



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS - GPRH



MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA O CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA
NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

Relatório final apresentada ao CNPq,
como parte das exigências do Edital
MCT/CNPq/CT-HIDRO nº 13/2005.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
MAIO / 2008

Índice

1. Introdução	3
2. Caracterização do problema	5
3. Objetivos	13
4. Metodologia.....	14
4.1. O Hidros.....	14
4.1.1. Plúvio 2.0	14
4.1.2. Hidrograma 2.1	15
4.1.3. Terraço 2.0.....	17
4.1.4. Estradas.....	18
4.2. Aperfeiçoamento dos modelos físico-matemáticos contidos no hidros.....	20
4.2.1. Terraço 2.0.....	20
4.2.1.1. Associação do Terraço ao software ClimaBr	20
4.2.1.2. Incorporação de metodologia para o cálculo do espaçamento entre terraços com base na seção de acumulação definida pelo projetista	21
4.2.1.3. Metodologia para o dimensionamento de “barraginhas”	25
4.2.1.4. Procedimento para otimizar a locação de sistemas de terraceamento	26
4.2.1.5. Metodologia para o dimensionamento de sistemas de terraceamento do tipo misto	31
4.2.2. Estradas.....	37
4.3. Monitoramento dos modelos desenvolvidos.....	41
4.3.1. Determinação das perdas de solo e de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas simuladas.....	42
4.3.2. Determinação das perdas de solo e de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas naturais	45
5. Resultados	51
5.1. Terraços.....	51
5.1.1. Aprimoramento do Terraço.....	51
5.1.2. Terraceamento do tipo misto.....	55
5.2. Estradas.....	57
5.3. Avaliação dos modelos desenvolvidos.....	67
5.3.2. Determinação das perdas de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas simuladas.....	67
5.3.1. Determinação das perdas de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas naturais.....	73
6. Bibliografia.....	74

1. Introdução

O Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa vem desenvolvendo tecnologias e obtendo subsídios para o planejamento e manejo integrados dos recursos hídricos visando a tão almejada agricultura sustentável. Com essas informações pretende-se: a) otimizar o dimensionamento e manejo de projetos hidroagrícolas, reduzindo o seu custo de implantação e manutenção; b) minimizar os prejuízos decorrentes da exploração agropecuária sobre os recursos naturais; e c) otimizar o aproveitamento da água, tanto para a agricultura como para diversas outras atividades em que esse recurso é fundamental. Pretende-se, deste modo, fornecer subsídios para o planejamento adequado dos recursos naturais, reduzindo o processo erosivo e atenuando as grandes amplitudes de vazões que têm sido observadas em cursos d'água, e que tem promovido tantos prejuízos à agropecuária e às populações que vivem às margens desses.

Dessa linha de ação já resultaram diversos trabalhos, apresentados em congressos e publicados em revistas e livros científicos, e várias outras ações, dentre as quais cita-se:

a) desenvolvimento de metodologia para a obtenção da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para uma ampla região de abrangência e aplicação dessa metodologia a diversos estados brasileiros;

b) desenvolvimento de modelos para a estimativa do volume e da vazão máxima de escoamento superficial;

c) Terraço 3.0: disponibiliza, além do dimensionamento e manejo de sistemas de conservação de solos e drenagem de superfície, as funções: realizar, a partir de imagens digitais do terreno, do tipo de solo e seu uso e manejo, o dimensionamento e a locação em planta de sistemas de terraceamento em nível; acessar banco de dados relativo à descrição dos principais tipos de sistemas de terraceamento e critérios para a sua seleção; e simular o comportamento de sistemas de terraceamento com gradiente e drenagem de superfície;

d) desenvolvimento de metodologia para estimar o hidrograma de escoamento superficial em encostas;

e) elaboração de modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica;

f) elaboração de modelo para o dimensionamento de sistemas de drenagem e bacias de acumulação em estradas não pavimentadas;

g) desenvolvimento e aplicação de modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas;

h) modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação; e

i) modelo computacional para geração de séries sintéticas de precipitação e do seu perfil instantâneo.

Considera-se que o grande desafio apresentado para os pesquisadores envolvidos com a pesquisa voltada à minimização dos impactos advindos da erosão constitui na elaboração de propostas tecnológicas e de modelos representativos das condições brasileiras que busquem contornar as limitações decorrentes dos restritos bancos de dados existentes hoje no país para dar suporte a estes modelos. Para tanto é fundamental que sejam levados em conta não só a limitação destes bancos de dados, mas, também, a necessidade de disponibilização dos procedimentos a extensionistas e profissionais envolvidos com o planejamento integrado de recursos hídricos. Para tanto, considera-se que o desenvolvimento de modelos e de softwares a eles associados com interfaces “amigáveis” deve constituir em uma incessante busca pelos pesquisadores que trabalham com o planejamento e manejo integrados de recursos hídricos visando o desenvolvimento sustentável da agricultura.

