = A_s a_{pm} \quad (16)$$

em que:

$A_s$  = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo,  $\text{cm}^2$ ; e

$a_{pm}$  = aprofundamento máximo tolerável, cm.

### 3.1.7. Espaçamento entre desaguadouros

O espaçamento máximo entre desaguadouros é definido partindo-se do princípio de que, ao final do período de manutenção da estrada estabelecido pelo projetista, as perdas de solo que ocorrem no canal não deverão superar a perda de solo tolerável.

Dessa forma, em cada ano, permite-se perda de solo igual à razão entre a perda de solo tolerável e o período de manutenção, que é expressa pela equação (17).

$$PS_{man} = \frac{PS_t}{pm} \quad (17)$$

em que:

$PS_{man}$  = perda de solo tolerável máxima por ano durante o período de manutenção da estrada, g; e

$pm$  = período de manutenção da estrada, anos.

As análises são realizadas com valores médios anuais de perdas de solo para cada comprimento do canal da estrada, considerando-se todos os eventos de precipitação da série sintética.

A perda de solo média anual que ocorre para determinado comprimento (l) do canal é obtida a partir da seguinte equação:

$$\overline{PS}_l = \frac{\sum_{ano=1}^{ano=n_a} PS_{l,ano}}{n_a} \quad (18)$$

em que:

$\overline{PS}_l$  = perda de solo média anual ocorrida no comprimento l considerando-se todos os eventos de precipitação da série sintética, g; e

$n_a$  = número de anos da série.

O espaçamento máximo corresponde ao comprimento l imediatamente inferior àquele em que: a perda média de solo no canal supera a perda de solo tolerável máxima por ano durante o período de manutenção da estrada. Assim, tem-se que:

$$E_{max} \rightarrow \overline{PS}_l \leq PS_{man} \quad (19)$$

em que  $E_{max}$  é o espaçamento máximo entre desaguadouros, m.

### **3.2. Desenvolvimento do modelo computacional para o cálculo do espaçamento máximo entre desaguadouros e dimensionamento da bacia de infiltração**

A utilização de modelos é facilitada quando da disponibilização de ferramentas que diminuam o tempo gasto por pesquisadores otimizando o trabalho destes. Dessa forma, foi desenvolvido um software com interface de fácil utilização e autoexplicativa, utilizando-se o ambiente de programação Delphi.

Além da metodologia para o cálculo do espaçamento máximo entre desaguadouros, foram incorporados ao modelo computacional o modelo ClimaBr (OLIVEIRA et al., 2005a e b; ZANETTI et al., 2005; BAENA et al., 2005) e a metodologia desenvolvida por Silva (2009) para o dimensionamento de bacias de infiltração em estradas não pavimentadas. Ambos os modelos foram adaptados antes de sua incorporação ao software.

As adaptações realizadas no modelo ClimaBr dizem respeito à elaboração de uma nova interface para a seleção da estação pluviométrica associada à área de interesse para a qual se deseja projetar o sistema de drenagem, não sendo, portanto, alteradas as rotinas de cálculos originalmente consideradas no modelo. Essa versão do ClimaBr, em um primeiro momento, estará disponível somente de forma integrada ao software desenvolvido nesse trabalho.

No que diz respeito à incorporação da metodologia para o dimensionamento de bacias de infiltração desenvolvida por Silva (2009), foram realizadas adaptações a fim de ampliar as opções para a escolha do formato da bacia de infiltração a ser dimensionada. As características principais da referida metodologia e as adaptações realizadas são descritas na sequência.

#### **3.2.1. Módulo para o dimensionamento de bacias de infiltração**

O dimensionamento da bacia de infiltração, a partir da metodologia desenvolvida por Silva (2009), é realizado utilizando-se dados sintéticos de precipitação advindos do modelo ClimaBr. Os dados de precipitação são empregados para a obtenção de uma série diária de volumes escoados, com a qual é realizado o balanço diário do volume armazenado na bacia. A partir da série de volumes armazenados é identificado o maior valor obtido em cada ano e, assim, é criada uma série anual de volumes máximos armazenados na bacia, à qual é

aplicada a distribuição de Gumbel, objetivando a obtenção do volume requerido para a bacia de infiltração.

No modelo desenvolvido por Silva (2009), o balanço diário do volume armazenado na bacia de infiltração, necessário para cálculo do volume requerido para esta, é obtido considerando-se uma bacia de formato retangular com seção transversal triangular, conforme apresentado na Figura 9. No desenvolvimento do modelo computacional foram incorporados novos formatos de bacia de infiltração. Na sequência são descritos os procedimentos metodológicos adotados para o dimensionamento de bacias de infiltração com os diferentes formatos contemplados no modelo.

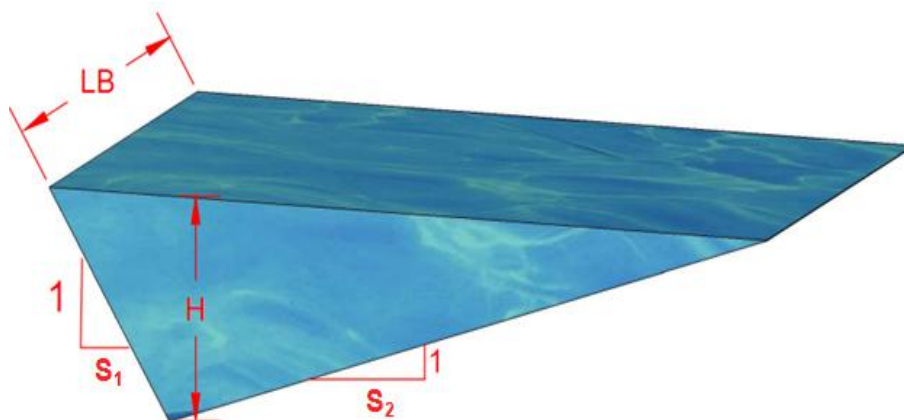


Figura 9 - Bacia de infiltração retangular com seção transversal triangular.

### 3.2.1.1. Cálculo do volume armazenado

O volume armazenado na bacia de infiltração em determinado dia da série ( $V_{Ai}$ ) é obtido a partir da soma do volume de escoamento superficial que chega à bacia nesse dia ( $VES_i$ ) e o volume armazenado remanescente do dia anterior ( $V_{R\ i-1}$ ), que é aquele que já se encontrava armazenado na bacia nesse dia. Assim, o volume armazenado na bacia de infiltração é obtido a partir da equação:

$$V_{Ai} = VES_i + V_{R\ i-1} \quad (20)$$

O valor do volume de escoamento superficial (VES, em  $m^3$ ) que ocorre em determinado dia da série é obtido a partir do produto da lâmina de escoamento superficial (LES, convertida em m) pela área de contribuição da estrada ( $A_c$ ). Na obtenção de LES é considerado o perfil de precipitação adimensionalizado (Figura

10), sendo a área sob o perfil corresponde à lâmina precipitada adimensionalizada e igual a um.

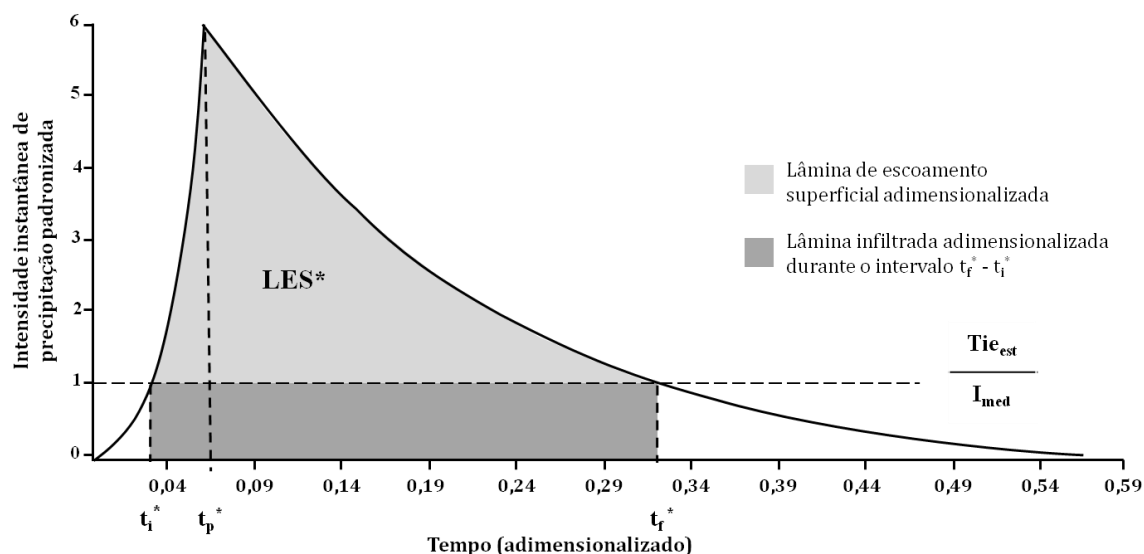


Figura 10 - Perfil de precipitação adimensionalizado.

O escoamento superficial inicia quando a intensidade instantânea de precipitação é superior à taxa de infiltração da água no solo do leito da estrada ( $Tie_{est}$ ) e termina quando esta volta a se igualar a  $Tie_{est}$ . Considerando o perfil de precipitação adimensionalizado (Figura 10), tem-se que o escoamento superficial se inicia no tempo  $t_i^*$ , no qual  $i^*$  supera o valor resultante da relação entre  $Tie_{est}$  e  $i_{med}$  ( $Tie_{est} / i_{med}$ ), e termina no tempo  $t_f^*$ , em que  $i^*$  volta a se igualar a  $Tie_{est} / i_{med}$ . Durante o intervalo compreendido entre o  $t_i^*$  e  $t_f^*$ ,  $i^*$  supera o valor de  $Tie_{est} / i_{med}$  e, conseqüentemente, ocorre a produção de escoamento superficial.

A lâmina precipitada adimensionalizada que ocorre durante o intervalo entre os tempos padronizados de início ( $t_i^*$ ) e fim ( $t_f^*$ ) do escoamento superficial é obtida a partir da soma do valor resultante da integração da área correspondente ao ramo ascendente, de  $t_i^*$  a  $t_p^*$ , e da área correspondente ao ramo descendente do perfil, de  $t_p^*$  a  $t_f^*$ .

O valor adimensionalizado da LES ( $LES^*$ ) é obtido a partir da diferença entre a área do perfil correspondente à lâmina precipitada adimensionalizada, ocorrida durante o intervalo de tempo compreendido entre  $t_i^*$  e  $t_f^*$ , e a área correspondente à lâmina infiltrada, também adimensionalizada, que ocorre no leito da estrada durante o mesmo intervalo de tempo.



A lâmina infiltrada é obtida pelo produto de  $Tie_{est} / i_{med}$  pelo intervalo de tempo em que ocorre o escoamento superficial ( $t_f^* - t_i^*$ ). Portanto, o cálculo de  $LES^*$  é realizado a partir da equação:

$$LES^* = \int_{t_i^*}^{t_p^*} a e^{b t^*} dt + \int_{t_p^*}^{t_f^*} c e^{-d t^*} dt - (t_f^* - t_i^*) \frac{Tie_{est}}{i_{med}} \quad (21)$$

Os valores de  $LES^*$  variam entre zero e um e representam a porcentagem da lâmina precipitada que é convertida em escoamento superficial. Sendo assim, para a transformação da lâmina de escoamento superficial em seu valor real é necessário multiplicar esse valor pela lâmina total precipitada (P), obtendo-se assim a LES em mm.

Os cálculos descritos anteriormente são realizados para a obtenção do volume do escoamento superficial que ocorre em um único dia da série. Dessa forma, na obtenção de uma série diária de volumes de escoamento superficial, os cálculos são refeitos para todos os eventos da série sintética de precipitação.

No que diz respeito ao volume remanescente ( $V_{Ri}$ ), este pode ser definido como a fração do volume armazenado na bacia de infiltração em determinado dia  $i$  ( $V_{Ai}$ ) que não infiltra totalmente ao longo desse mesmo dia, constituindo, portanto, volume remanescente que permanecerá na bacia e será somado valor de VES do dia seguinte.

O valor de  $V_R$  é obtido em função da taxa de infiltração estável da água no solo da bacia de infiltração ( $Tie_{bac}$ ) e das suas respectivas características geométricas (raio, largura e talude, a depender do formato adotado). Bacias cujas características geométricas proporcionam maior área da superfície líquida quando cheias apresentam aumento do volume infiltrado para uma mesma  $Tie_{bac}$  e, conseqüentemente, menores valores de  $V_{Ri}$ .

O cálculo do volume remanescente é realizado de acordo com o formato no qual se deseja dimensionar a bacia de infiltração, uma vez que as características geométricas são diferentes para cada formato adotado, conforme apresentado na sequência.

### 3.2.1.1.1. Cálculo do volume remanescente para bacias de formato retangular com seção triangular

O cálculo do valor correspondente ao volume remanescente nas bacias de infiltração retangulares com seção transversal triangular (Figura 9) é realizado utilizando-se a equação:

$$V_{Ri} = \frac{(Hi - \Delta Hi)^2 (s_1 + s_2) L_B}{2} \quad (22)$$

em que:

$V_{Ri}$  = volume armazenado remanescente do dia i, m<sup>3</sup>;

$H_i$  = altura atingida pela água na bacia de infiltração correspondente ao volume armazenado do dia i, m;

$\Delta H_i$  = rebaixamento do nível da água na bacia no dia i, m;

$s_1$  = talude de jusante da bacia de infiltração de formato retangular, m m<sup>-1</sup>;

$s_2$  = talude de montante da bacia de infiltração de formato retangular, m m<sup>-1</sup>; e

$L_B$  = largura da bacia de infiltração, m.

A altura atingida pela água correspondente ao volume armazenado é estimada pela equação:

$$Hi = \sqrt{\frac{2 V_{Ai}}{L_B (s_1 + s_2)}} \quad (23)$$

O rebaixamento do nível da água na bacia no dia i ( $\Delta H_i$ ), em decorrência de infiltração, é calculado pela equação:

$$\Delta H_i = \frac{Tie_{bac} \Delta t_{inf}}{1.000} \quad (24)$$

em que:

$Tie_{bac}$  = taxa de infiltração da água no solo da bacia de infiltração, mm h<sup>-1</sup>; e

$\Delta t_{inf}$  = intervalo de tempo em que ocorre a infiltração da água na bacia durante o dia i, h.

O valor de  $\Delta t$  é igual a 24 horas para os casos em que o volume remanescente é diferente de zero, ou igual ao intervalo de tempo necessário para que o volume armazenado na bacia infiltre completamente.

### 3.2.1.1.2. Cálculo do volume remanescente para bacias de formato retangular com seção trapezoidal

O valor correspondente ao volume remanescente nas bacias de infiltração retangulares com seção transversal trapezoidal (Figura 11) é calculado com a equação:

$$V_{Ri} = \frac{((Hi - \Delta Hi)^2 (s_1 + s_2) + 2B(Hi - \Delta Hi)) L_B}{2} \quad (25)$$

em que B é o comprimento do fundo da bacia de infiltração, m.

A altura atingida pela água correspondente ao volume armazenado na bacia no dia i é estimada pela equação:

$$Hi = \frac{-2B + \sqrt{-(2B)^2 + \frac{8 V_{Ai} (s_1 + s_2)}{L_B}}}{2 (s_1 + s_2)} \quad (26)$$

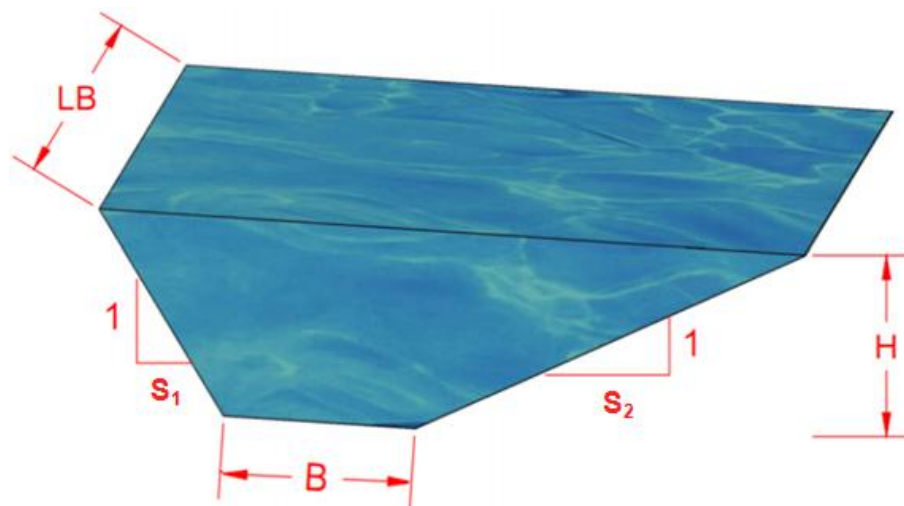


Figura 11 - Bacia de infiltração retangular com seção transversal trapezoidal.

### 3.2.1.1.3. Cálculo do volume remanescente para bacias circulares

O valor do volume remanescente em se tratando de bacias de infiltração circulares (Figura 12) é obtido a partir da equação:

$$V_{Ri} = \frac{1}{3} \pi (H_i - \Delta H_i)^2 (3R' - (H_i - \Delta H_i)) \quad (27)$$

em que  $R'$  é o raio da esfera correspondente à bacia de infiltração considerado para efeito de cálculo.

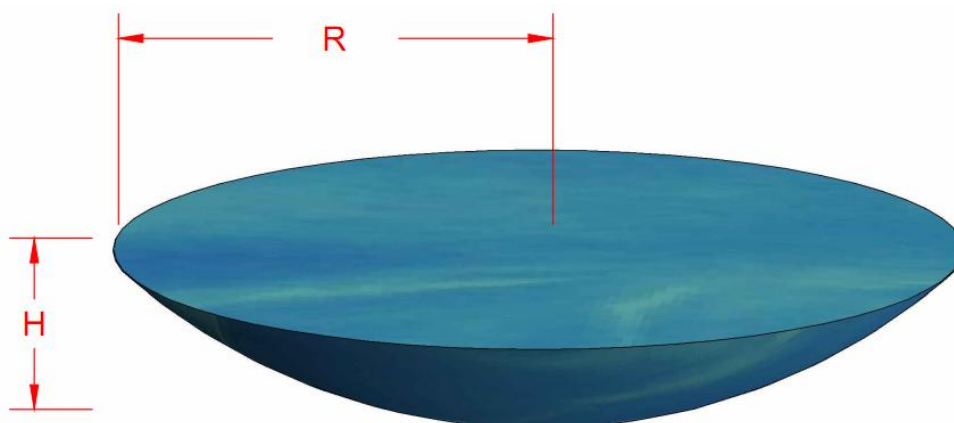


Figura 12 - Bacia de infiltração circular.

Considerando que o dimensionamento de bacias de infiltração de formato circular baseia-se nas equações para o cálculo do volume da calota de uma esfera, é necessária a utilização do raio da esfera ( $R'$ ) correspondente à calota considerada, conforme esquematizado na Figura 13. O valor de  $R'$  é utilizado somente para efeito de cálculo, sendo o valor real do raio da bacia de infiltração (raio da calota) corrigido após a determinação do volume requerido para a bacia de infiltração ( $V_B$ ). O processo metodológico para a obtenção do valor de  $V_B$  é descrito posteriormente no item 3.2.1.2.

A altura atingida pela água ( $H_i$ ) correspondente ao volume armazenado na bacia no dia  $i$  é estimada a partir da aplicação do método de Cardano e Tartaglia, utilizado para a solução de polinômios de terceiro grau, à seguinte equação:

$$\frac{3V_{Ai}}{\pi} = 3R'H_i^2 - H_i^3 \quad (28)$$

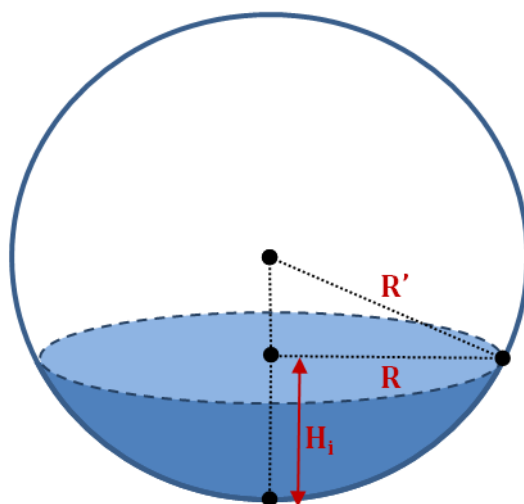


Figura 13 - Representação esquemática de uma calota esférica.

#### 3.2.1.1.4. Cálculo do volume remanescente para bacias semicirculares

Em se tratando de bacias de infiltração semicirculares (Figura 14), o volume remanescente é obtido pela seguinte equação:

$$V_{Ri} = \frac{2}{3} \left( \left( (H_i - \Delta H)(\sqrt{k^2 + 1}) \right)^3 \arcsen \left( \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} \right) \right) \quad (29)$$

em que  $k$  é o talude da bacia de infiltração de formato semicircular.

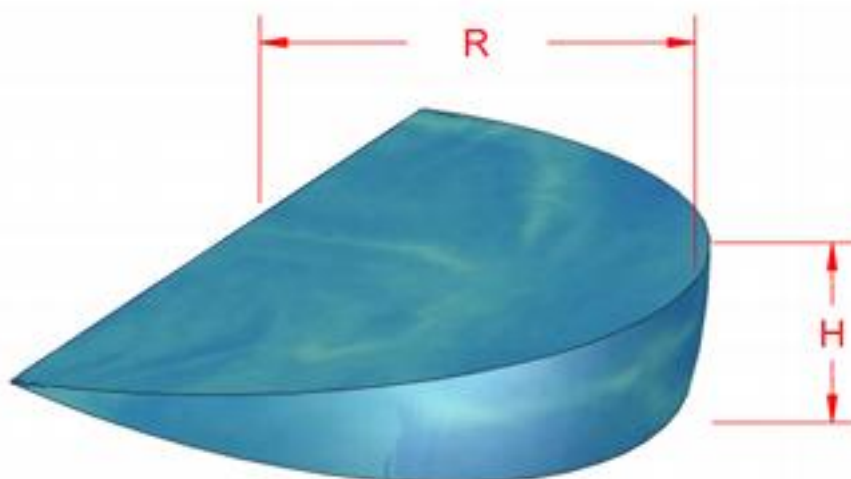


Figura 14 - Bacia de infiltração semicircular.

O valor de  $H_i$  é estimado pela equação (30).

$$H_i = \sqrt[3]{\frac{3 V_{Ai}}{2 \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}}\right) (k^2 + 1)^{3/2}}} \quad (30)$$

### 3.2.1.2. Volume requerido para a bacia de infiltração

Os cálculos de  $V_A$  descritos no item 3.1.2.1 são repetidos para todos os dias da série histórica considerada. A cada ano da série é identificado o valor máximo de  $V_A$  e, assim, é montada uma série histórica de valores de volume máximos anuais armazenados na bacia de infiltração. O volume requerido para a bacia de infiltração ( $V_B$ ) é obtido, aplicando-se, à série de volumes máximos acumulados a distribuição de Gumbel. Segundo Kite (1988), a magnitude do evento para séries finitas é dada por:

$$V_B = \bar{V}_{\max} + K' \sigma \quad (31)$$

em que:

$\bar{V}_{\max}$  = média dos volumes máximos armazenados, m<sup>3</sup>;

$K'$  = fator de frequência, adimensional; e

$\sigma$  = desvio-padrão dos volumes máximos armazenados em cada ano da série, adimensional.

O fator de frequência para séries finitas é calculado da seguinte forma:

$$K' = - \left( 0,45 + 0,7797 \ln \left( - \ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (32)$$

em que T é o período de retorno, em anos.

### 3.2.2. Representação do algoritmo desenvolvido para a aplicação do software

Na Figura 15 é apresentado um fluxograma simplificado do algoritmo desenvolvido para a aplicação do modelo. Na sequência é descrita de forma sucinta, cada etapa considerada no algoritmo.

1 – Dados do leito da estrada: inserção dos valores correspondentes ao padrão construtivo do leito (abaulado ou com superelevação), taxa de infiltração estável da água no leito da estrada ( $T_{ie_{est}}$ ), declividade transversal, largura ou semilargura (a depender do padrão construtivo adotado) e rugosidade hidráulica.

2 – Características hidráulicas e geotécnicas do canal da estrada: as características do canal a serem inseridas pelo usuário dizem respeito às variáveis tipo da seção transversal, declividade, comprimento, aprofundamento máximo tolerável e rugosidade. As características geotécnicas a serem fornecidas são a tensão crítica de cisalhamento, massa específica e erodibilidade do solo.

3 – Informações a respeito das características da bacia de infiltração: o usuário deverá informar o formato da bacia de infiltração e a profundidade desta. Em se tratando de bacias com os formatos retangulares com seção triangular e trapezoidal, é necessário que sejam fornecidos os valores dos taludes das paredes da bacia e o comprimento da base (esta última variável somente para bacias com seção trapezoidal, conforme apresentado na Figura 11).

4 – Série sintética de precipitação: inserir o arquivo contendo a série ou gerá-lo a partir do software ClimaBr.

5 – Determinação da perda de solo tolerável: obtida diretamente pelo software a partir das variáveis aprofundamento máximo tolerável e massa específica (equações 15 e 16 ).

6 – Determinação do hidrograma de escoamento na estrada: o sistema possibilita esse procedimento a partir dos dados de precipitação e período de retorno e das informações referentes às encostas, conforme metodologia descrita no item 3.1.2.1.

7 – Determinação do hidrograma de escoamento a cada metro do canal: a partir do escoamento advindo do leito da estrada, conforme item 3.1.2.2.

8 – Determinação da tensão cisalhante do escoamento para cada metro do canal: a partir da equação 11.

9 – Determinação da perda de solo a cada metro do canal: com base equação 12.

10 – Soma dos valores de perda de solo com os obtidos nos eventos anteriores: os valores de perdas de solo em cada metro do canal são acumulados em um arquivo temporário gerado pelo software, na medida em que estes ocorrem ao longo da série.

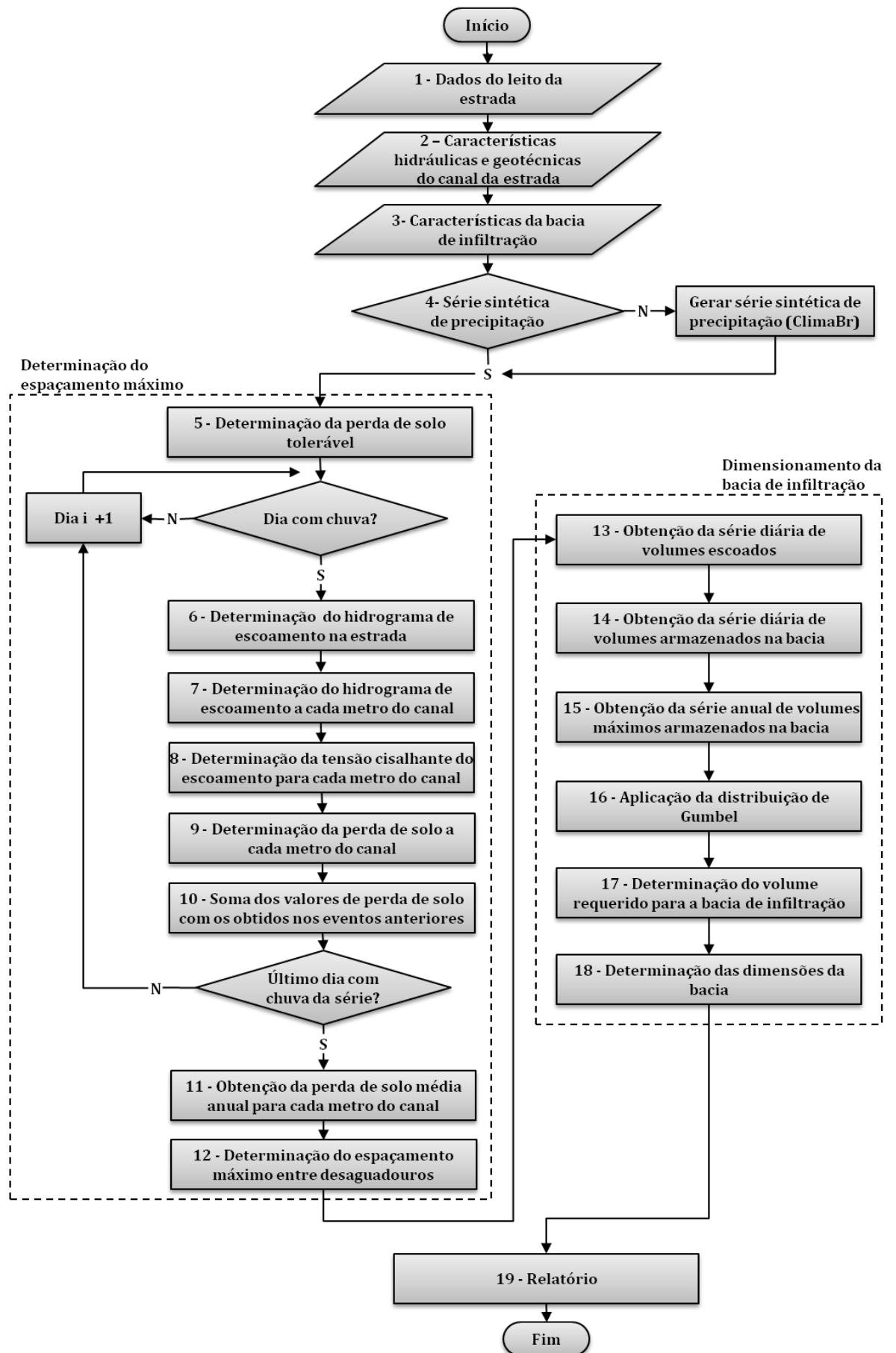


Figura 15 - Fluxograma simplificado do algoritmo para a aplicação do modelo.



11 – Obtenção da perda de solo média anual para cada metro do canal: após a realização das simulações para o último dia com chuva da série, é obtida a perda de solo média anual para cada metro do canal a partir do arquivo com as perdas de solo acumuladas ao longo da série.

12 – Determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros: a partir da identificação do comprimento máximo do canal em que a perda média de solo é menor ou igual à perda de solo tolerável.

13 – Obtenção da série diária de volumes escoados: a cada dia com chuva da série o volume de escoamento superficial é estimado a partir do produto entre a lâmina de escoamento superficial (equação 21) e a área de drenagem da estrada.

14 – Obtenção da série diária de volumes armazenados na bacia: a partir dos procedimentos descritos no item 3.2.1.1.

15 – Obtenção da série anual de volumes máximos armazenados na bacia: a partir da identificação do valor máximo em cada ano da série diária de volumes armazenados na bacia.

16 – Aplicação da distribuição de Gumbel: equações 30 e 31.

17 – Determinação do volume requerido para a bacia de infiltração: a partir da aplicação das equações 30 e 31.

18 – Determinação das dimensões da bacia de infiltração: tais valores são obtidos de acordo com o volume requerido para a bacia e o formato geométrico previamente definido para esta.

19 – Relatório: geração de um relatório que consta informações a respeito dos valores das variáveis de entrada considerados no dimensionamento e os resultados obtidos a partir da aplicação do software.

### **3.3. Avaliação do modelo**

Na avaliação da metodologia proposta foram realizados dois procedimentos distintos: a análise comparativa dos valores de aprofundamento do canal estimados pelo modelo desenvolvido com os obtidos por meio de observações realizadas em campo; e a análise de sensibilidade do modelo às variáveis por ele consideradas.

### 3.3.1. Análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os observados em campo

A análise comparativa foi realizada com base nos dados de aprofundamento do canal estimados pelo modelo desenvolvido e os observados (medidos) em condições reais de campo. Na análise comparativa foi considerada a evolução do aprofundamento do canal em escala temporal (durante o período de observação) e em escala espacial (ao longo do canal da estrada).

#### 3.3.1.1. Caracterização da área de estudo

Os dados observados de aprofundamento do canal foram obtidos em um trecho de estrada não pavimentada do setor de gado de corte da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, localizado entre os paralelos 7701069 e 7701284 m S e meridianos 722063 e 7220630 m E. As características do trecho monitorado estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do trecho de estrada monitorado

<b>Especificação</b>	<b>Descrição</b>
Comprimento do trecho	260 m
Largura da estrada	3,5 m
Declividade transversal	6%
Declividade do canal	5,6 %
Seção transversal do canal	triangular
Taludes do canal: $m_1$	3
$m_2$	1
Tipo de solo <sup>1</sup>	Latossolo Vermelho (LV)
Taxa de infiltração estável do leito da estrada ( $T_{ie_{est}}$ )	1 mm h <sup>-1</sup>
Textura <sup>2</sup> : - areia	25%
- silte	9%
- argila	66%
Massa específica do solo do canal ( $\rho$ )	1,24 g cm <sup>-3</sup>
Tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ )	7,6 Pa
Erodibilidade do solo (K)	0,0044 g cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>

<sup>1</sup> Classificado de acordo com os critérios apresentados pela EMBRAPA (2006).

<sup>2</sup> Classificação: ABNT 6502 (1995).

O dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo correspondentes ao trecho monitorado foram obtidos por ENRIQUEZ (2011)<sup>1</sup>, de acordo com a metodologia proposta por Griebeler et al. (2005b).

### **3.3.1.2. Dados de precipitação**

Conforme mencionado anteriormente, no modelo desenvolvido foram utilizados dados sintéticos de precipitação para a realização das simulações e obtenção das perdas de solo em cada metro do canal de drenagem da estrada. Uma série sintética de dados de precipitação apresenta características estatísticas idênticas às da série histórica de dados observados em campo, sendo, portanto, representativa quando se trata da série como um todo. No entanto, quando se trata da obtenção das características de precipitação para um dia específico é fundamental a utilização de dados medidos.

Considerando a realização de análises para a avaliação dos dados estimados pelo modelo ao longo do período de observação, foi necessária a utilização de perfis reais de precipitação. Esses perfis foram obtidos a partir da estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa (latitude -20° 45' 36" e longitude - 42° 51' 36"), a cerca de 1.500 m do trecho monitorado.

Foi desenvolvida, ainda, uma versão do software para a estimativa do aprofundamento do canal que considera perfis reais de precipitação. Esta versão do software foi utilizada exclusivamente para a avaliação do modelo, não sendo, portanto, disponibilizada.

### **3.3.1.3. Sistema de monitoramento**

Para a instalação do sistema de monitoramento, adequou-se primeiramente o leito e construiu-se o canal de drenagem da estrada. A adequação do leito da estrada foi realizada com o auxílio de uma motoniveladora (Figura 16), objetivando padronizar a declividade transversal dessa, a fim de propiciar rápida drenagem da água da chuva que cai sobre o leito para o canal de drenagem.

O canal de drenagem também foi construído com o auxílio de uma motoniveladora (Figura 17), objetivando padronizar a seção transversal do canal

---

<sup>1</sup>ENRIQUEZ, A. G. **Determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do canal de uma estrada não pavimentada em um Latossolo Vermelho-amarelo**: Dissertação de mestrado. Viçosa, 2011 (Não publicado até a data de defesa desta tese).

de maneira a aproximar o máximo possível das condições de escoamento neste com as consideradas no modelo.

Os dados de aprofundamento foram medidos em seções espaçadas de 10 m entre si ao longo de 190 m de um trecho de estrada não pavimentada. A montante do trecho monitorado havia um segmento de estrada que não foi monitorado, porém, que possuía área de drenagem equivalente a 80 m do trecho monitorado. Assim, admitindo-se o segmento de estrada a montante que drena para o trecho monitorado, foram considerados os dados de aprofundamento do canal correspondentes ao intervalo de 80 a 260 m da estrada.



Figura 16 - Adequação do leito da estrada.



Figura 17 - Construção do canal de drenagem da estrada.

Para a medição dos dados de aprofundamento propriamente ditos foi utilizada uma régua graduada com precisão milimétrica, um nível (de pedreiro), um suporte de madeira para o nível e estacas de referência de nível instaladas na margem externa do canal da estrada em cada seção monitorada (Figura 18). Nessas seções foram medidas as distâncias entre o fundo do canal e a base do suporte de madeira apoiado sobre a estaca de referência de nível e devidamente nivelado. Nesse esquema, os dados de aprofundamento do canal foram obtidos a partir da diferença entre os valores observados em duas datas de medição distintas.

Neste trabalho não foi adotada periodicidade fixa para a medição dos dados, uma vez que a ocorrência das chuvas não é regular. Assim, o critério adotado para proceder a ida ao campo para a medição dos dados foi após a ocorrência de cada evento ou depois de determinado período com chuva, de acordo com as condições de acesso ao trecho monitorado. O período de monitoramento do aprofundamento do canal teve início em outubro de 2010, com término em abril de 2011.

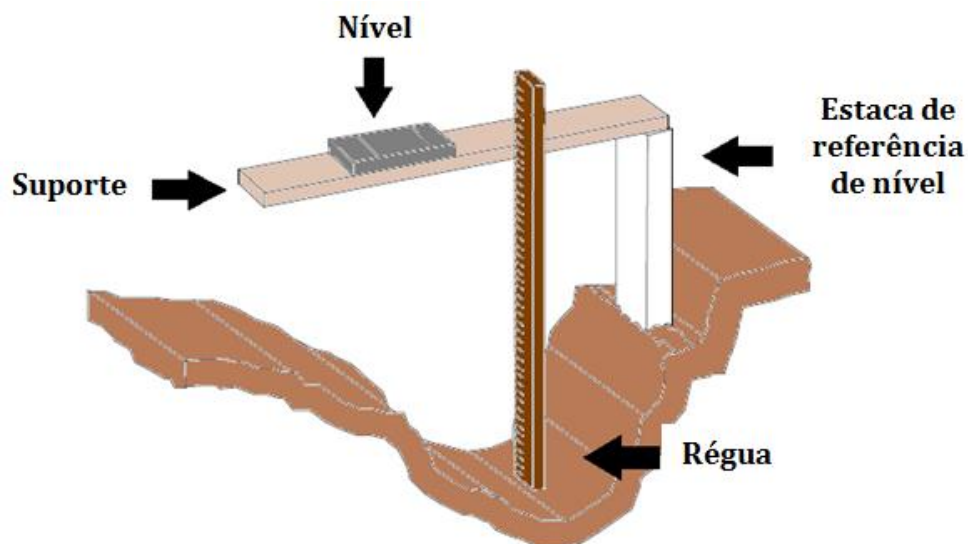


Figura 18 - Esquema do sistema de medição do aprofundamento em uma seção transversal do canal da estrada.

### 3.3.1.4. Análises estatísticas para a comparação dos dados estimados e observados

#### 3.3.1.4.1. Análise de regressão linear passando pela origem

A análise de regressão linear foi utilizada para testar a hipótese da inexistência de diferenças significativas entre os dados de aprofundamento do canal estimados pelo modelo proposto e os dados observados em campo.

Admitindo-se uma condição ótima correspondente a uma função cujos coeficientes linear e angular seriam de 0 e 1, respectivamente, foi considerada na avaliação do modelo o ajuste de uma função linear passando pela origem (MONTGOMERY; PECK, 1992), de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_i = \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (33)$$

em que:

$Y_i$  = dados estimados;

$\beta_1$  = coeficiente angular;

$X_i$  = dados observados; e

$\varepsilon_i$  = erro.

Sendo o estimador de  $\beta_1$  correspondente a:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (34)$$

Na sequência foi aplicado o *test t* de *Student*, a 1% de probabilidade, admitindo-se as hipóteses:

$$H_0: \beta_1 = 1$$

$$H_a: \beta_1 \neq 1$$

Considerando a função linear ajustada passando pela origem tem-se que:

$$t_c = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{\sqrt{V(\hat{\beta}_1)}} \quad (35)$$

$$V(\hat{\beta}_1) = \frac{QMR}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (36)$$

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 \quad (37)$$

$$SQ_{Reg} = \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i^2 = \beta_1^2 \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (38)$$

De acordo com Kvalseth (1985) e Montgomery e Peck (1992), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de uma função linear ajustada passando pela origem pode ser calculado a partir da equação:

$$r^2 = \frac{SQ_{Reg}}{SQ_{total}} \quad (39)$$

### 3.3.1.4.2. Índice de concordância de Willmott

O índice de concordância ou de ajuste (d) de Willmott et al. (1985) indica o grau de aproximação dos valores estimados em relação aos valores observados em campo. Seus valores variam entre zero, em que não existe concordância, e 1, para a concordância perfeita. O índice de concordância de Willmott et al. (1985) foi calculado a partir da equação:

$$d = 1 - \frac{\sum_i^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_i^n \left[ \left( |Y_i - \bar{X}_i| \right) + \left( |X_i - \bar{X}_i| \right) \right]^2} \quad (40)$$

em que:

- d = índice de concordância;
- Y<sub>i</sub> = dados estimados;
- X<sub>i</sub> = dados observados; e
- $\bar{X}_i$  = médias dos dados observados.

### 3.3.2. Análise de sensibilidade do modelo

Adotando-se a metodologia proposta por Nearing et al. (1990), foi analisada a sensibilidade das principais variáveis de entrada consideradas pelo modelo, a qual se baseia na equação:

$$S_M = \frac{\frac{E_{\max_1} - E_{\max_2}}{E_{\max_{12}}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (41)$$

em que:

- S<sub>M</sub> = sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;
- E<sub>max<sub>1</sub></sub> = espaçamento máximo entre desaguadouros, obtido pelo modelo para o menor valor de entrada;
- E<sub>max<sub>2</sub></sub> = espaçamento máximo entre desaguadouros, obtido pelo modelo para o maior valor de entrada;
- E<sub>max<sub>12</sub></sub> = média dos espaçamentos máximo entre desaguadouros obtida com os valores de entrada;



- $I_1$  = menor valor de entrada da variável em análise;  
 $I_2$  = maior valor de entrada da variável em análise; e  
 $I_{12}$  = média dos valores de entrada.

De acordo com McCuen e Snyder (citados por EVANGELISTA, 2003), o índice  $S_M$  reflete a mudança gerada na saída do modelo pela alteração dos parâmetros de entrada, permitindo ainda comparar a sensibilidade dos diferentes parâmetros. Quanto maiores forem os valores de  $S_M$  mais sensível é o modelo à variável de entrada, enquanto os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade expressiva à variável de entrada.