O presente projeto constitui em mais uma etapa relativa às atividades desenvolvidas pelo GPRH visando a adequação de práticas conservacionistas a fim de minimizar os prejuízos decorrentes da exploração agropecuária sobre os recursos naturais e possibilitar a melhoria da qualidade e quantidade de água disponibilizada para usos múltiplos. Nesta etapa o principal enfoque estará direcionado à incorporação ao Hidros, sobretudo aos modelos Terraço 2.0 e Estradas, de procedimentos que permitam ampliar a gama de alternativas já disponíveis para o controle do processo erosivo em áreas agrícolas.

2. Caracterização do problema

A erosão consiste no processo de desprendimento e transporte das partículas sólidas do solo, constituindo em um dos maiores riscos ambientais, sendo seu controle necessário quando a quantidade de solo removida atinge valores acima de um limite considerado aceitável (Madaras e Jarret, 2000). Grandes áreas cultivadas podem se tornar improdutivas, ou economicamente inviáveis, se a erosão não for mantida em níveis toleráveis (Higgitt, 1991).

De acordo com Yu et al. (1998), cerca de dois bilhões de hectares, o que equivale a aproximadamente 13% da superfície terrestre, têm sofrido algum tipo de degradação induzida pelo homem. A erosão é um dos principais fatores causadores da degradação e deterioração da qualidade ambiental, sendo esta acelerada pelo uso e manejo inadequados do solo.

Segundo a Federação das Associações dos Engenheiros Agrônomos do Brasil, citada por Bahia et al. (1992), no Brasil são perdidas, a cada ano, 600 milhões de toneladas de solo agrícola por causa da erosão. Em 1994 as perdas de solo em áreas intensivamente mecanizadas no Estado do Paraná foram estimadas em 15 a 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Paraná, 1994). Para o Estado de São Paulo, Bertolini et al. (1993) mencionam que dos 194 milhões de toneladas de terras férteis erodidas anualmente, 48,5 milhões atingem os cursos d'água. Estes valores representam a perda de 10 kg de solo para cada quilo de soja produzido ou 12 kg para cada kg de algodão. Schmidt (1989) ressalta que as perdas no Estado do Rio Grande do Sul chegam a 40 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Hernani (2003) estima, para o Brasil, prejuízos diretamente associados à erosão nas propriedades rurais, decorrentes dos menores rendimentos e maiores custos da produção, da ordem de US\$ 2,9 bilhões. Os custos gerados pela erosão fora da propriedade são estimados em US\$ 1,3 bilhão, totalizando prejuízos anuais de US\$ 4,2 bilhões.

Além das perdas de solo, existe ainda outro problema, o qual está associado à manutenção da água precipitada na propriedade. Grande parte desta água escoar sobre a superfície do solo, fazendo com que haja uma redução do volume de água que atinge o lençol freático. De Maria (1999) estimou as perdas de água em áreas com cultivos agrícolas em 2.519 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e, para áreas sob pastagens, equivalente a um décimo deste, correspondendo a uma perda em torno de 171 bilhões de m³ de água por ano nas áreas ocupadas por estes tipos de usos. Esta

perda de água reduz o volume de água disponível para as plantas, bem como aquele utilizado para abastecimento dos rios e poços.

Adicionalmente às perdas de solo e água são também perdidos nutrientes, material orgânico e defensivos agrícolas. Hernani et al. (2002), Bragagnolo e Pan (2000) e Betoni e Lombardi Neto (1990) estimaram as perdas de nutrientes e matéria orgânica devidos à erosão do solo em: cálcio - 2,5 milhões de t; magnésio - 186 mil t; fósforo - 142 mil t; potássio - 1,45 milhões de t; e matéria orgânica - 26 milhões de t. Os valores econômicos diretos advindos destas perdas geram cifras extremamente elevadas. Na Tabela 1 são apresentadas estimativas dos prejuízos gerados devido às perdas de fertilizantes e corretivos do solo (Hernani et al., 2002).