Para a realização das análises de sensibilidade foi criado um arquivo com dados de entrada, sendo este considerado a condição-padrão. Em todas as simulações realizadas, foi alterada a característica em análise, permanecendo as demais constantes. Na Tabela 2 estão apresentados os valores estabelecidos para as variáveis consideradas pelo modelo, adotados como condição-padrão para a análise de sensibilidade do mesmo.

Neste trabalho, os cálculos para a obtenção do espaçamento máximo entre desaguadouros foram realizados tendo como base o ano hidrológico com início no dia primeiro de julho.

As variáveis a serem analisadas foram definidas tendo como base os resultados de sensibilidade obtidos por Griebeler (2002), sendo selecionadas aquelas que apresentaram maiores índices de sensibilidade. Dessa forma, foram feitas análises da sensibilidade do modelo desenvolvido a diferentes valores de erodibilidade, tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal da estrada. Na Tabela 3 estão apresentados os valores adotados para cada variável considerada.

Tabela 2 - Dados de entrada relativos à condição-padrão considerada para as análises de sensibilidade

<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>Precipitação</b>	
Localidade	Viçosa-MG
Tamanho da série sintética	30 anos
Período de manutenção da estrada	2 anos
<b>Estrada</b>	
Taxa de infiltração do leito da estrada	1 mm/h
Declividade transversal	3 %
Semilargura	3 m
Rugosidade hidráulica	0,012 s m <sup>-1/3</sup>
<b>Canal</b>	
Tipo	Triangular
Seção transversal	m <sub>1</sub> = 10 e m <sub>2</sub> = 1
Declividade	7,5 %
Rugosidade hidráulica	0,018 s m <sup>-1/3</sup>
Aprofundamento máximo	10 cm
<b>Solo</b>	
Massa específica do solo	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Tensão crítica de cisalhamento	7,6 Pa
Erodibilidade do solo	0,0044 g cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>
<b>Área externa de contribuição</b>	
Não há. Área de drenagem composta apenas pelo leito da estrada	

Tabela 3 - Valores adotados para a realização das análises de sensibilidade do modelo às variáveis erodibilidade, tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal da estrada

<b>Variável</b>	<b>Valores adotados</b>
Erodibilidade	0,001; 0,003; 0,0044; 0,006 e 0,008 g cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>
Tensão crítica de cisalhamento	2; 4; 6; 7,6; 10 Pa
Declividade do canal	2,5; 5; 7,5; 10; e 15%

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando-se que para as simulações dos resultados a partir do modelo proposto é fundamental a aplicação do software desenvolvido, os resultados correspondentes a este são apresentados antes dos daqueles relativos aos demais objetivos deste trabalho.

### 4.1. Software para a aplicação do modelo

O software para a aplicação do modelo foi denominado SiDE, sendo desenvolvido em ambiente de programação Delphi e programado para ser usado em computadores com sistema computacional Windows XP ou superior. No processo de desenvolvimento do SiDE buscou-se a elaboração de uma interface intuitiva visando a facilitação do uso do software pelos usuários.

Na Figura 19 é apresentada a tela de abertura do SiDE, que informa a respeito do objetivo do software bem como o grupo de pesquisa responsável pelo seu desenvolvimento.



Figura 19 - Tela de apresentação do software.

O software foi estruturado em quatro módulos principais: Estradas; Bacias; Precipitação; e Resultados. Nos módulos Estrada, Bacia e Precipitação são inseridos os valores das variáveis requeridas pelo modelo e, no módulo

Resultados, são apresentados os resultados propriamente ditos do dimensionamento. O módulo Estrada (Figura 20) foi dividido em dois submódulos: Leito da Estrada e Canal da Estrada.

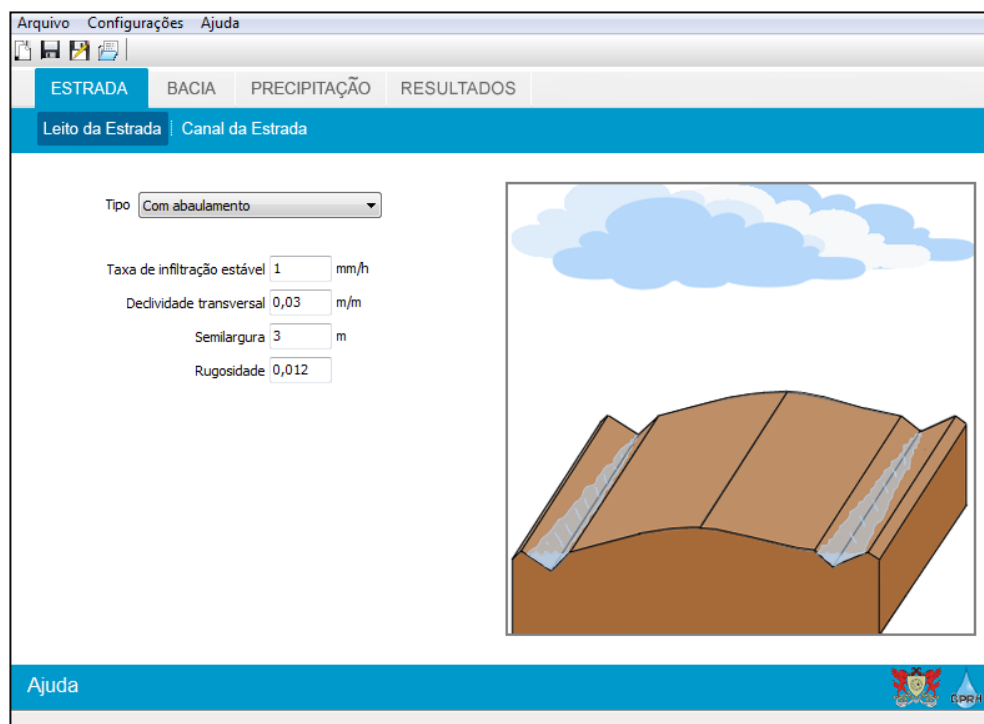


Figura 20 - Módulo de entrada de dados da estrada.

Na Figura 20 está apresentada a tela para o preenchimento de dados relacionados ao submódulo Leito da Estrada. Inicialmente, o usuário deverá selecionar o tipo de perfil transversal do leito da estrada mais representativo do local em que se deseja projetar o sistema de drenagem. O software dispõe de duas opções de tipos de seção transversal: estradas com leito abaulado (Figura 20) e com superelevação (Figura 21). Os dados do leito da estrada a serem fornecidos são: taxa de infiltração estável da água no leito da estrada, declividade transversal, semilargura e rugosidade do leito da estrada. Para estradas com superelevação, a variável semilargura é substituída pela largura da estrada (Figura 21).

No desenvolvimento deste trabalho buscou-se elaborar um software com interface que permita o seu uso, principalmente em um nível de extensão, ou seja, acessível a profissionais que trabalham com a implantação e manutenção de estradas não pavimentadas. Para tanto, o software baseia-se na modelagem em base diária do escoamento superficial e o consequente aprofundamento do canal

de drenagem da estrada, processos que são tratados internamente pelo software sem exigir do usuário um conhecimento minucioso a respeito desses.

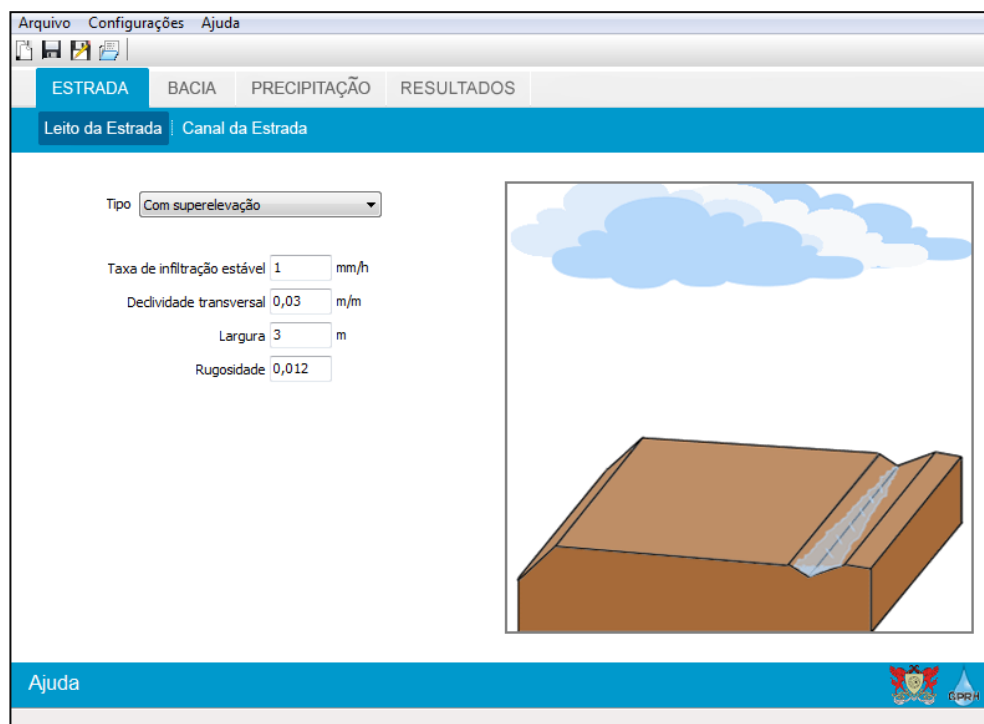
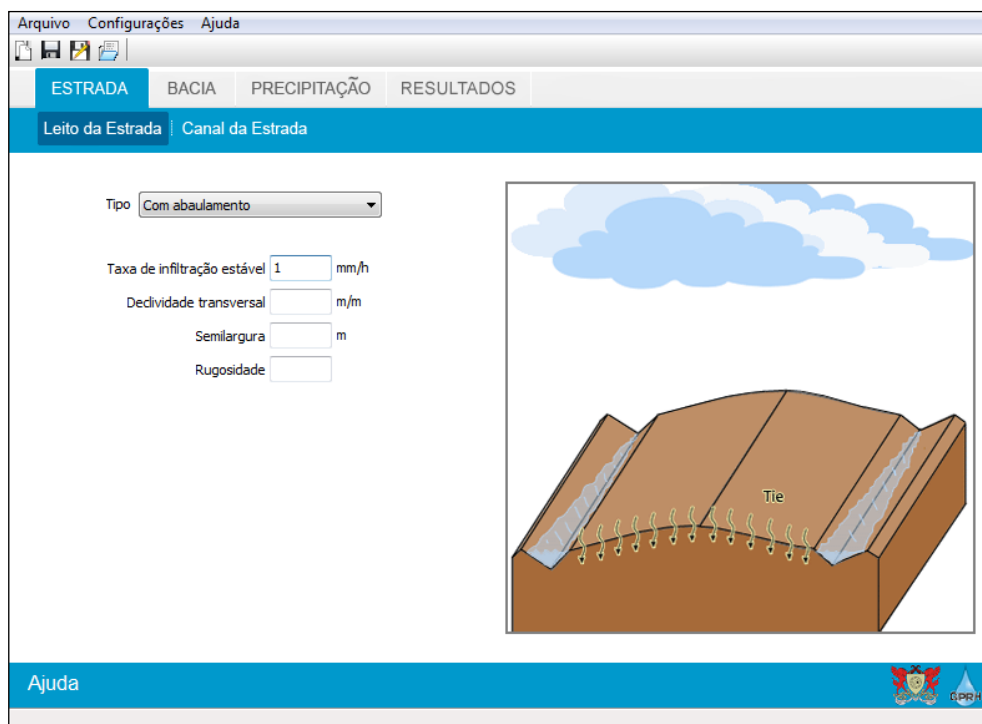


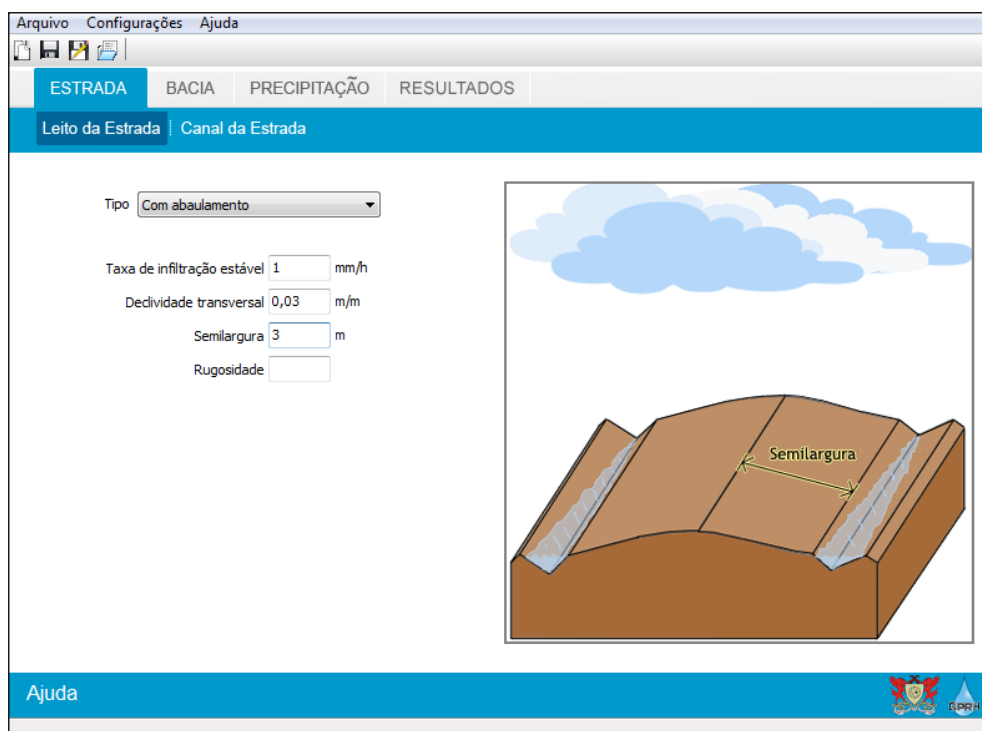
Figura 21 - Leito da estrada com superelevação.

Visando orientar a utilização do software foi implementada uma funcionalidade que objetiva auxiliar o usuário no processo de preenchimento dos dados. Na medida em que o usuário clica nos campos correspondentes a cada variável considerada é apresentada uma ilustração, para melhor compreensão da variável em questão (Figura 22).

Na Figura 22 (A) é ilustrada a tela fornecida pelo software ao usuário para o preenchimento da variável taxa de infiltração da água no solo do leito da estrada, em que setas indicam que se trata da variável que representa a taxa com que a água passa da superfície do leito da estrada para o solo. Na Figura 22 (B) é ilustrada a tela de preenchimento da variável semilargura, que visa evitar possíveis enganos relacionados ao preenchimento equivocado do valor da largura da estrada no lugar da semilargura em se tratando de estradas com leito abaulado.



(A)



(B)

Figura 22 – Telas para orientar o preenchimento dos valores das variáveis taxa de infiltração estável (A), semilargura (B).

Para ilustrar a funcionalidade desenvolvida a fim de orientar o usuário no preenchimento dos dados, foram apresentadas somente as variáveis taxa de infiltração estável e semilargura da estrada. Entretanto, essa funcionalidade

também se encontra disponível para as demais variáveis consideradas no submódulo Leito da Estrada, incluindo aquelas relativas a estradas com seção transversal com superelevação, bem como para as variáveis relacionadas ao canal de drenagem da estrada.

Na Figura 23 é apresentada a tela correspondente ao submódulo Canal da Estrada, onde são inseridos os dados relacionados ao canal de drenagem da estrada e características físicas do solo deste. Inicialmente, devem ser definidas a forma da seção transversal do canal (triangular ou trapezoidal) e suas dimensões, além da declividade, do comprimento, do aprofundamento máximo tolerável e de sua rugosidade.

Para definir a rugosidade, o software dispõe de um módulo com valores para diferentes condições de superfície das paredes do canal. As características do solo do canal necessárias são: tensão crítica de cisalhamento, massa específica e erodibilidade.

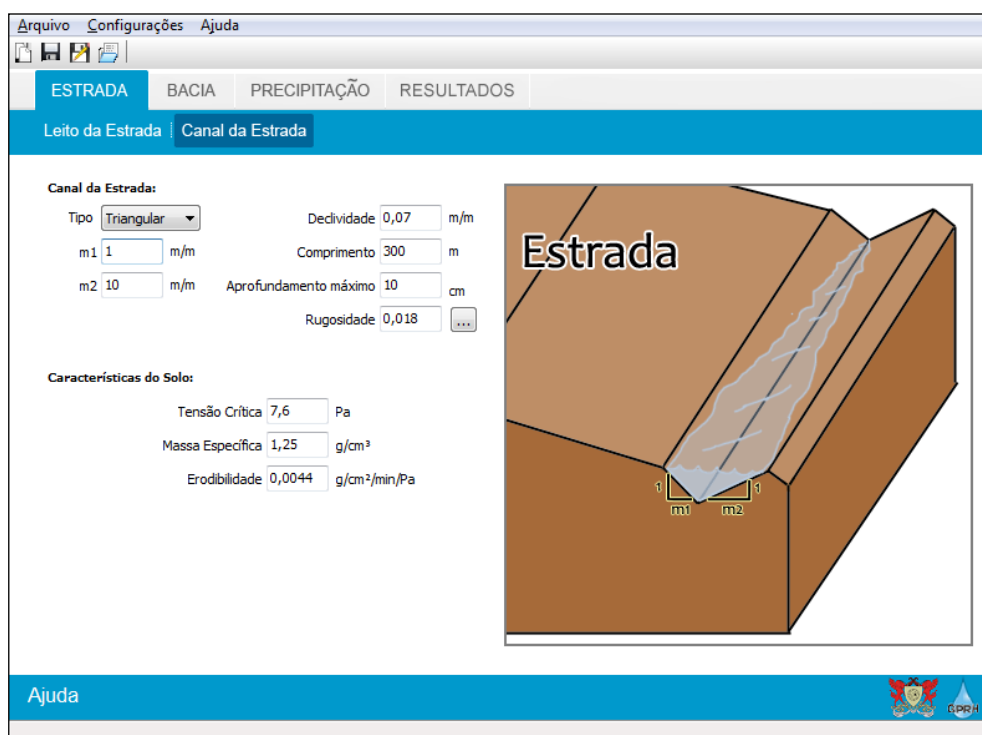


Figura 23 - Módulo para a inserção dos dados do canal da estrada.

O valor a ser preenchido do comprimento do canal da estrada não representa a distância entre desaguadouros, mas sim um valor limite para análise que o software utilizará nas simulações para a obtenção do aprofundamento do canal, uma vez que as simulações serão realizadas, metro a metro, até o valor



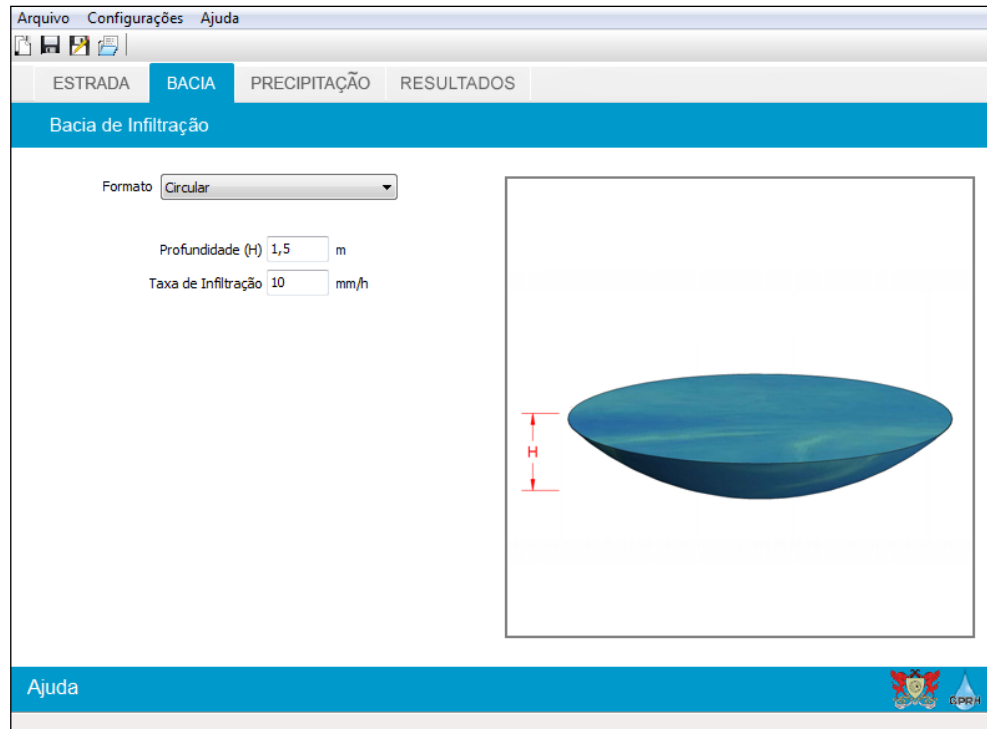
definido para o comprimento. Caso o espaçamento recomendável entre os desaguadouros seja superior a esse comprimento, este deverá ser aumentado. A definição de um valor muito alto poderá trazer como principal transtorno um tempo de processamento mais elevado.

As Figuras 24 e 25 ilustram as opções de formato de bacias de infiltração disponíveis no software no módulo Bacia. O dimensionamento das bacias de infiltração é feito a partir do volume requerido para estas, obtido pelo modelo para o período de retorno do projeto. O usuário deverá fornecer as características da bacia que deseja para o projeto desta, tendo como resultado gerado pelo software, além do volume requerido para a bacia de infiltração, o raio ou a largura da bacia, a depender do formato escolhido.

Para bacias de infiltração de formato circular (Figura 24 A) e semicircular (Figura 24 B) são necessárias informações a respeito de suas profundidades desejadas e taxa de infiltração da água no solo da bacia. Para as bacias de infiltração de formato retangular com seção transversal triangular (Figura 25 A), além das informações de profundidade e taxa de infiltração são necessários os valores dos taludes da bacia. Para o dimensionamento de bacias de formato retangular com seção trapezoidal (Figura 25 B) são requeridas as mesmas informações necessárias para as bacias com seção triangular, porém, deve ser fornecido também o valor do comprimento da base da bacia.

No módulo para o preenchimento dos dados de precipitação (Figura 26) são necessárias informações a respeito do período de manutenção da estrada, o período de retorno do projeto e a série sintética de precipitação. Esta é gerada com o software ClimaBr, que pode ser acessado diretamente clicando-se no botão “Gerar série sintética” (Figura 26).

**A**



**B**

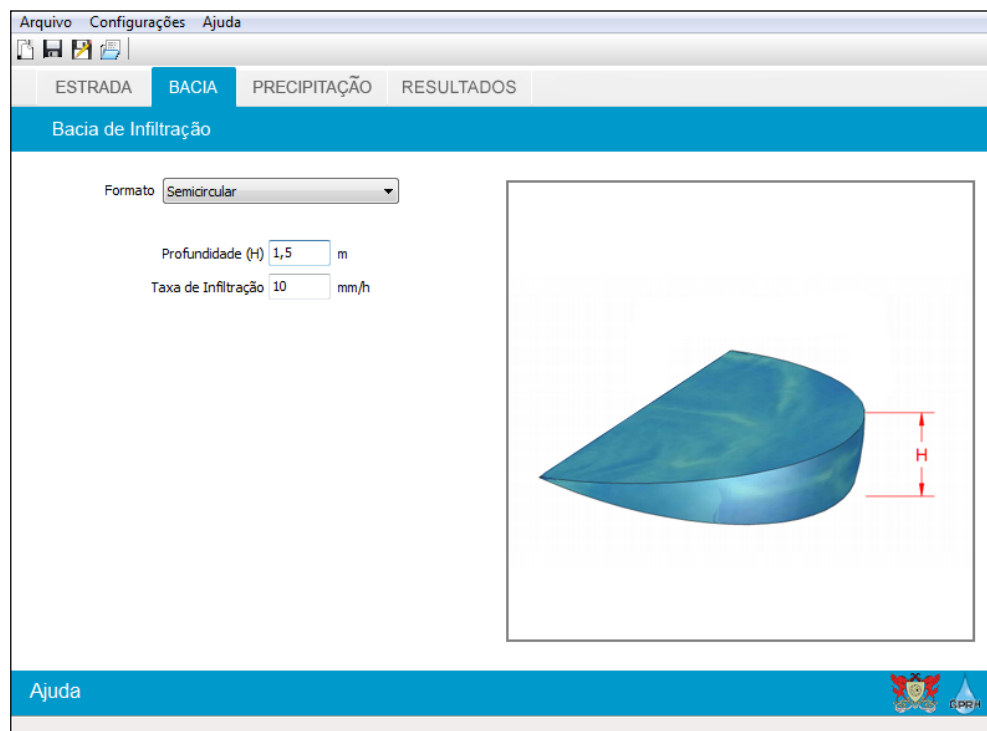
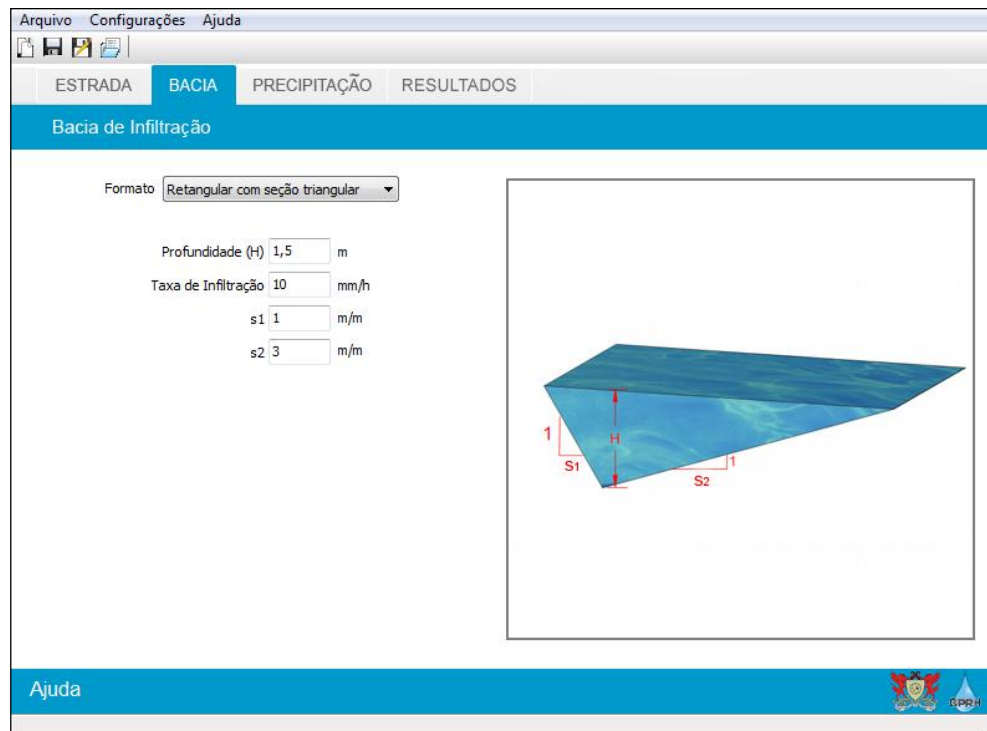


Figura 24 - Módulo para entrada dos dados referentes a bacias de infiltração circulares (A) e semicirculares (B).

A



B

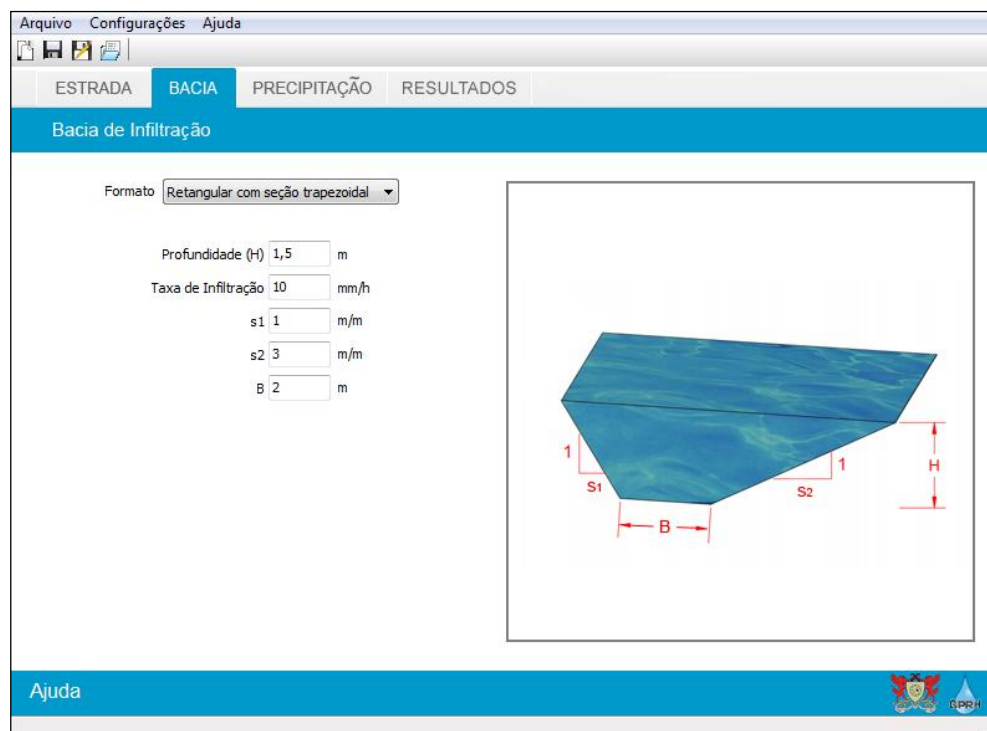


Figura 25 - Módulo para entrada dos dados referentes a bacias de infiltração retangulares com seção triangular (A) e com seção trapezoidal (B).

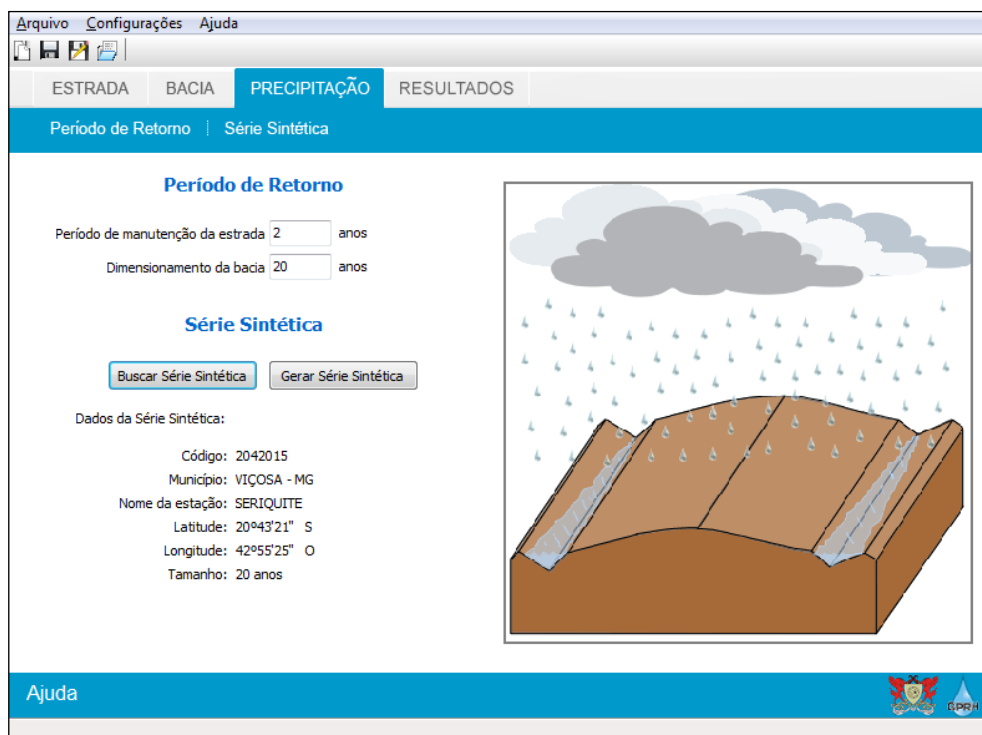


Figura 26 - Módulo para a inserção dos dados relacionados à precipitação.

Neste trabalho foram realizadas adaptações no software ClimaBr no módulo para a seleção da estação pluviométrica de interesse, conforme apresentado na Figura 27, permitindo ao usuário selecionar a estação de interesse clicando diretamente no mapa ou na tabela presentes no módulo. Ainda é disponibilizada no software uma ferramenta de busca da estação de interesse, estabelecendo como critério o nome ou o código da estação ou o nome do município em que esta se encontra. Caso o usuário já disponha de um arquivo gerado pelo ClimaBr contendo a série sintética de precipitação, basta clicar no “botão buscar série sintética” e carregar o arquivo.

Depois de inserir todas as informações necessárias, o usuário deverá clicar no módulo “Resultados”, para que o modelo inicie as simulações. No caso do preenchimento incompleto das variáveis, o processo de simulação não inicializará e uma tela será aberta solicitando o preenchimento dos valores ainda não fornecidos pelo usuário, conforme representado na Figura 28. Uma vez corrigidos eventuais problemas relacionados ao preenchimento e clicando novamente no botão “Resultados” são iniciadas as simulações no software.

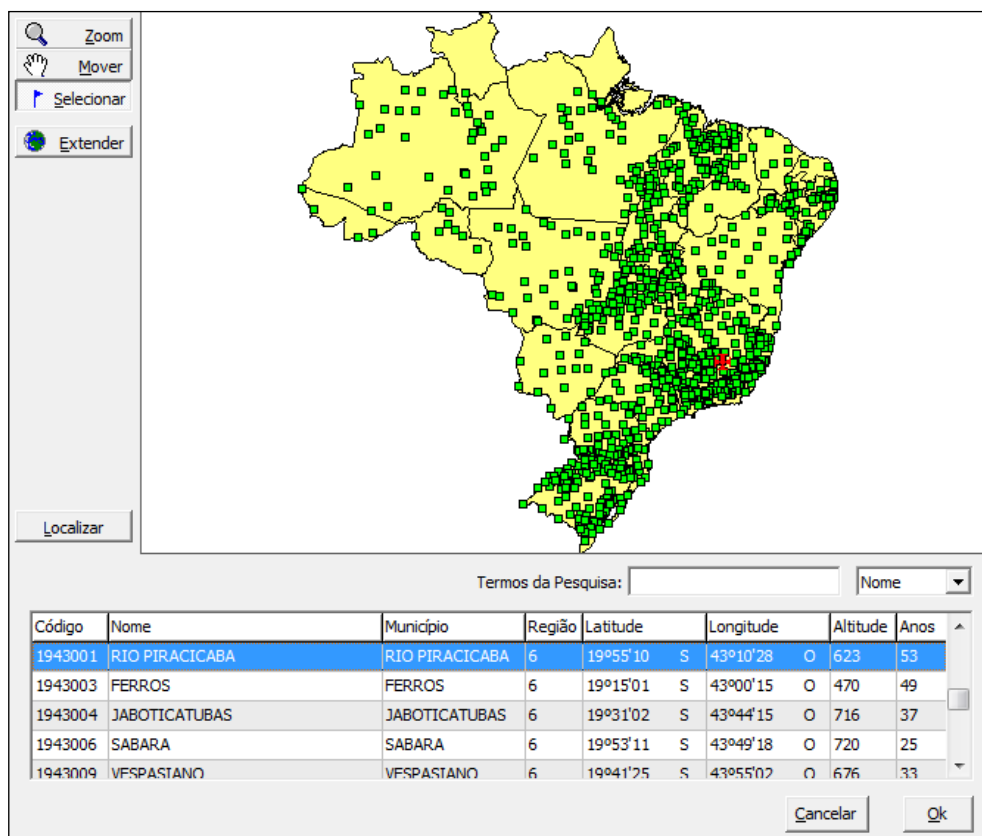


Figura 27 - Módulo de seleção da estação pluviométrica do software ClimaBr para a geração da série sintética de precipitação.

Durante as simulações é apresentada uma tela indicando o andamento do processo para cada ano da série de precipitação (Figura 29).

Na Figura 30 está apresentada a tela correspondente ao módulo Resultados. Nos resultados referentes ao canal da estrada são mostrados os valores da perda de solo tolerável, perda de solo estimada para o espaçamento máximo entre desaguadouros, espaçamento máximo entre desaguadouros e o aprofundamento do canal correspondente a esse espaçamento.

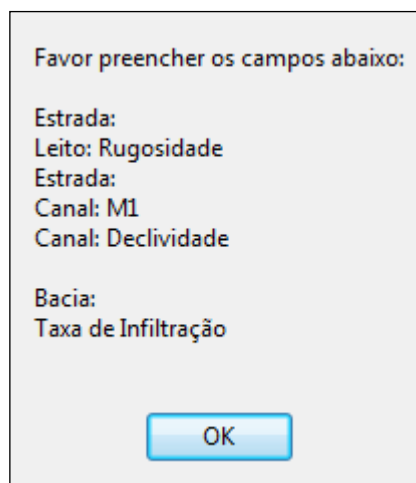


Figura 28 - Tela para a orientação a respeito de dados que não foram preenchidos.

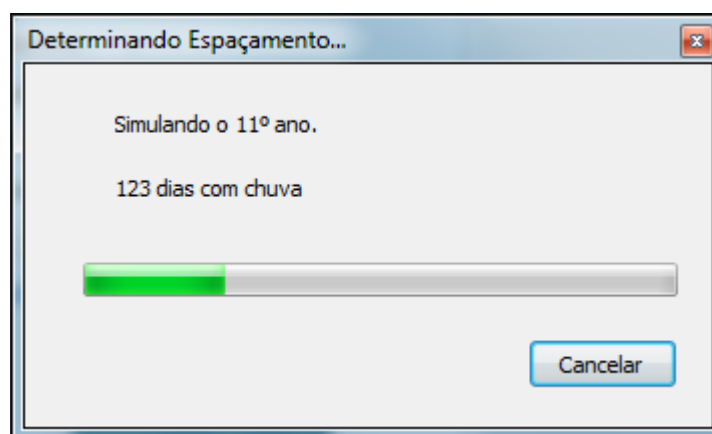


Figura 29 - Tela indicando o andamento das simulações para a determinação do espaçamento entre desaguadouros e do volume da bacia de infiltração.

Na tela de resultados gerados pelo modelo (Figura 30) também é apresentada uma tabela com dados de aprofundamento do canal e perdas de solo correspondentes a cada metro do canal até o comprimento definido para a realização das simulações e, ainda, os resultados referentes ao dimensionamento das bacias de infiltração.

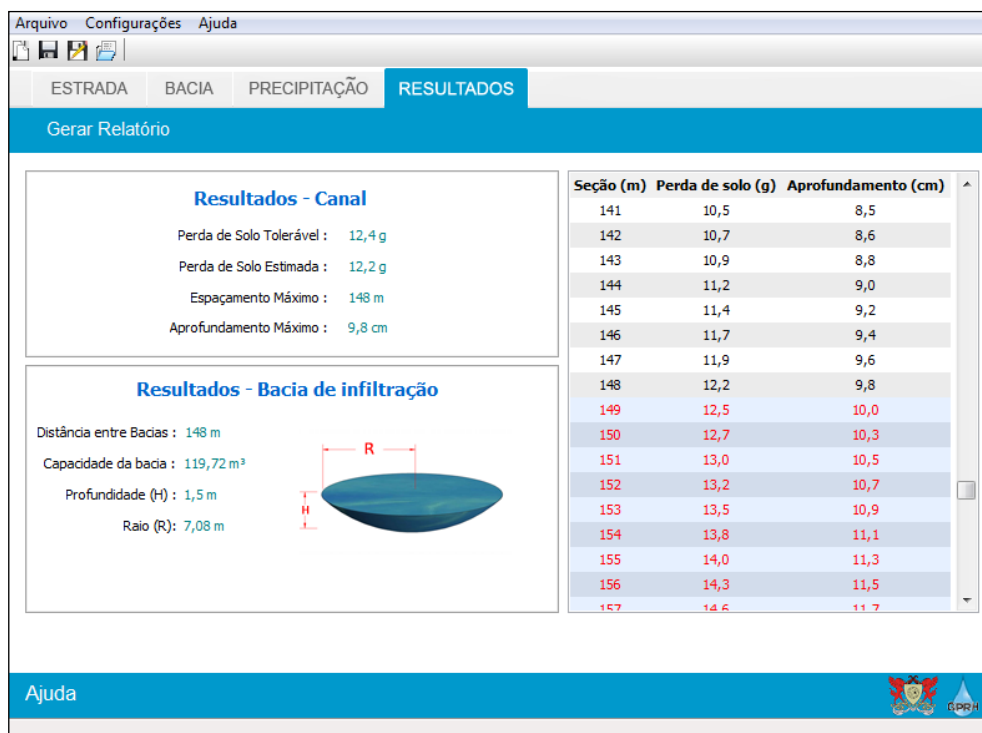


Figura 30 - Tela apresentando os resultados gerados pelo software.

Com relação aos resultados da bacia de infiltração são apresentadas as seguintes informações: espaçamento entre bacias de infiltração, correspondente ao próprio espaçamento entre desaguadouros; capacidade da bacia; profundidade; raio (bacias circulares e semicirculares) ou largura da bacia (bacias retangulares); e um esquema representativo das características da bacia.

Nas situações em que se fizer necessária a alteração da distância entre bacias, adequação das características geométricas ou até mesmo a modificação do formato da bacia pode-se proceder ao redimensionamento das bacias a partir do módulo disponível no software “Redimensionar bacia” (Figura 31).

### Redimensionar bacia de infiltração

Distância entre as bacias  m

Período de retorno  anos

Formato:

Profundidade  m

Tie da Bacia  mm/h

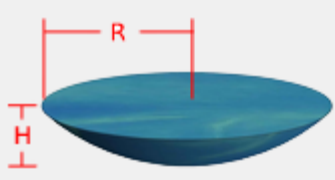


Figura 31 - Módulo para alteração das características pertinentes às bacias de infiltração.

Uma vez obtidos os resultados relativos ao canal da estrada e às bacias de infiltração, o software permite acessar um relatório em que constam as informações consideradas no projeto e os resultados do dimensionamento (Figura 32).