Tabela 1 – Estimativa do valor econômico das perdas de nutrientes e matéria orgânica devidos à erosão

Produto	Valor econômico (R\$ 10⁶)
Calcário dolomítico	563,00
Superfosfato triplo	483,00
Cloreto de potássio	1.679,00
Uréia	2.576,00
Sulfato de amônio	430,00
Adubo orgânico	2.063,00
Total	7.951,00

O transporte de sedimentos e fertilizantes químicos ou orgânicos para os corpos d'água provoca sua poluição e contaminação, aumentando os custos de tratamento de água, a redução no potencial de geração de energia elétrica, elevando, conseqüentemente, o custo destes produtos. A contaminação dos corpos d'água reflete-se, ainda, diretamente na saúde dos usuários das águas contaminadas, bem como também na redução da vida aquática, provocando desequilíbrios ambientais. A elevada taxa de escoamento superficial e a baixa capacidade dos escoadouros naturais ou artificiais de transportarem provocam ainda a ocorrência de enchentes em períodos chuvosos e escassez de água em períodos secos.

Estes problemas tendem a se agravar com a ampliação da fronteira agrícola, uma vez que técnicas adequadas não são utilizadas para a contenção do processo

erosivo. Na Tabela 2 são apresentados alguns valores dos prejuízos provocados pela erosão do solo em diversos setores (Hernani et al., 2002).

Tabela 2 – Custos devidos à erosão dos solos

Impactos	Valor econômico (US\$ 10 ⁶)
Perda de nutrientes e matéria orgânica	3.178,80
Depreciação da terra	1.824,00
Tratamento de água para consumo humano	0,37
Manutenção de estradas	268,80
Reposição de reservatórios	65,44
Custo total	5.337,41

Os prejuízos sociais e ambientais advindos da erosão também são bastante elevados. A erosão do solo reduz a capacidade produtiva das terras, refletindo no aumento dos custos de produção e, conseqüentemente, no lucro obtido pelos agricultores. Pode também reduzir a área para exploração agrícola, bem como interferir na qualidade das vias de deslocamento, impossibilitando, em algumas situações, o acesso de moradores de áreas rurais à educação e à saúde. Estes aspectos causam expressivo impacto na qualidade de vida do agricultor e, conseqüentemente, na sua própria permanência no campo. Portanto, a construção e o uso inadequado das estradas, principalmente as não pavimentadas, é outro grande problema relacionado à conservação do solo. Estas modificam o percurso natural do escoamento superficial, alteram a capacidade de infiltração da água no solo e, em alguns casos, concentram águas advindas de áreas adjacentes, funcionando de maneira semelhante a um canal de drenagem.

A eficiência do controle do processo erosivo em áreas agrícolas depende da exploração do solo com atividades agrossilvopastoris adequadas à sua capacidade de uso. As práticas conservacionistas são utilizadas com o intuito de reduzir o impacto das gotas de chuva, favorecer a formação de agregados e aumentar a capacidade de infiltração de água no solo. Para alcançar estes objetivos, diversas práticas vegetativas, edáficas e mecânicas devem ser utilizadas, sendo recomendável o estabelecimento de um plano de ocupação do solo, no qual os diversos fatores que interferem na erosão sejam considerados de forma integrada. Dentre estes fatores, os mais importantes são as propriedades do solo, a declividade do terreno, as características das chuvas típicas da região e o sistema de produção

usado, sendo que, em qualquer planejamento conservacionista, deve-se buscar o aumento da infiltração de água no solo, visando aumentar a quantidade de água disponível para as culturas e evitar a poluição dos mananciais hídricos.

As práticas mecânicas são aquelas que utilizam estruturas artificiais para a redução da velocidade de escoamento da água sobre a superfície do terreno. O terraceamento de terras agrícolas representa uma das práticas mecânicas mais difundidas e utilizadas pelos agricultores para controlar a erosão hídrica, constituindo na mais importante prática mecânica de controle da erosão. Companhia... (1994) descreve este sistema como um conjunto de terraços adequadamente espaçados, com o objetivo de reter e infiltrar, ou conduzir, com velocidade controlada, o escoamento superficial para fora da área protegida. A eficiência desse sistema depende do correto dimensionamento do espaçamento entre terraços e de sua seção transversal.

Embora o terraceamento seja uma prática de conservação do solo usada há mais de 100 anos, ainda apresenta dificuldades relativas ao planejamento, à construção e à manutenção dos terraços (Margólis, 1989). Uma das principais causas dos problemas relacionados aos sistemas de terraceamento está ligada à utilização de tabelas antigas para o cálculo do espaçamento entre terraços, as quais não levam em consideração o sistema de preparo do solo e o manejo dos restos culturais (Companhia..., 1994). Bertoni e Lombardi Neto (1990) comentam que os sistemas de terraceamento, quando bem planejados e construídos, reduzem as perdas de solo e água e previnem a formação de sulcos e voçorocas, sendo mais eficientes quando usados em combinação com outras práticas conservacionistas.