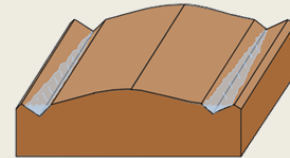


## RELATÓRIO

### ESTRADA

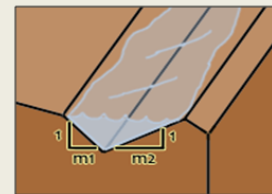
#### Leito da estrada:

Tipo: com abaulamento  
Tie (estrada): 1 mm/h  
Declividade transversal: 0,03 m/m  
Semilargura: 3 m  
Rugosidade  $0,012 \text{ s/m}^{1/3}$



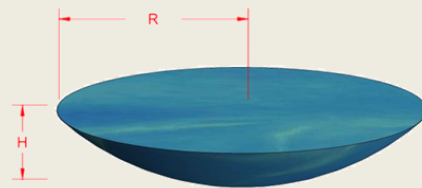
#### Canal da estrada:

Tipo: triangular      m1: 1 m/m      m2: 10 m/m  
Declividade: 0,07 m/m  
Comprimento: 300 m  
Aprofundamento máximo: 10 cm  
Rugosidade  $0,018 \text{ s/m}^{1/3}$   
Tensão crítica: 7,6 Pa  
Massa específica:  $1,25 \text{ g/cm}^3$   
Erodibilidade:  $0,0044 \text{ g/cm}^2 \text{ min Pa}$



### BACIA

Tipo: circular  
Tie (bacia): 10 mm/h  
Profundidade (H): 1,5 m



### PRECIPITAÇÃO

#### Série sintética:

Município: Viçosa - MG  
Nome da estação: Seriquite  
Código da estação: 2042015  
Latitude:  $20^{\circ}43'21''\text{S}$       Longitude:  $42^{\circ}55'25''\text{O}$   
Tamanho da série: 30 anos

#### Período de retorno:

Período de manutenção da estrada: 2 anos  
Dimensionamento da bacia: 10 anos

### RESULTADOS

#### Canal da estrada:

Espaçamento máximo entre desaguadouros: 170 m  
Aprofundamento máximo: 10 cm

#### Bacia de infiltração:

Capacidade da bacia:  $59,04 \text{ m}^3$   
Raio (R): 4,93 m

Figura 32 - Relatório gerado pelo software apresentando as variáveis de entrada consideradas e os resultados fornecidos pelo software.

## 4.2. Avaliação do modelo

A avaliação do modelo foi feita, em uma primeira etapa, comparando-se valores estimados com os observados em campo. Em uma segunda etapa, analisou-se a sensibilidade do modelo às principais variáveis de entrada.

### 4.2.1. Análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os observados em campo

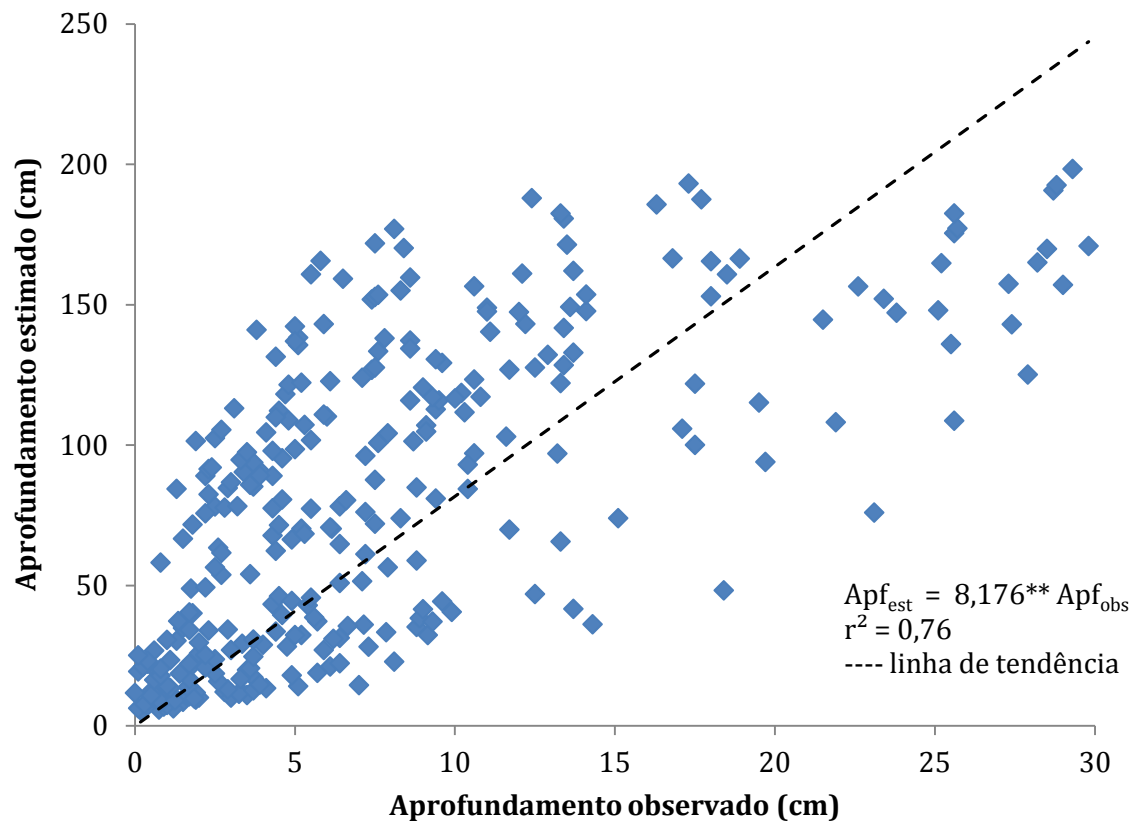
Na Figura 33 estão plotados os valores de aprofundamento estimados pelo modelo desenvolvido *versus* os observados em campo, obtidos ao longo do comprimento do canal da estrada e em diferentes datas ao longo do período de observação. Também são apresentados na Figura 33 a linha de tendência passando pela origem, a função linear e o coeficiente de determinação correspondentes. O valor do coeficiente de determinação de 0,76 indicou bom ajuste da função obtida, enquanto que o coeficiente angular de 8,176 indica que o modelo tende a superestimar os valores de aprofundamento do canal.

De acordo com Tedeschi (2006), o coeficiente de determinação consiste em um indicador da precisão do modelo, enquanto o coeficiente angular de uma função linear passando pela origem fornece indicação da exatidão do modelo. Assim, apesar do bom índice de precisão obtido, o modelo não apresentou boa estimativa dos dados de aprofundamento do canal, uma vez que os dados estimados por este apresentaram baixo nível de exatidão, visto que o coeficiente angular da função ajustada se encontra muito distante da condição ideal que é a unidade.

A aplicação do *test t* de *Student* a 1% de probabilidade, detectou diferenças significativas entre os dados estimados pelo modelo e os observados em campo. Pela metodologia proposta por Willmott et al. (1985) foi obtido índice de concordância (d) de 0,15, muito distante da condição ideal (igual à unidade), e que reflete baixa concordância entre os dados estimados pelo modelo e os dados observados em campo.

Um dos principais motivos que conduziu à superestimativa dos valores estimados pelo modelo diz respeito aos cálculos realizados para a obtenção da tensão cisalhante associada ao escoamento superficial. O modelo estima a tensão cisalhante com base na equação 11, proposta por Griebeler et al. (2005), e

considera que a tensão máxima ocorre no fundo do canal. Assim, a tensão cisalhante é estimada com base na profundidade máxima de escoamento ao invés do raio hidráulico, como é considerado originalmente, para condições de escoamento uniforme, na equação da resistência ao cisalhamento (equação 10)



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo *test t*, sendo as hipóteses:  $H_0: \beta_1=1$  vs.  $H_a: \beta_1 \neq 1$

Figura 33 - Dados de aprofundamento estimados pelo modelo *versus* os observados em campo obtidos ao longo do canal e em diferentes datas, sendo os valores estimados obtidos com o modelo, considerando-se o cálculo da tensão cisalhante realizado por meio da equação da resistência ao cisalhamento utilizando a profundidade de escoamento ( $y$ ) (equação 11).

A consideração da profundidade de escoamento ( $y$ ) em substituição ao raio hidráulico é tida por Chow (1986) como uma alternativa no caso de canais largos de seção trapezoidal ou retangular. Nessas circunstâncias, quanto maior a largura do canal, mais o valor do raio hidráulico tende a se aproximar do valor de  $y$ . O autor apresenta estudos a respeito da variação da tensão cisalhante ao longo da seção transversal do canal que indicam que o valor da tensão calculado em função

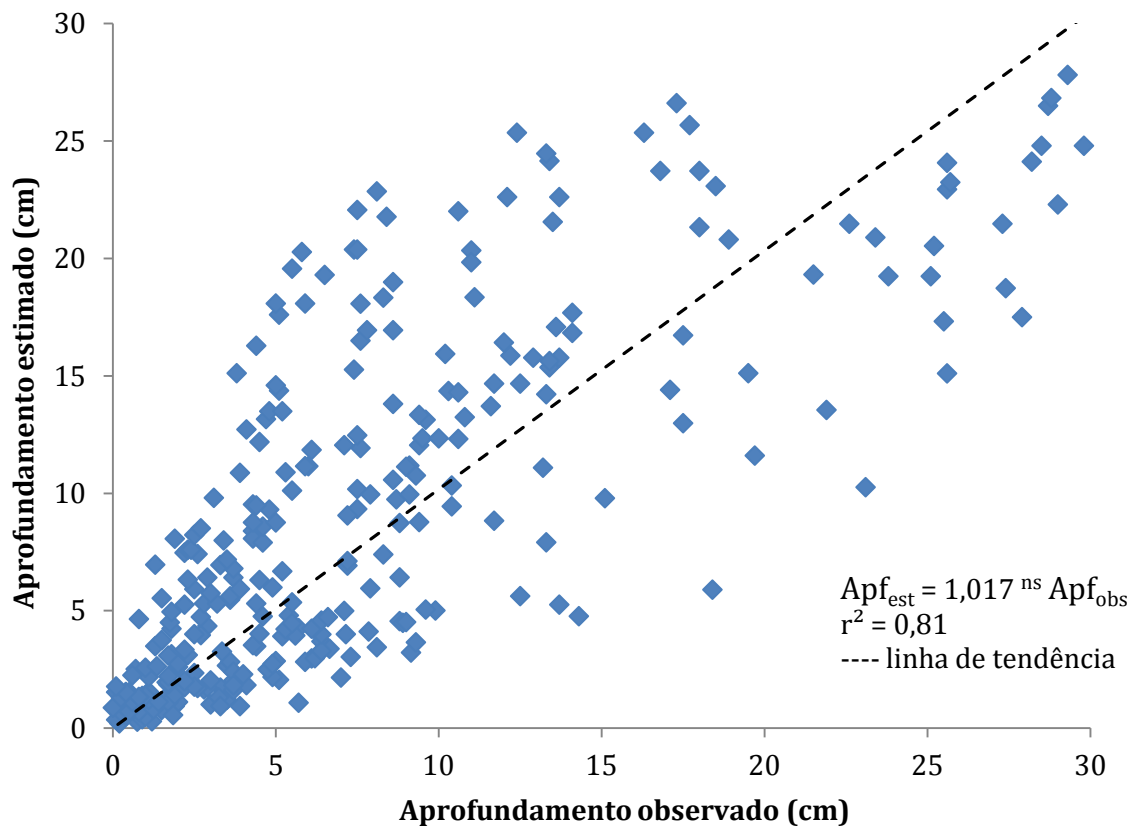
de  $y$  pode ser utilizado para a obtenção do valor da tensão cisalhante máxima somente quando a largura da base do canal é maior que quatro vezes o valor correspondente à profundidade de escoamento.

Em se tratando de canais mais estreitos (relação largura /  $y$  entre um e quatro), Chow (1986) apresenta resultados que indicam que os valores de tensão cisalhante máxima podem variar entre 47 e 74% do valor obtido considerando-se o cálculo da tensão em função de  $y$  (equação 11) para canais retangulares, e entre 78% e 97% para a base de canais trapezoidais com taludes de 1,5:1 e 2:1, respectivamente.

Quanto à variação da tensão cisalhante em seções transversais de canais triangulares, configuração correspondente ao canal de drenagem do trecho de estrada em que os dados observados foram coletados (Tabela 1), Lencastre e Franco (1992) apresentam resultados que indicam que a tensão cisalhante máxima pode variar entre 32,5 e 65% do valor obtido pela equação da resistência ao cisalhamento utilizando o valor de  $y$  (equação 11) ao invés do raio hidráulico para canais com taludes de 1:2 e 2:1, respectivamente.

Os dados apresentados por Chow (1986) e Lencastre e Franco (1992) corroboram com a ideia de haver tendência de superestimativa dos dados de tensão cisalhante obtidos quando da consideração de  $y$  na equação da resistência ao cisalhamento. Tendo em vista a indisponibilidade na literatura de fatores de correção do valor da tensão cisalhante máxima calculada a partir da equação 11 (considerando valores de  $y$ ) que sejam representativos para canais com taludes mais inclinados e com paredes com taludes diferentes, foi testada a equação original da resistência ao cisalhamento que considera o raio hidráulico para o cálculo da tensão cisalhante associada ao escoamento.

Na Figura 34 estão plotados os valores de aprofundamento estimados pelo modelo desenvolvido *versus* os observados em campo, obtidos ao longo do comprimento do canal da estrada e em diferentes datas durante o período de observação, sendo os valores estimados obtidos com o modelo considerando o cálculo da tensão cisalhante realizado a partir da equação original da resistência ao cisalhamento. Na Figura 34 também são apresentadas a linha de tendência e a função linear ajustada considerando o intercepto na origem, bem como o coeficiente de determinação correspondente.



<sup>ns</sup> Não significativo a 1% de probabilidade pelo *test t*, sendo as hipóteses:  $H_0: \beta_1=1$  vs.  $H_a: \beta_1 \neq 1$

Figura 34 - Dados de aprofundamento estimados pelo modelo *versus* os observados em campo obtidos ao longo do canal e em diferentes datas, sendo os valores estimados obtidos com o modelo, considerando-se o cálculo da tensão cisalhante realizado por meio da equação original da resistência ao cisalhamento (equação 10).

O valor do coeficiente de determinação de 0,81 e o do coeficiente angular da função de 1,017 indicaram bons níveis de precisão e exatidão obtidos e, conseqüentemente, que o modelo apresentou boa estimativa dos valores de aprofundamento do canal considerando os cálculos de tensão cisalhante realizados por meio da equação original da resistência ao cisalhamento.

A aplicação do *test t* a 1% de probabilidade constatou que não houve diferenças significativas entre os dados estimados pelo modelo e os observados em campo. O índice de concordância de 0,86 obtido a partir da metodologia proposta por Willmott et al. (1985) também indicou que o modelo apresentou uma boa estimativa dos valores de aprofundamento do canal.

Na Figura 35 é apresentada a evolução do aprofundamento observado ao longo do trecho monitorado e em diferentes datas durante o período de

observação. As linhas presentes na figura foram traçadas com finalidade meramente ilustrativa e para facilitar a análise desses resultados, sendo os dados medidos representados pelos marcadores presentes nessas linhas.

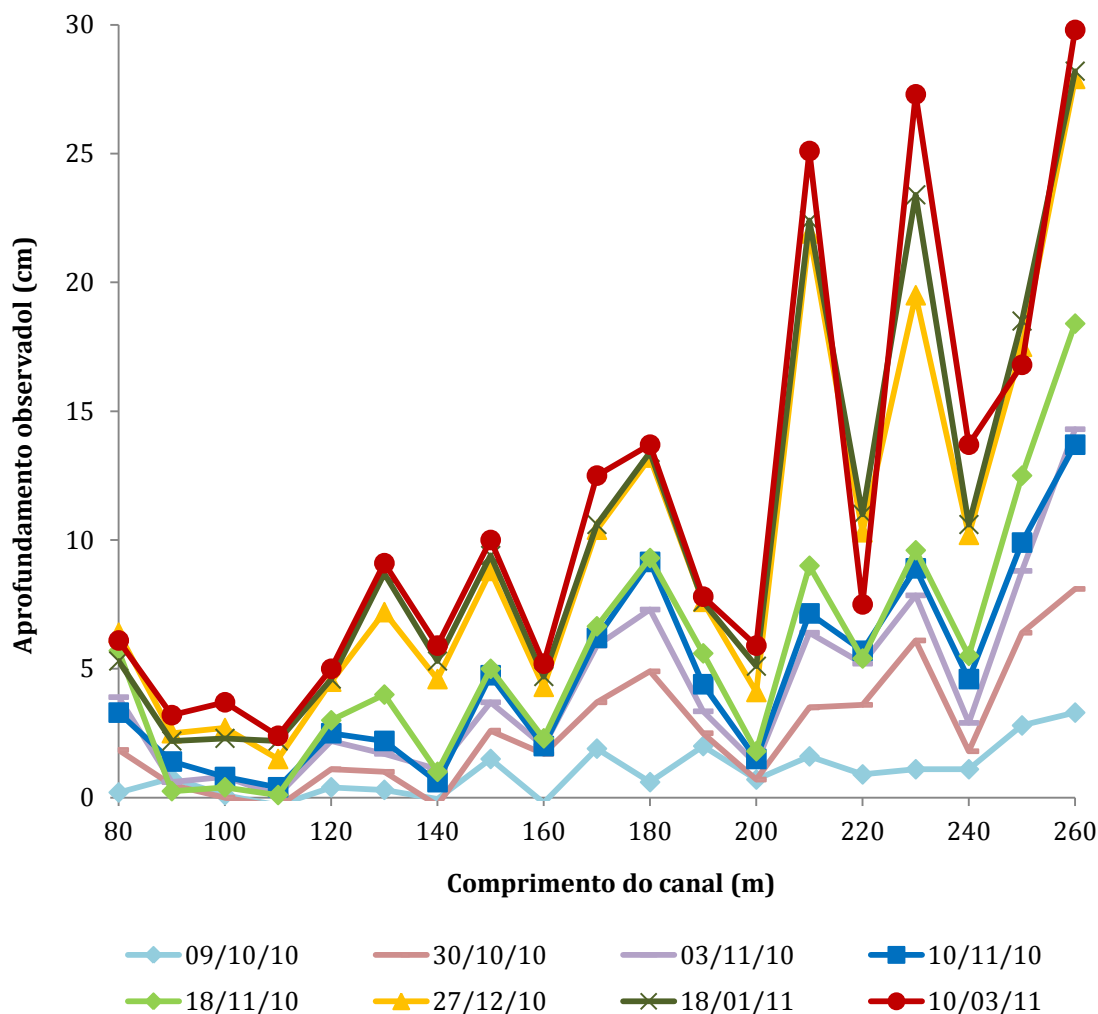


Figura 35 - Aprofundamento observado ao longo do trecho monitorado medido em diferentes datas ao longo do período de observação.

De acordo com a Figura 35 nota-se que, de maneira geral, os dados de aprofundamento medidos em diferentes datas ao longo do período de observação apresentaram tendência de aumentar com o comprimento do canal da estrada. Esse comportamento ocorreu devido ao fato de que quanto maior o comprimento do canal, maior é a concentração do escoamento superficial e, conseqüentemente, maior é a tensão cisalhante associada a este. Dessa forma, trechos submetidos a maiores tensões de cisalhamento tendem a sofrer maior desprendimento de partículas e, conseqüentemente, apresentar maior aprofundamento do canal.

Apesar de o valor do aprofundamento ter apresentado a tendência de aumentar com o comprimento do canal, este ocorreu de forma irregular, tendo algumas seções ao longo do canal apresentado maior evolução do aprofundamento no decorrer do período de observação que outros (Figura 35). Dentre os principais fatores que conduziram a esse comportamento está a grande variabilidade dos valores das variáveis relacionadas à resistência ao desprendimento de partículas (erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento) que os solos apresentam.

Na Figura 36 é apresentada uma ilustração do aprofundamento irregular ao longo do canal de drenagem em condições de campo. A conformação irregular conduz a outro processo não considerado na modelagem, que é o surgimento de locais onde ocorre a dissipação de energia, que tendem a provocar evolução mais rápida do aprofundamento nesses locais e, conseqüentemente, evolução mais lenta nas posições de jusante.



Figura 36 - Ilustração da irregularidade do aprofundamento ao longo do canal em condições reais de campo.

Visando à análise quantitativa da evolução temporal do aprofundamento durante o período de observação, primeiramente foram calculadas as médias do aprofundamento ao longo do canal gerado em cada data de medição dos dados.

Posteriormente, esses dados foram convertidos em valores normalizados e plotados na Figura 37 em função do total da tensão erosiva (estimada pelo modelo) normalizada acumulada até as mesmas datas em que os dados de aprofundamento foram medidos. A tensão erosiva acumulada corresponde à somatória das tensões geradas em cada evento de escoamento superficial no canal que superam a tensão crítica de cisalhamento do solo, conforme ilustrado na Figura 8.

Na Figura 37 também são apresentadas a linha de tendência e a respectiva equação ajustada, bem como o coeficiente de determinação correspondente. Para facilitar o entendimento dos dados representados na Figura 37 foi colocada, ao lado de cada ponto, a data em que os dados foram medidos. Os valores do coeficiente de determinação de 0,84 e do coeficiente angular da função ajustada de 1,074 indicam que o modelo representou adequadamente a evolução do aprofundamento no canal durante o período de observação.