Um outro tipo de prática mecânica de conservação de solos, proposta pela Embrapa Milho e Sorgo, constitui na construção de barragens para a contenção da água decorrente do escoamento superficial. Embora esta prática, designada de barraginhas, tenha apresentado uma boa progressão do seu uso nos últimos anos, não apresenta, contudo, uma proposição metodológica concreta para o seu adequado dimensionamento.

Outro grande problema relacionado à conservação do solo é a construção e o uso inadequado das estradas, principalmente as não pavimentadas. Estas modificam o percurso natural do escoamento superficial, alteram a capacidade de infiltração da água no solo e, em alguns casos, concentram águas advindas de áreas adjacentes, funcionando de maneira semelhante a um canal de drenagem.

A malha viária do Brasil é, em média, composta por mais de 90% de estradas não pavimentadas (DNER, 2000). No Estado de São Paulo, apenas 30.000 km, dos mais de 250.000 km existentes, são pavimentados (Anjos Filho, 1998). Esta predominância das estradas não pavimentadas em relação às pavimentadas é uma realidade praticamente em todos os países. Nos países em desenvolvimento a importância destas estradas é maior, uma vez que grande parte de sua economia é baseada na produção e comercialização de produtos primários, os quais são transportados principalmente neste tipo de estrada. A integração entre comunidades e o seu desenvolvimento estão condicionados diretamente à existência de estradas em condições favoráveis para utilização sob as mais variadas condições climáticas. Desta forma, a revitalização da economia agrícola está também relacionada diretamente à existência de estradas em boas condições de tráfego, ajudando na manutenção do homem no campo e na integração deste à sociedade urbana, representando, assim, importante fator para a redução do êxodo rural.

Em condições inadequadas, as estradas podem iniciar ou agravar processos erosivos em áreas cultivadas, prejudicando a produtividade e, conseqüentemente, a lucratividade dos produtores rurais, além de afetar a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos. No Estado de São Paulo aproximadamente metade das perdas de solo são devidas a estradas em condições inadequadas (Anjos Filho, 1998). Grace III et al. (1998) salientam que mais de 90% do sedimento produzido em áreas florestais provém das estradas, sendo a drenagem inadequada um dos principais fatores responsáveis por essas perdas. A maior porção do sedimento produzido na superfície da estrada é de tamanho inferior a 2 mm, sendo o material desta granulometria o mais prejudicial ao sistema aquático (Reid e Dunne, 1984). Segundo estes autores, comumente o material erodido das estradas move-se diretamente dos canais de drenagem aos cursos d'água.

As práticas para o controle da erosão hídrica nas áreas rurais normalmente desprezam a estrada como elemento integrante do ambiente rural. A redução dos problemas de erosão nas estradas de terra pode ser obtida por meio da adoção de medidas que evitem 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 escoada pela estrada deve ser coletada nas suas laterais e encaminhada, de modo a não provocar erosão, para os escoadouros naturais, artificiais, bacias de acumulação ou outro sistema de retenção localizado no terreno marginal. Os espaçamentos

recomendados pela literatura para a retirada da água das estradas (Bublitz e Campos, 1992; Manual..., 2000; Pastore, 1997) são, normalmente, estabelecidos de acordo com a declividade da estrada e tipo de solo, não sendo considerados aspectos locais de precipitação, bem como características físicas dos solos que indicam sua capacidade de resistir à erosão e características geométricas dos sistemas de condução.

Diversos estudos e modelos para a compreensão e atenuação dos processos erosivos têm sido desenvolvidos para áreas cultivadas. O desenvolvimento de modelos voltados ao controle do processo erosivo em estradas, no entanto, tem sido pequeno frente aos prejuízos econômicos, sociais e ambientais causados por este tipo de obra. Fonte de processos erosivos expressivos, as estradas não pavimentadas apresentam fundamental importância no processo conservacionista, alterando as características naturais do terreno. De acordo com Ziegler et al. (2000), as equações para a predição de processos erosivos que não são baseadas nas condições reais das estradas não predizem a perda inicial do material prontamente disponível ao transporte.