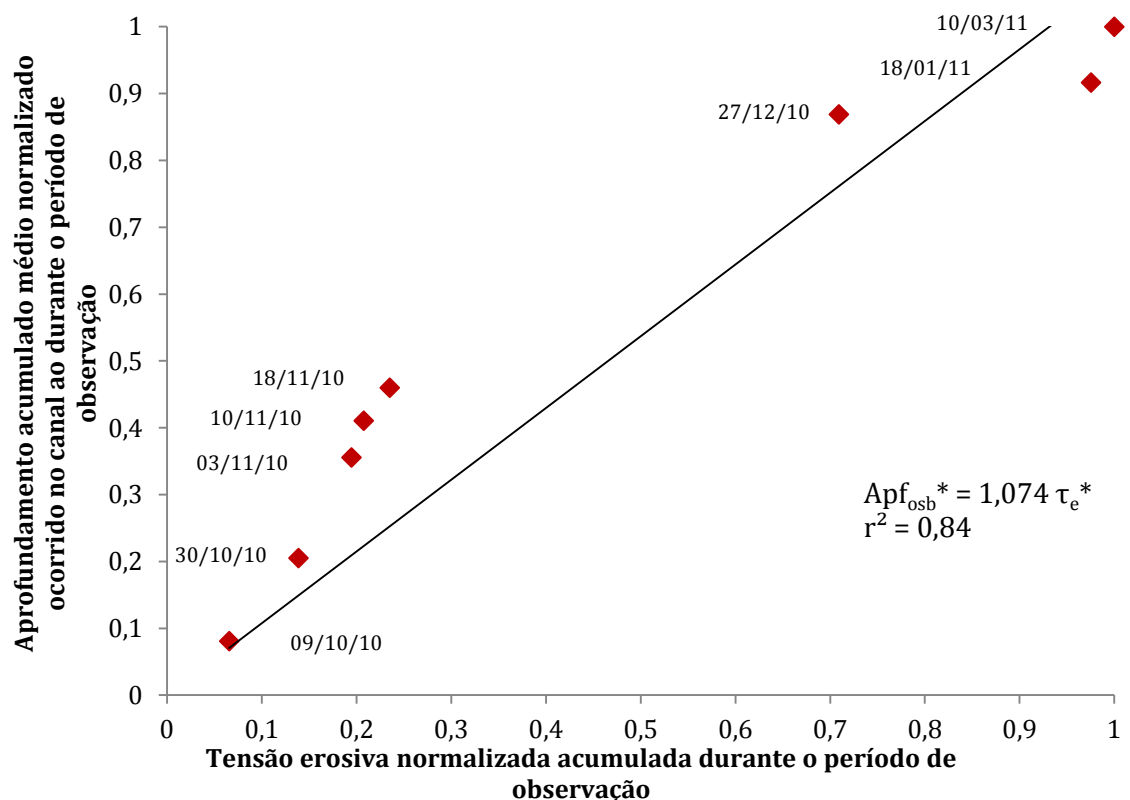
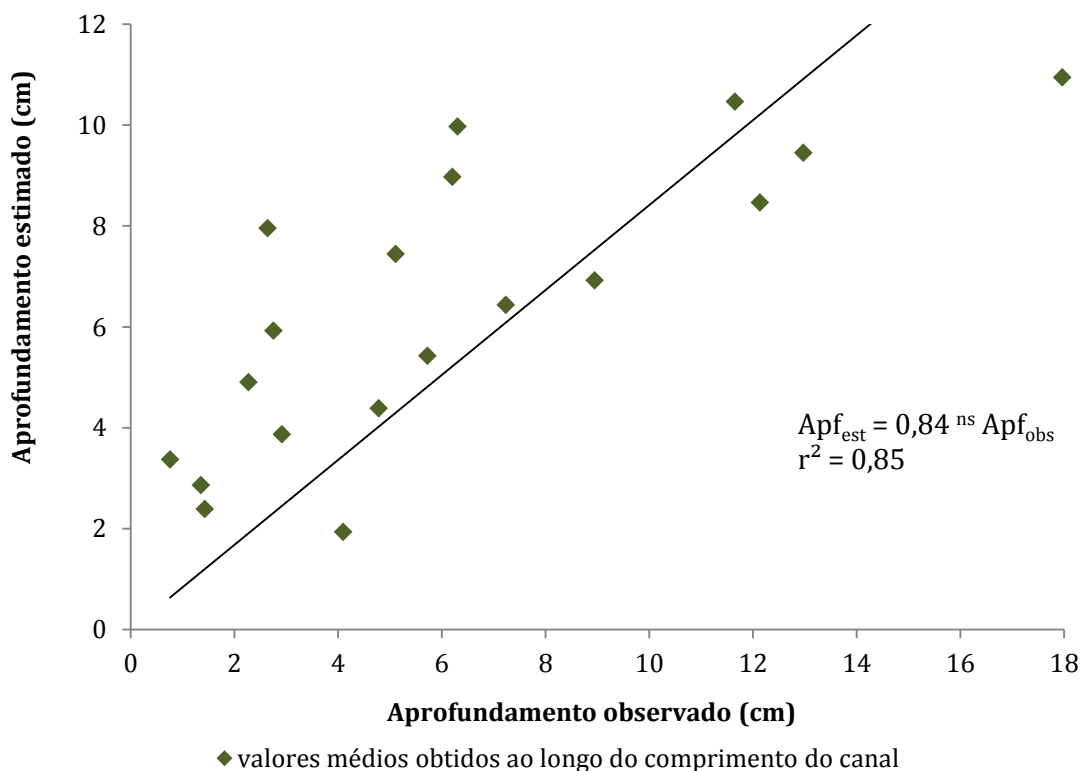


Figura 37 - Aprofundamento acumulado médio normalizado ocorrido no canal ao longo do período de observação em função da tensão erosiva normalizada acumulada durante o período de observação.



Na análise quantitativa da evolução espacial do aprofundamento foram calculadas, para cada metro do canal da estrada, as médias dos valores de aprofundamento acumulado, estimado e observado, obtidos durante o período de observação. Posteriormente, os valores médios de aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal foram plotados em um gráfico em função dos valores médios de aprofundamento observado (Figura 38).



<sup>ns</sup> Não significativo a 1% de probabilidade pelo *test t*, sendo as hipóteses:  $H_0: \beta_1=1$  vs.  $H_a: \beta_1 \neq 1$

Figura 38 - Valores médios do aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal em função dos valores observados.

Na Figura 38 também são apresentadas a linha de tendência e a função linear ajustada passando pela origem, bem como o coeficiente de determinação correspondente. O valor do coeficiente de determinação indicou bom ajuste da função obtida, enquanto o valor do coeficiente angular da função ajustada de 0,84, por se encontrar próximo à unidade, indica que o comportamento dos dados de aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal segue a uma tendência semelhante à dos dados observados em campo.

A aplicação do *test t* de *Student* permitiu evidenciar que não houve diferenças estatísticas significativas a 1% de probabilidade entre os dados médios

de aprofundamento estimado pelo modelo com os observados em campo. O índice de concordância (d) de 0,80, obtido a partir da metodologia proposta por Willmott et al. (1985), também indicou que o modelo estimou adequadamente os valores de aprofundamento ao longo do canal da estrada.

Conforme apresentado anteriormente nas Figuras 34 e 35, apesar de o modelo ter representado adequadamente a tendência da evolução do aprofundamento ao longo do canal (Figura 38), foi evidenciado que tal evolução ocorreu de forma irregular. Assim, visando à análise das diferenças de tendência de aprofundamento existentes ao longo do canal e do fato de estas diferenças poderem ser explicadas pelas variações da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo ao longo do canal foi procedida à análise apresentada na sequência.

Na Figura 39 estão plotados os dados médios de aprofundamento estimados pelo modelo em função do comprimento do canal da estrada. São apresentadas ainda nesta figura a equação linear ajustada, sua linha de tendência e o coeficiente de determinação correspondente.

Apesar da aparente linearidade dos dados estimados pelo modelo para o intervalo de comprimento de canal estudado, estes não ocorrem de forma linear ao longo do canal. Esse comportamento é discutido com maior detalhamento no item 4.2.2.

Os pontos em verde e em azul presentes na Figura 39 correspondem aos valores observados em campo. Os pontos plotados na cor verde dizem respeito à condição em que os valores observados foram superiores aos estimados pelo modelo, enquanto os pontos em azul correspondem à condição em que os valores observados foram inferiores aos estimados. A cada um dos conjuntos de pontos (verdes e azuis) foi ajustada uma função linear e a sua linha de tendência, conforme apresentado na Figura 39.

A linha de tendência ajustada para os pontos em que o aprofundamento observado foi superior ao estimado corresponde à mesma tendência apresentada por um conjunto de dados estimados pelo modelo (pontos em verde) considerando-se uma tensão crítica de cisalhamento de 8,15 Pa e erodibilidade de  $0,007 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ . A linha de tendência ajustada para os pontos em que o aprofundamento observado foi inferior ao estimado corresponde à mesma tendência apresentada por um conjunto de dados estimados pelo modelo (pontos

em azul) considerando uma tensão crítica de cisalhamento de 8,8 Pa e de 0,0039 g cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> Pa<sup>-1</sup>.

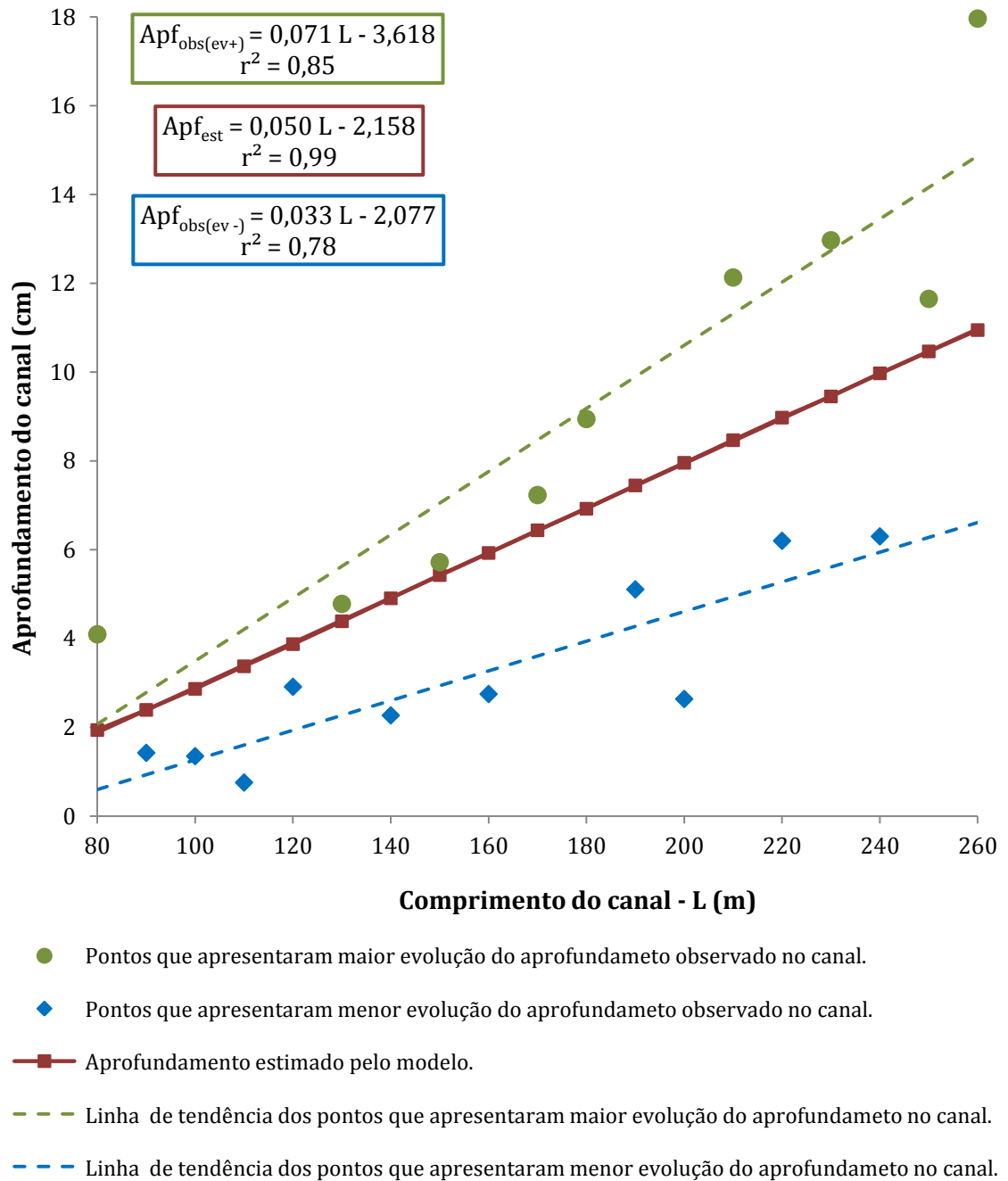


Figura 39 - Aprofundamento médio estimado ( $Apf_{est}$ ) e observado nos pontos que apresentaram maior ( $Apf_{obs(ev+)}$ ) e menor ( $Apf_{obs(ev-)}$ ) evolução do aprofundamento do canal em função do comprimento do canal da estrada.

Levando-se em conta os bons índices de ajuste das linhas de tendência (Figura 39) obtidos para os pontos em que o aprofundamento observado foi maior

( $r^2 = 0,85$ ) e menor ( $r^2 = 0,78$ ) que o estimado pelo modelo e seus respectivos dados de tensão crítica e erodibilidade, que representam comportamento semelhante a essas funções, é possível constatar que a irregularidade dos dados observados ao longo do canal pode ser explicada pela variação das características de resistência à ação erosiva do escoamento superficial no canal.

#### **4.2.2. Análise de sensibilidade do modelo**

Tendo em vista os resultados obtidos a partir da análise comparativa dos dados estimados pelo modelo com os medidos em campo, foram utilizados, na análise de sensibilidade, os dados gerados pelo modelo considerando-se a equação original da resistência ao cisalhamento (equação 10).

##### **4.2.2.1. Análise do modelo com base na erodibilidade do solo**

Na Figura 40 é apresentado o aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal da estrada para diferentes valores de erodibilidade do solo ( $K$ ). Também está representado nesta figura (por linhas verticais tracejadas) o espaçamento máximo entre desaguadouros obtido para cada valor de  $K$  considerando-se um aprofundamento máximo tolerável de 10 cm.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 40 nota-se que, para determinado valor de aprofundamento do canal, o aumento dos valores de erodibilidade reduz o espaçamento máximo entre desaguadouros. Maiores erodibilidades aumentam as perdas de solo e, conseqüentemente, do aprofundamento do canal, uma vez que esta variável consiste em um fator multiplicador da equação 12. Assim, o aumento da erodibilidade faz com que o aprofundamento máximo tolerável seja atingido em menores comprimentos do canal, provocando, assim, redução do espaçamento máximo entre desaguadouros.

Outro comportamento que pode ser observado na Figura 40, de modo geral para todos os valores de erodibilidade considerados, diz respeito à variação da taxa de aprofundamento do canal em função do aumento do comprimento deste. Na Figura 41 está ilustrada a variação do aprofundamento no canal, considerando-se a erodibilidade de  $0,001 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ . Nesta figura estão representados os limites (aproximados) dos intervalos ao longo do comprimento do canal em que a taxa do aprofundamento apresentou comportamentos distintos.

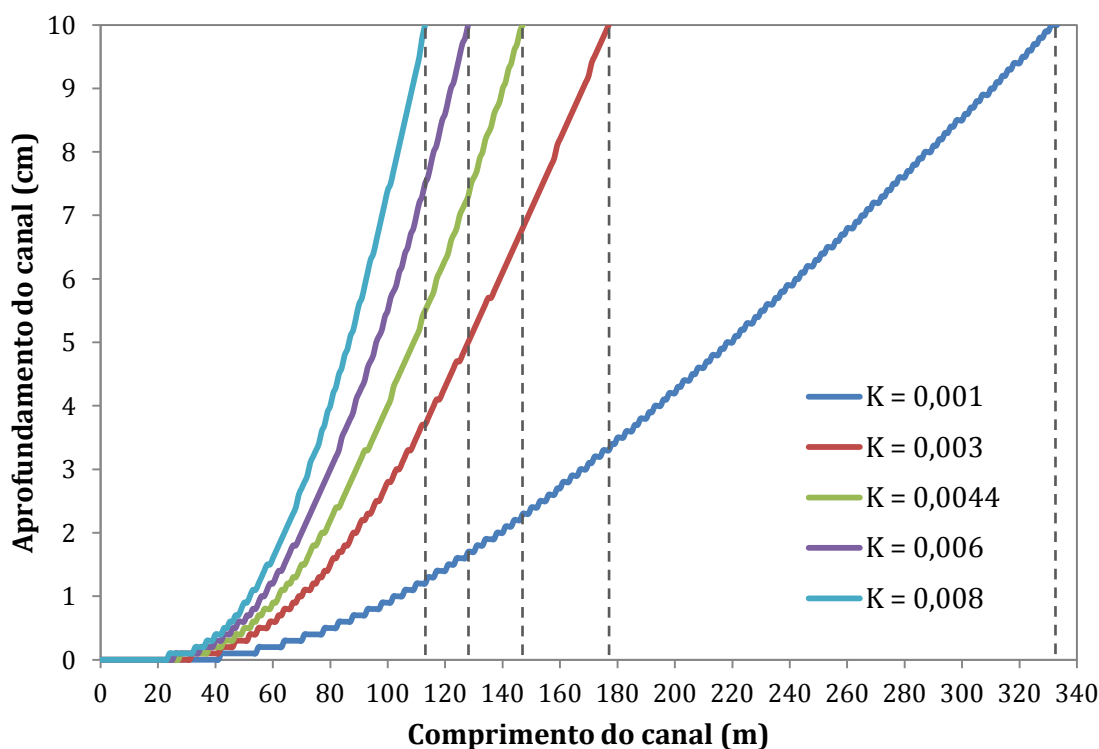


Figura 40 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de erodibilidade do solo ( $K$ ),  $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ .

Na Figura 41, é possível observar que a taxa de aprofundamento foi aproximadamente nula nos primeiros metros do canal (campo I), crescente nos metros seguintes (campo II) até o momento em que esta se torna aproximadamente constante (campo III). O comportamento apresentado no campo III, ou seja, a tendência de estabilização da taxa de aprofundamento, tende a ocorrer em comprimentos cada vez menores, à medida que são considerados valores de erodibilidade que provocam maiores taxas de aprofundamento do canal, conforme apresentado na Figura 40.

O comportamento relacionado à variação da taxa de aprofundamento do canal apresentado nas Figuras 40 e 41 também ocorre para as demais variáveis consideradas no modelo e está associado à característica do modelo de considerar todos os eventos de determinada série histórica de precipitação. Esse comportamento pode ser mais bem compreendido a partir do esquema apresentado na Figura 42.

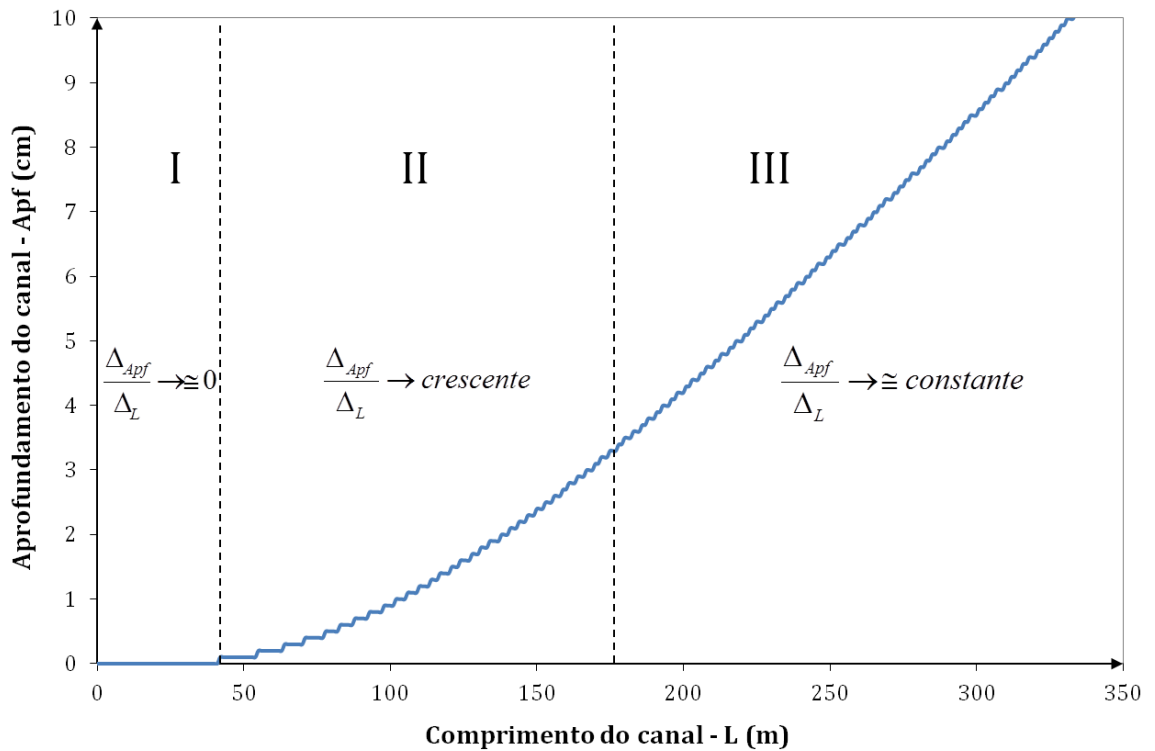


Figura 41 – Aprofundamento ao longo do canal da estrada, considerando os resultados obtidos para a erodibilidade de  $0,001 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ , sendo os campos I, II e III referentes aos trechos em que a taxa de aprofundamento foi aproximadamente igual a zero, crescente e aproximadamente constante, respectivamente.

Na Figura 42, as linhas em azul representam o aprofundamento acumulado ao longo do canal da estrada estimado pelo modelo considerando diferentes eventos de escoamento superficial. Os pontos presentes nessa figura foram colocados a fim de facilitar a percepção da seção do canal em que o aprofundamento se inicia, para cada evento considerado. Nessa figura, as linhas que representam o aprofundamento gerado por cada evento considerado foram organizadas de forma ilustrativa, cujo objetivo foi facilitar o entendimento do comportamento nela representado (variação da taxa de aprofundamento), portanto, não significando que estes eventos tenham ocorrido na ordem em que eles são apresentados.

De acordo com a Figura 42 nota-se que poucos são os eventos de escoamento no canal capazes de provocar o desprendimento de partículas já nos primeiros metros do canal (Campo I da Figura 42), sendo estes correspondentes a eventos extremos de maiores magnitudes presentes na série.

O campo II da Figura 42 corresponde à região do gráfico cujo intervalo de comprimento do canal evidencia-se maior número de eventos de escoamento que passam a apresentar tensão cisalhante superior à tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ), gerando assim um formato curvilíneo (taxa de variação crescente do aprofundamento, campo II da Figura 41) do comportamento do aprofundamento ao longo do canal.

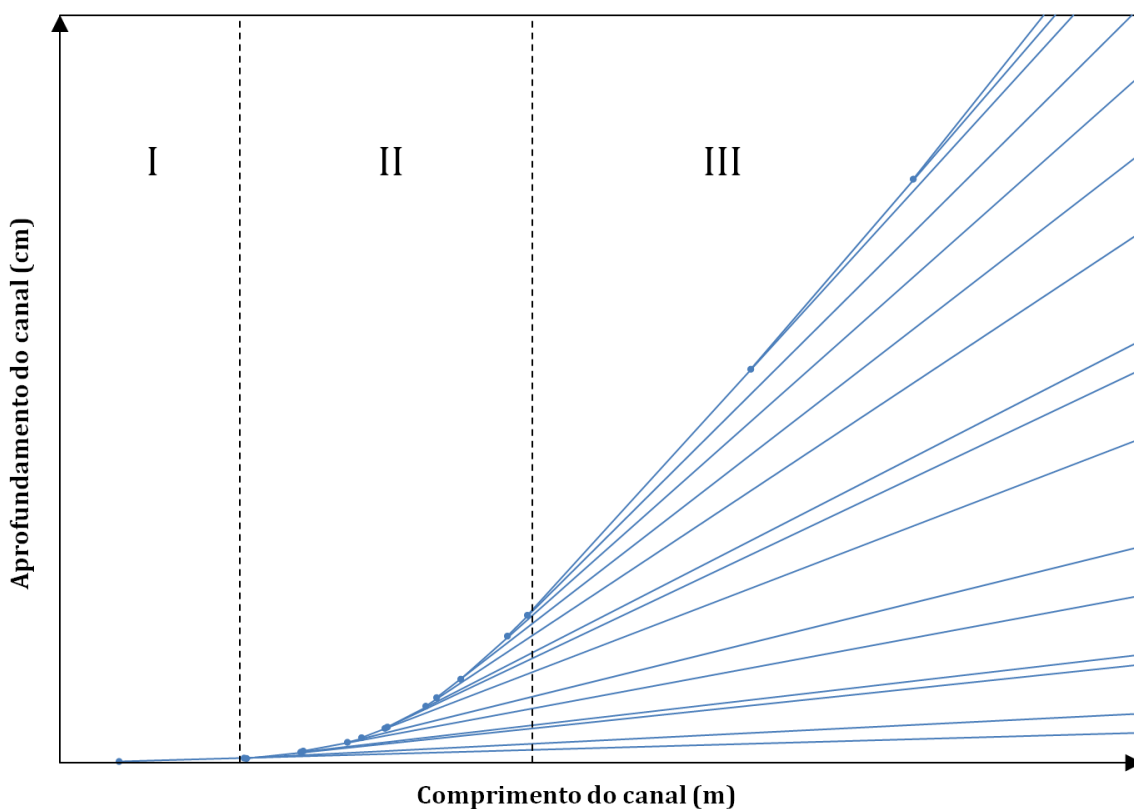


Figura 42 - Esquema ilustrativo do aprofundamento no canal da estrada, sendo que as linhas em azul representam o aprofundamento acumulado estimado pelo modelo considerando-se os diversos eventos de escoamento no canal. Os pontos presentes na figura mostram, para cada evento considerado, o comprimento do canal a partir do qual o escoamento é capaz de desprender partículas de solo.

Na Figura 42, o campo III ilustra o comportamento apresentado na Figura 41 (campo III) relacionado à tendência de estabilização da taxa de aprofundamento do canal. Tal comportamento está relacionado ao fato do incremento no número de eventos que contribuem para a elevação do valor do aprofundamento ser cada vez menor com o aumento do comprimento do canal,

sendo esses eventos correspondentes a eventos extremos de menores magnitudes presentes na série.

A variação da taxa de aprofundamento ao longo do canal da estrada também foi evidenciada por Griebeler (2002) a partir da aplicação do modelo por ele desenvolvido. Entretanto, os resultados obtidos pelos autores apresentaram comportamento diferente do observado pelo modelo proposto neste trabalho. No modelo desenvolvido por Griebeler (2002), a variação do aprofundamento ao longo do canal é representada por uma curva de formato convexo, enquanto no modelo proposto o comportamento é representado por curvas de formato côncavo (Figuras 40, 41 e 42).

Griebeler (2002) afirma que o comportamento dos resultados obtidos pelo modelo por ele desenvolvido (formato de uma curva convexa) é explicado pela variação na profundidade do escoamento ao longo do canal. Com o aumento da vazão, a profundidade do escoamento também aumenta, entretanto, a taxa de aumento da profundidade é decrescente com o aumento da vazão, uma vez que a largura da superfície molhada aumenta. Assim, em se tratando de canais triangulares, para os menores comprimentos, os incrementos de vazão provocam maiores incrementos na profundidade de escoamento e, conseqüentemente, na tensão cisalhante associada a este.

O modelo proposto, apesar de não considerar somente a profundidade de escoamento no cálculo da tensão cisalhante, mas sim o raio hidráulico, também apresenta o comportamento evidenciado no modelo desenvolvido por Griebeler (2002), uma vez que o incremento no valor do raio hidráulico, assim como para o aprofundamento do canal, é cada vez menor com o aumento do comprimento do canal. Contudo, o fato de o modelo considerar todos os eventos de determinada série de precipitação que, conforme discutido anteriormente, tende a gerar comportamento em formato de uma curva côncava, sobrepondo ao comportamento (formato de uma curva convexa) apresentado pelo modelo por Griebeler (2002). O formato convexo da curva que representa os resultados obtidos por Griebeler (2002) é evidenciado justamente pelo fato de o modelo por ele desenvolvido considerar um único evento crítico de precipitação como sendo o causador de todo o aprofundamento no canal.

Na Tabela 4 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à erodibilidade do solo, considerando um aprofundamento máximo tolerável de 10



cm para a obtenção do espaçamento máximo entre desaguadouros. Os valores negativos dos índices obtidos indicam a variação inversamente proporcional dos valores de erodibilidade com os resultados obtidos pelo modelo.

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 4) observa-se que o modelo apresentou redução (em módulo) dos índices de sensibilidade com o aumento dos valores de erodibilidade do solo. Observa-se ainda que a redução dos índices de sensibilidade (em módulo) é cada vez menor, tendendo à estabilização.

Tabela 4 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável erodibilidade do solo, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros (E<sub>max</sub>) obtidos para 10 cm de profundidade do canal

Valor de entrada		Resposta do modelo		Índice de sensibilidade
I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	E <sub>max 1</sub>	E <sub>max 2</sub>	
0,001	0,003	333	177	<b>-0,61</b>
0,003	0,0044	177	147	<b>-0,49</b>
0,0044	0,006	147	128	<b>-0,45</b>
0,006	0,008	128	113	<b>-0,44</b>

#### 4.2.2.2. Análise do modelo com base na tensão crítica de cisalhamento

Na Figura 43 é apresentada a variação dos valores de aprofundamento estimados pelo modelo em função do comprimento do canal para diferentes valores de tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ). Nesta figura também é indicado o espaçamento máximo entre desaguadouros obtido para cada valor de  $\tau_c$  admitindo um aprofundamento máximo tolerável de 10 cm.

Como se pode observar na Figura 43, a redução da tensão crítica de cisalhamento do solo implica na redução do espaçamento máximo entre desaguadouros. Esse comportamento pode ser explicado se levado em conta que o modelo considera nos cálculos de perda de solo (equação 12) a energia associada ao escoamento que efetivamente é capaz de causar o desprendimento de partículas do solo, ou seja, aquela em que a tensão cisalhante supera o valor da  $\tau_c$ .

A energia que efetivamente causa o desprendimento de partículas de solo está associada à área do gráfico (Figura 8) sobre a linha que representa a  $\tau_c$ . Assim,

quanto menor o valor da  $\tau_c$ , maior é a área do gráfico acima da  $\tau_c$  e, conseqüentemente, maior é o aprofundamento do canal.

Além da característica relacionada à redução da área do gráfico com o aumento da  $\tau_c$ , o fato do modelo considerar todos os eventos de determinada série histórica de precipitação também faz com que os eventos de menores magnitudes, que antes só adquiriam tensão cisalhante suficiente para provocar o desprendimento de partículas de solo nas seções mais distantes do canal, passem a contribuir com o aumento dos valores de aprofundamento do canal já nas seções localizadas em comprimentos menores do canal. Dessa forma, a redução do valor da  $\tau_c$  tende a reduzir o espaçamento máximo entre desaguadouros.

Os dados de aprofundamento obtidos para os diferentes valores de  $\tau_c$  podem exemplificar o comportamento descrito no parágrafo anterior. Para a  $\tau_c$  de 2 Pa, os eventos mais críticos são capazes de gerar escoamento com tensão cisalhante superior à  $\tau_c$  já no segundo metro do canal, enquanto para os valores de  $\tau_c$  de 4, 6, 7,6 e 10 Pa, a  $\tau_c$  só é superada, considerando os mesmos eventos de escoamento, a partir dos comprimentos 6, 16, 27 e 56 m, respectivamente. No modelo desenvolvido por Griebeler (2002), a alteração do valor de  $\tau_c$ , considerando-se os demais dados de entrada do modelo constantes, não muda o comprimento em que se inicia o desprendimento de partículas do solo pelo escoamento, uma vez que é considerado um único evento crítico de escoamento no canal.

Na Tabela 5 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à variável tensão crítica de cisalhamento, considerando-se os dados de espaçamento máximo estimados pelo modelo para um aprofundamento máximo tolerável de 10 cm. De acordo com os resultados nota-se que os índices obtidos para a variável  $\tau_c$  foram maiores que os obtidos para K, e que estes apresentaram aumento para os maiores valores de  $\tau_c$ .

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5, observa-se ainda que os índices obtidos para a variável  $\tau_c$  se mostraram com comportamento oposto aos apresentados para a variável K, ou seja, para a  $\tau_c$  os menores índices foram obtidos para os menores valores dessa variável enquanto para a variável K estes foram correspondentes aos maiores valores. Esses comportamentos indicam que o modelo apresenta menor sensibilidade às variáveis  $\tau_c$  e K quando estas

representam uma condição de solo com maior susceptibilidade ao desprendimento, ou seja, com maior K e menor  $\tau_c$ .

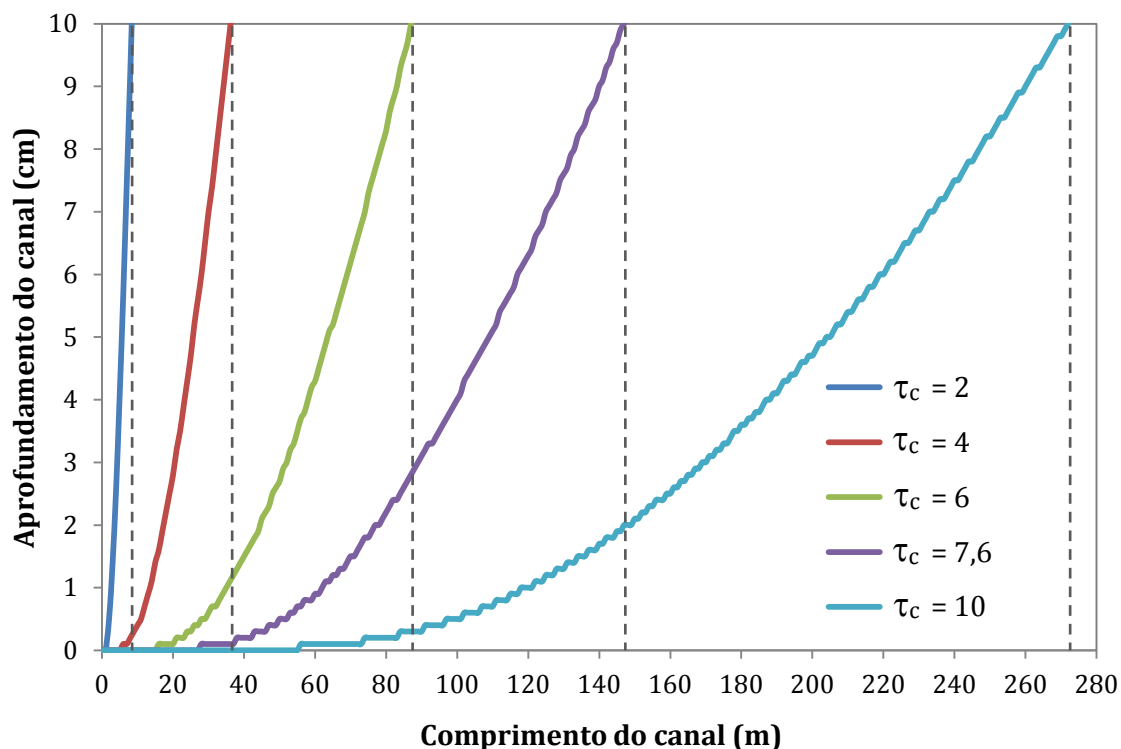


Figura 43 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ), Pa.

Tabela 5 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável tensão crítica de cisalhamento, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros ( $E_{max}$ ) obtidos para 10 cm de profundidade do canal

Valor de entrada		Resposta do modelo		Índice de sensibilidade
$I_1$	$I_2$	$E_{max 1}$	$E_{max 2}$	
2	4	8	36	<b>1,91</b>
4	6	36	87	<b>2,07</b>
6	7,6	87	147	<b>2,18</b>
7,6	10	147	272	<b>2,19</b>

#### 4.2.2.3. Análise do modelo com base na declividade do canal

Na Figura 44 é apresentada a variação do aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do canal da estrada para diferentes valores de declividade. Também se encontra representado nessa figura o espaçamento máximo obtido, considerando-se como critério um aprofundamento máximo de 10 cm.

De acordo com a Figura 44, nota-se maior taxa de aprofundamento do canal para os maiores valores de declividade. Esse comportamento indica que os maiores valores de declividade provocam maior elevação do aprofundamento ao longo do canal, fato esse que reflete diretamente na redução do espaçamento máximo entre desaguadouros.

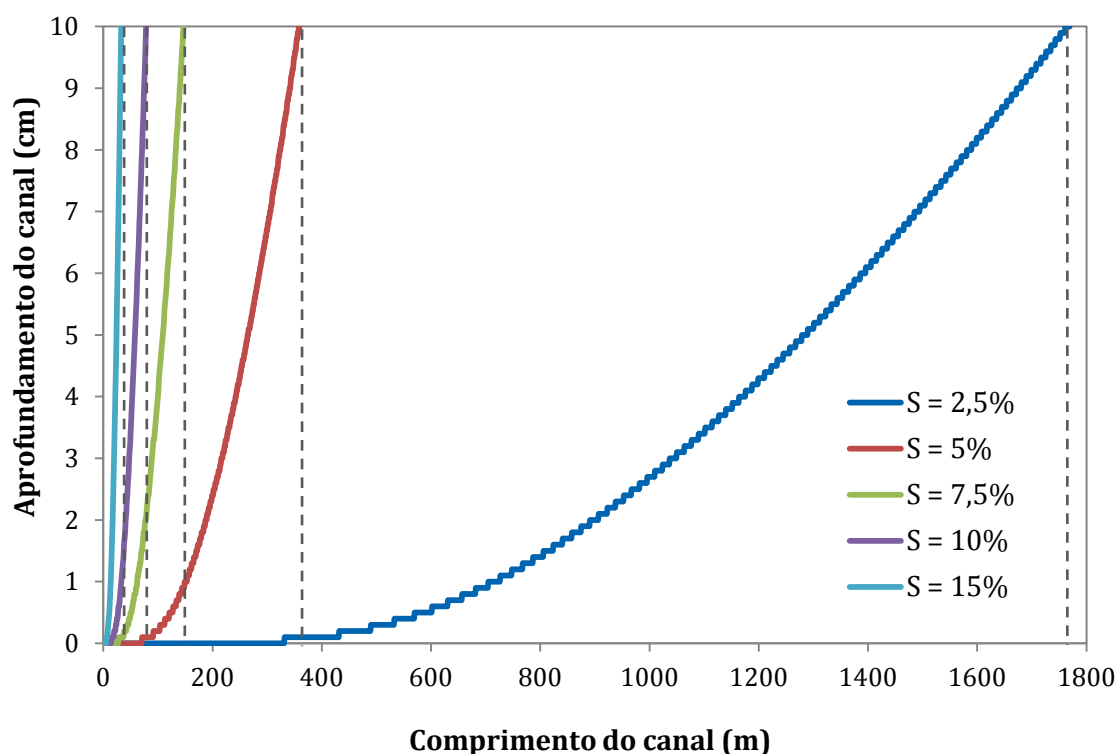


Figura 44 - O aprofundamento estimado pelo modelo ao longo do comprimento do canal para diferentes valores de declividade do canal da estrada (S).

A elevação do aprofundamento do canal gerada pelo aumento da declividade está relacionada ao conseqüente aumento do valor da tensão cisalhante associada ao escoamento no canal e, conseqüentemente, das perdas de solo no canal (equação 12). Com o aumento da tensão cisalhante, para um mesmo valor de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento, há aumento da área do gráfico acima da linha representada pela  $\tau_c$  na Figura 8, o que gera maior

quantidade de solo desprendida e, conseqüentemente, maior aprofundamento do canal.

A alteração dos valores de declividade influencia diretamente nos valores de tensão, por ser fator multiplicador da equação 10 e, ainda, de forma indireta, uma vez que esta exerce influência no valor do raio hidráulico, que também é uma das variáveis consideradas no cálculo da tensão cisalhante (equação 10).

Na Tabela 6 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à declividade do canal, considerando-se um aprofundamento de 10 cm para a obtenção do espaçamento máximo entre desaguadouros. Os resultados mostrados na Tabela 6 indicam que o modelo apresenta grande sensibilidade à variação da declividade do canal. O sinal negativo indica que a variação da declividade é inversamente proporcional à variação do espaçamento, uma vez que, com o aumento da declividade, o espaçamento é reduzido.

Tabela 6 - Índices de sensibilidade obtidos para diferentes valores de entrada no modelo (I) da variável declividade do canal da estrada, considerando-se os espaçamentos máximos entre desaguadouros obtidos para 10 cm de profundidade do canal

Valor de entrada		Resposta do modelo		Índice de sensibilidade
$I_1$	$I_2$	$E_{max_1}$	$E_{max_2}$	
2,5	5	1769	359	<b>-1,99</b>
5	7,5	359	147	<b>-2,09</b>
7,5	10	147	78	<b>-2,15</b>
10	15	78	32	<b>-2,09</b>

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O modelo permite o cálculo do espaçamento máximo entre desaguadouros a partir da análise das perdas de solo no canal geradas considerando todos os eventos da série histórica de dados de precipitação do local de interesse.
- o modelo apresentou boa estimativa do aprofundamento do canal, tanto em escala temporal (durante o período em que os dados de campo foram obtidos) quanto em escala espacial (ao longo do canal), quando considerada nos cálculos da tensão cisalhante associada ao escoamento a equação original da resistência ao cisalhamento.
- O modelo apresentou maior sensibilidade à variação das variáveis tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal e menor sensibilidade à variação da variável erodibilidade do solo.
- o software desenvolvido para aplicação do modelo proposto (SiDE) permite, de forma rápida e fácil, a determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros e o dimensionamento de bacias de infiltração.

## 6. RECOMENDAÇÕES

- Consideração de estradas que possuem áreas de contribuição externas à estrada.
- Determinação de fatores de correção da tensão em função das características geométricas do canal como os apresentados por Chow (1986) e Lencastre e Franco (1992), para canais com taludes de menores inclinações ou com paredes com taludes diferentes;
- Elaboração de uma versão em inglês do software.
- Programar no software a opção de se trabalhar com séries sintéticas obtidas a partir de outros geradores climáticos, com objetivo de viabilizar a sua utilização em regiões fora do Brasil.
- Ampliar o número de trechos monitorados para a avaliação do modelo em diferentes condições de escoamento no canal, solo e características de precipitação.

## 7. REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: Fernando Falco Pruski. (Org.). **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. cap. 4 , p. 74-107.
- ANDERSON, D, M.; MACDONALD, L.H. Modelling road surface sediment production using a vector geographic information system. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 23, p. 95 – 107, 1998.
- ANTONANGELO, A.; FENNER, P. T. Identificação dos riscos de erosão em estradas de uso florestal através do critério do fator topográfico LS. **Energia na Agricultura**. v. 20 n. 3, p. 1 – 20, 2005.
- ARNÁEZ, J.; LARREA, V.; ORTIGOSE, L. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from simulation tests in northeastern Spain. **Catena**. v. 57, p 1 – 14, 2004.
- BAENA, L. G. N. ; PRUSKI, F. F.; MOREIRA, M. C.; SOUZA, V. B. C. ; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, V. P. S. Programa Computacional para Geração de Séries de Dados Climáticos. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 13, p. 210-220, 2005.
- BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis, DER, 2003. 236 p.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1999. 336 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDE NETO, F.; BELINAZZE JÚNIOR, R. **Controle de erosão em estradas rurais**. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1993. 37p.
- BIRT, A. G.; VALDEZ-VIVAS, M. R.; FELDMAN, R. M.; LAFON, C. W.; CAIRNS, D.; COULSON, R. N.; TCHAKERIAN, M.; GULDIN, J. M. A simple stochastic weather



- generator for ecological modeling. **Environmental Modelling & Software**. v. 25, n. 10, p. 1252-1255, 2010.
- BRAZ, R.L. **Hydrology: an introduction to hydrologic science**. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. 643 p.
- BRISSETTE, F. P.; KHALILI, M.; LECONTE, R. Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 345, p. 121 – 133, 2007.
- CARVALHO, W. L.; CRUZ, R. O. M.; CAMARA, M. T.; ARAGÃO, J. J. G. Rural school transportation in emerging countries: The Brazilian case. **Research in Transportation Economics**. v. 30, p. 1 – 9, 2010.
- CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; LECONTE, R. A daily stochastic weather generator for preserving low-frequency of climate variability. **Journal of Hydrology**, v. 388, p. 480-490, 2010.
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. USA: McGraw-Hill. 1986. 680p.
- CHUA, L.H.C., WONG, T.S.W., SRIRAMULA, L.K. Comparison between kinematic wave and artificial neural network models in event-based runoff simulation for an overland plane. **Journal of Hydrology**, v. 357, p. 337-348, 2008.
- CHUA, L.H.C., WONG, T.S.W. Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach. **Journal of Hydrology**, v. 390, p. 92-107, 2010.
- CHUA, L.H.C., WONG, T.S.W. Runoff forecasting for an asphalt plane by Artificial Neural Networks and comparisons with kinematic wave and autoregressive moving average models. **Journal of Hydrology**, v. 397, p.191-201. 2011.
- CONSTANTINI, A.; LOCH, R. J.; CONNOLLY, R. D.; GARTHE, R. Sediment generation from forest roads: bed and eroded sediment size distributions, and runoff management strategies. **Australian Journal of soil Research**. v. 37, p. 947 – 964, 1999.
- CORRÊA, C.M.C. **Perdas de solo e a qualidade da água precedente de uso florestal no planalto catarinense**. 2005. 155p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- CORRÊA, C. M. C.; ROLOFF, G; SILVA, I. C. Erosão real e estimada através da rusle em estradas florestais, em duas condições de solo e relevo e quatro perfis de solo. **Scientia Forestalis**, v. 76, p. 57-66, 2007.

- CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, R. A. Erosão real e estimada através da rusle em estradas de uso florestal, em condições de relevo plano a suave ondulado. **Floresta**, v. 39, p. 381-391, 2009.
- CROKE, J.; MOCKLER, S.; HAIRSINE, P.; FOGARTY, P. Relative contributions of runoff and sediment from sources within a road prism and implications for total sediment delivery. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 31, n. 4, p. 457–468, 2006.
- CROSSLEY, P. An expert system for the prediction of total vehicle and road operating costs in developing countries. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 21, p. 169 – 180, 1998.
- CROSSLEY, C. P.; KIBIWOT, V. N.; REYNOLDS, A. J.; RICKSON, R. J. Rut formation and rolling resistance on earth roads. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 78, n. 1, p. 99 – 107, 2001.
- DATRY, T.; MALARD, F.; VITRY, L.; HERVANT, F.; GIBERT, J. Solute dynamics in the bed sediments of a stormwater infiltration basin. **Jornal of Hydrology**. v. 273, p. 217-233, 2003.
- DECHESNE, M.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins. **Journal of Environmental Manegement**. v. 71, p.371-380, 2004.
- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1990. 113p. Tese de Doutorado.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **PNV/SNV 2011**. Disponível em: <[www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br)>. Acesso em: 23 maio 2011a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Planejamento Rodoviário: Modelo de Avaliação Econômica**. 2011. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/planejamento-rodoviario>>. Acesso em: 23 maio 2011b.
- DUBÉ, K.; MEGAHAN, W.; MCCALMON, M. **Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual**. Department of Natural Resources, State of Washington. 2004. Disponível em; < [http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp\\_data\\_warsem\\_manual.pdf](http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp_data_warsem_manual.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2010.
- EGAN, A.F. Forest Roads: Mere Soil and Water Don't Mix. **Journal of Forest**, Bethesda, vol. 97, n. 8, p.18-21, 1999.

- ELLIOT, W. J.; SCHEELE, D. L.; HALL, D. E. The Forest Service WEPP Interfaces. **ASAE Annual International Meeting**. Paper n. 005021, 2000.
- ELLIOT, W. J. WEPP internet interfaces for forest erosion prediction. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 40, n. 2, p. 299-309, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p
- EVANGELISTA, A. W. P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa, MG: UFV, 2003, 102f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- EVANGELISTA, A.W.P. ; FERREIRA, P.A. ; PRUSKI, F.F. ; SEDIYAMA, G.C. Avaliação do desempenho do modelo CLIGEN em gerar dados climáticos para modelos agrônômicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 119-127, 2006.
- FARABI, H., JAMES, R. Using GIS, terrain attributes and hydrologic models to predict the risk of soil erosion and stream water deterioration caused by forest roads. In: **MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation**. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne. , Dez., 2005.
- FORSYTH, A. R.; BUBB, K. A.; COX, M.E. Runoff, sediment loss and quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. **Forest Ecology and Management**. v. 221, p. 194-206, 2006.
- FRANSEN, P. J. B.; PHILLIPS, C. J.; FAHEY, B. D. Forest road erosion in New Zealand: Overview. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 26, p. 165-174, 2001.
- FU, B.; NEWHAM, T. H.; FIELD, J. B. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. **Mathematics and Computers in Simulation**. v. 79, p. 2679 – 2688, 2009.
- FU, B.; NEWHAM, T. H.; RAMOS-SCHARRÓN, C.E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling & Software**. v. 25, n. 1, p. 1-14, 2010.

- GALLEGO, E; MOYA, M.; PINIÉS, M; AYUGA, F. Valuation of low volume roads in Spain. Part 1: Methodology development. **Biosystems Engineering**. v. 101, n.1, p. 123-134, 2008a.
- GALLEGO, E; MOYA, M.; PINIÉS, M; AYUGA, F. Valuation of low volume roads in Spain. Part 2: Methodology validation. **Biosystems Engineering**. v. 101, n.1, p. 135- 142, 2008b.
- GRACE III, J. M. Sediment Moviment from Forest Road Systems. **American Society of Agricultural Engineers**, p. 13 – 14, 2002.
- GRACE III, J. M. Modeling Erosion from Forest Roads with WEPP. In Proceedings: Environmental Connection 07, Conference 38. Steamboat Springs, CO: **International Erosion Control Association**. 12 p. 2007. Disponível em: < <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/26340> >. Acesso em: 12 out. 2010.
- GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. **Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.3, p 397- 405, 2005a.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. Equipamento para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Viçosa-MG, v.9, n.2, p. 166 - 170, 2005b.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F. ; SILVA, J. M. A. Controle da erosão em estradas não paviementadas. In: Fernando Falco Pruski. (Org.). **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. cap 7, p. 166-215.
- HANSON, C. L.; CUMMING, K. A.; WOOLHISER, D. A.; RICHARDSON, C. W. Microcomputer program for daily weather simulation in the contiguous United States. **USDA - ARS**, ARS-114, 1994.
- HANSON, G. J.; SIMON, A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. **Hydrological Processes**. v. 15, n. 1, p. 23–38, 2001.

- HASHMI, M. Z.; SHAMSELDIN, A. Y.; MELVILLE, B. W. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 475 – 484, 2011.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 137 – 157, 2000.
- JORDÁN, A.; MARTÍNEZ-ZAVALA, L. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. **Forest Ecology and Management**. v. 255, p. 913 – 919, 2008.
- JUNGERIUS, P. D.; MATUNDURA, J.; VAN DE ANCKER, J. A. M. Road construction and gully erosion in west Pokot, Kenya. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 27, p. 1237 - 1247, 2002.
- KALAINESAN, S.; NEUFELD, R. D.; QUIMPO, R.; YODNANE, P. Sedimentation basin performance at highway construction sites. **Journal of Environmental Management**. v. 90, p. 838 – 849, 2009.
- KETCHESON, G. L.; MEGAHAN, W. F.; KING, J. G. “R1 – R4” and “Boised” sediment prediction model tests using forest roads in granitics. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 35, n. 1, p. 83 – 98, 1999.
- KHALILI, M.; BRISSETTE, F.; LECONTE, R. Effectiveness of multi-site weather generator for hydrological modeling. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 47, n. 2, p. 303 – 314, 2011.
- KITE, G. W. **Frequency and risk analyses in hydrology**. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications. 1988. 257p.
- KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYASSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth Science Reviews**. v. 80, p. 75 - 109, 2007.
- KOLKA, R. K.; SMIDT, M. F. Effects of forest roads amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. **Forest Ecology and Management**. v. 202, p. 313-323, 2004.
- KVALSETH, T. O. Cautionary note about  $R^2$ . **The American Statistician**. v. 39, n. 4, p. 279-285, 1985.

- LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GOUTALAND, D.; LETELLIER, L.; GAUDET, J. P.; WINIARSKI, T.; DELOLME, C. Effect of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins. **Geoderma**. v. 156, p. 316-325, 2010.
- LIMA, P. M. P., BAHIA, V. G., CURI, N. et al. Princípios de erodibilidade do solo, **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n.176, 1992.
- LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. Classificação e custos de estradas em florestas plantadas na região sudeste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 26, n.3, p. 329-338, 2002.
- LUGO, A. E.; GUCINSKI, L.H. Function, effects, and management of forest roads. **Forest Ecology and Management**. 133, 249–262, 2000.
- MACDONALD, L.H., SAMPSON, R.W., ANDERSON, D.M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 26, p. 251–272, 2001.
- MACDONALD, L. H.; COE, D. B. R. Road sediment production and delivery: processes and management. In: **Proceedings of the First World Landslide Forum, International Programme on Landslides and International Strategy for Disaster Reduction**. United Nations University, Tokyo, Japan, p. 381–384, 2008.
- MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; SANT'ANNA, G. L. Estradas florestais: o fator determinante do transporte rodoviário florestal. **Revista da Madeira**, n. 73, 2003a. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 29 out. 2008.
- 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. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 295-300, 2003b.
- MADEJ, M. A. Erosion and sediment delivery following removal of Forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 26, p. 175 - 190, 2001.
- MAINE DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION - MDEP. **Gravel Road maintenance manual: A guide for landowners on camp and other gravel roads**. 2010. Disponível em: <[http://www.maine.gov/dep/blwq/docwatershed/roads/gravel\\_road\\_manual.pdf](http://www.maine.gov/dep/blwq/docwatershed/roads/gravel_road_manual.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2010.

- MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **Unpaved Roads: BMP Manual**. 2001. Disponível em: <<http://www.mass.gov/dep/water/resources/dirtroad.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2010.
- MEGAHAN, W.F., WILSON, M., MONSEN, S.B. Sediment production from granitic cutslopes on forest roads in Idaho, USA. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 26, n. 2, p. 153–163, 2001.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**. v. 18, p. 761 - 799, 2003.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. 2. ed. New York: John Wiley, 1992. v. 1, 527 p.
- MORETI, D.; CARVALHO, M. P.; MANNIGE, A. R.; Medeiros, L. R. Importantes características de chuva para a conservação de solo e da água no Município de São Manuel (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, n.1, p. 713-726, 2003.
- MORZARIA-LUNA, H. N.; SCHAEPE, K. S.; CUTFORTH, L. B.; VELTMAN, R. L. Implementation of bioretention systems: a Wisconsin case study. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 40, n. 4, p. 1053-1061, 2004.
- MOTHA, J. A.; WALLBRINK, P. J.; HAIRSINE, P. B.; GRAYSON, R. B. Unsealed roads as suspended sediment sources in an agricultural catchment in south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**. v. 286, p. 1 – 18, 2004.
- NACHTERGAELE, J.; POESEN, J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. **European Journal of Soil Science**, v. 53, p. 449–463, 2002.
- NAIK M. G., RAO, E.P., ELDHO, T.I. A kinematic wave based watershed model for soil erosion and sediment yield. **Catena**, v. 77, p. 256–265, 2009.
- NEARING, M.A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J.M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **American Society of Agricultural Engineers**, v.3, n. 33, p. 839-849, 1990.
- NICKS, A.D.; LANE, L.J.; GANDER, G.A. **Weather Generator**. In: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. Water erosion prediction project (WEPP). West Lafayette: USDA, 1995. Cap.2, p.2.1-2.22.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo – SP, 1995. 240p.

- NYSSSEN, J.; POESEN, J.; MOEYERSONS, J.; LUYTEN, E.; VEYRET-PICOT, M.; DECKERS, J.; HAILE, M.; GOVERS, G. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 27, p. 1267- 1283, 2002.
- NUNES, V.L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. Fortaleza, CE: UFC, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, 2003.
- OLIVEIRA, M. J. G. **Hierarquização para orientar a manutenção de rodovias não pavimentadas**. São Carlos, SP: USP, 2005. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, 2005.
- OLIVEIRA, V. P. S. ; ZANETTI, Sidney Sara ; PRUSKI, Fernando Falco. CLIMABR: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação - Parte I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, p. 356-363, 2005a.
- OLIVEIRA, V. P. S. ; ZANETTI, Sidney Sara ; PRUSKI, Fernando Falco. CLIMABR: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação - Parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, p. 349-355, 2005b.
- OLIVEIRA, J. F.; GRIEBELER, N. P.; CORRECHEL, V.; SILVA, V. C. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13, p. 955 – 960, 2009.
- PRUSKI, F. F. Prejuízos decorrentes da erosão hídrica e tolerância de perdas de solo. In: Fernando Falco Pruski. (Org.). **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. cap. 1 , p. 13-23.
- PRUSKI, F. F., CALIJURI, M. L., BHERING, E. M., SILVA, J. M. Metodologia baseada no uso de sistemas de informações geográficas para obtenção de equações de chuvas intensas em qualquer localidade do Estado do Paraná. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.5, n.3, p.254-265, 1997.
- RAI, R.K., UPADHYAY, A., SINGH, V.P. Effect of variable roughness on runoff. **Journal of Hydrology**, v. 382, p. 115 – 127, 2010.



- RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 30, p. 1283- 1304, 2005.
- RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St John, US Virgin Islands. **Catena**. v. 71, p. 250 -266, 2007a.
- RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St John, US Virgin Islands. **Hydrological Processes**. v. 21, p. 35 -50, 2007b.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., PORTER, J.P. RUSLE: revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 46, p. 30-33, 1991.
- RICE, R. M. Erosion on logging roads in redwood creek, northwestern California. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 35, n. 5, p. 1171 – 1182, 1999.
- RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. WGEN: A model for generating daily weather variables. US Dept. Agric., **Agricultural Research Service**. Publ. ARS-8, 1984. Disponível em: < <http://soilphysics.okstate.edu/software/cmls/WGEN.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2011.
- RIJSDIJK, A.; BRUIJNZEEL, L. A. S.; SUTOTO, C. K. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. **Geomorphology**. v. 87, p. 28 – 37, 2007.
- RUAS, D. T. ; ANTUNES, A. ; Moro, M. ; BRAUN, L. C.; PALMEIRA, E. M. A economia e o agronegócio no Brasil e sul do Brasil. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 105, p. 1-5, 2008.
- RUMMER, B.; STOKES, B.; LOCKABY, G. Sedimentation associated with forest road surfacing in a bottomland hardwood ecosystem. **Forest Ecology and Management**. v. 90, p. 195-200, 1997.
- SANTOS, A. **Estradas vicinais de terra**. São Paulo, IPT, 1988.
- SEMENOV, M. A.; BARROW, E. M. **LARS-WG, A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, User Manual**, 2002. Disponível em:

- <<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2011.
- SHERIDAN, G.J., NOSKE, P.J., WHIPP, R.K., WIJESINGHE, N. The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 8, p. 1683–1699, 2006.
- SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; CECÍLIO, R. A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte 2: Modelo computacional e análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 26, p. 704-712, 2006.
- SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; CECÍLIO, R. A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte 1: desenvolvimento e análise. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 26, p. 695-703, 2006.
- SILVA, D. P. **Modelo de dimensionamento de bacias de acumulação em estradas**. Viçosa, MG: UFV, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- SINGH, V.P. **Kinematic wave modeling in water resources: surface water hydrology**. Wiley, New York, 1996. 1399 p.
- SKORSETH, K.; SELIM, A. A. **Gravel roads: maintenance and design manual**. U. S. Department of Transportation, 2000. Disponível em: < [http://water.epa.gov/polwaste/nps/gravelroads\\_index.cfm](http://water.epa.gov/polwaste/nps/gravelroads_index.cfm) >. Acesso em: 19 out. 2010.
- SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVARES, I. S. **Notas de aula: Mecânica dos solos**. Universidade Federal de Santa Maria. Departamento de Transportes, 2006. Disponível em: <[http://www.ufsm.br/engcivil/Material\\_Didatico/TRP\\_1003\\_mecanica\\_dos\\_solos/capa\\_sumario.pdf](http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didatico/TRP_1003_mecanica_dos_solos/capa_sumario.pdf)> Acesso em: 05 nov. 2010.
- SOLTANI, A.; LATIFI, N. NASIRI, M. Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 102, p. 1 – 12, 2000
- STARZEC, P.; LIND, B. B.; LANNGREN, A.; LINDGREN, A; SVENSON, T. Technical and Environmental Functioning of Detention Basins for the Treatment of Highway and Road Runoff. **Water, Air, and Soil Pollution**. v. 163, p. 153 – 167, 2005.
- TAULIS, M. E.; MILKE, M. W. Estimation of WGEN weather generation parameters in arid climates. **Ecological Modelling**. v. 184, p. 177 - 191, 2005.

- TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**. v. 89, p. 225–247, 2006.
- THOMPSON, M.; SESSIONS, J.; BOSTON, K.; SKAUGSET, A.; TOMBERLIN, D. Forest road erosion control using multi objective optimization. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 46, n. 4, p. 712 – 723, 2010.
- VIVIANE, E.; RAMOS, R. A. R. Proposta de indicadores para suporte a decisão em gerência de vias não pavimentadas. In: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 2., 2006, Braga, Portugal. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/7195/1/ramos-cn-42006-proposta%20de%20indicadores%20para%20suporte.pdf>>. Acesso em 12 jun. 2010.
- WILKS, D. S., WILBY, R. L. The weather generation game: a review of stochastic weather models. **Progress in Physical Geography**. v. 23, n. 3, p. 329–357, 1999.
- WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- ZANETTI, S. S.; PRUSKI, F. F.; MOREIRA, M. C.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, D. D. Programa computacional para geração de séries sintéticas de precipitação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.96-104, 2005.
- ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R. A.; GIAMBELLUCA, T. W. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resources Research**. v. 36, n. 9, p. 2787 – 2791, 2000.
- ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. Erosion prediction on unpaved roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2. **Hydrological Processes**. v. 15, p. 337 – 358, 2001a.
- ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R. A.; GIAMBELLUCA, T.W. Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved mountain roads. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 26, n. 3, p. 235–250, 2001b.
- ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. Improved method for modelling sediment transport on unpaved roads using KINEROS2 and dynamic erodibility. **Hydrological Processes**. v. 16, p. 3079 – 3089, 2002.

ZOCCAL, J. C. **Soluções: Cadernos de Estudos em Conservação de Água e Solo.**  
Presidente Prudente – SP: CODASP, v. 1, n. 1, 2007.