A minimização do processo erosivo pode ser realizada com o uso de diversas técnicas, as quais devem ser utilizadas de maneira integrada, considerando o ambiente como um todo. Diversos Programas de Manejo e Conservação do Solo têm sido desenvolvidos no Brasil, apresentando resultados satisfatórios. Apesar do sucesso destes programas, sua utilização, de maneira generalizada, ainda mostra-se bastante aquém da desejada. Alguns dos aspectos relacionados a este fato referem-se à necessidade de desenvolvimento de pesquisas destinadas à solução dos problemas específicos pertinentes ao planejamento e manejo integrados dos recursos hídricos e disponibilização destas tecnologias aos técnicos envolvidos com estas atividades. Nesse sentido merecem destaque os seguintes aspectos:

- elevado custo de realização de diagnósticos e de aplicação das técnicas disponíveis;
- baixa eficiência das técnicas normalmente utilizadas, as quais, em grande parte, são baseadas em conhecimentos advindos de regiões sob condições bastante distintas daquelas encontradas no Brasil;
- pequena integração entre os meios científico e técnico, de modo que técnicas de maior eficiência possam ser desenvolvidas para as condições brasileiras;

- melhor entendimento do processo erosivo e direcionamento do foco de atenção aos setores de maior impacto sobre o processo; e
- dificuldades na integração de técnicas matemáticas e computacionais às condições de campo.

A integração dos diversos aspectos da conservação do solo em programas de manejo integrado e a disponibilização de técnicas que facilitem esta integração torna-se fundamental para que a eficiência destes programas e a sua aplicação possam ser ampliadas.

Visando atenuar os problemas associados à erosão hídrica a Agência Nacional de Águas propôs, através da sua Superintendência de Conservação de Água e Solo, o programa intitulado Produtor de Água, que constitui em um programa voltado à melhoria da qualidade e da quantidade de água produzida em áreas agrícolas. Neste programa serão feitos pagamentos, segundo o conceito provedor-recebedor, aos produtores que, através de práticas e manejos conservacionistas, contribuam para a melhoria das condições dos recursos hídricos superficiais.

Os modelos são ferramentas de análise importantes, pois podem ser usados para assegurar uma melhor compreensão dos processos hidrológicos, analisar o desempenho de práticas de manejo, avaliar os riscos e benefícios advindos de diferentes tipos de uso do solo, e auxiliar à tomada de decisão na implantação de sistemas agrícolas (Spruill et al., 2000). Podem ser utilizados como ferramenta de planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas, além de possibilitar uma visão sistêmica e multidisciplinar do sistema a ser modelado e possibilitar a realização de uma série de simulações, com rapidez e a baixo custo (Oliveira, 2003).

O grande desafio para os profissionais envolvidos com a pesquisa voltada ao planejamento integrado dos recursos naturais nas condições brasileiras constitui na elaboração de propostas tecnológicas e modelos representativos para estas condições e que contornem, portanto, as limitações decorrentes dos restritos bancos de dados existentes hoje no país para dar suporte a estes modelos. Para tanto, é fundamental que sejam levadas em conta não só a limitação destes bancos de dados, mas, também, a necessidade de disponibilização dos procedimentos a extensionistas e profissionais envolvidos com o planejamento integrado de recursos naturais. Neste sentido, considera-se que o desenvolvimento de modelos e de softwares a eles associados com interfaces “amigáveis” deve constituir uma incessante busca pelos pesquisadores.

Desta forma, o Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, tem desenvolvido pesquisas e disponibilizado técnicas voltadas às condições reinantes no Brasil. Assim sendo, têm sido realizados trabalhos de modo que tanto as áreas sob produção agrícola, bem como aquelas adjacentes a estas, sejam tomadas de maneira integrada, possibilitando que todos os aspectos relevantes da erosão do solo sejam considerados.

O Hidros é um conjunto de softwares desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH). Estes softwares implementam diversos modelos para o dimensionamento e manejo de projetos hidroagrícolas, tendo sido elaborado com interface amigável e composto por softwares que permitem: determinar os parâmetros da equação de chuvas para um grande número de localidades brasileiras (Plúvio 2.0); proceder o dimensionamento de canais para a condução de água (Canal); proceder o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem de superfície (Dreno 2.0); racionalizar o uso das principais práticas conservacionistas utilizadas para o controle da erosão em áreas agrícolas (Terraço 2.0); selecionar, dimensionar e otimizar a implantação de sistemas de terraceamento, considerando as condições da área agrícola analisada (Terraço 2.0); dimensionar sistemas de drenagem e bacias de acumulação em estradas não pavimentadas (Estradas); e obter o hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma encosta (contendo várias seções) ou em seções transversais do canal de terraços ou drenos de superfície (Hidrograma 2.1). Todos estes softwares encontram-se disponíveis para download gratuitamente no endereço www.ufv.br/dea/gprh.

3. Objetivos

Objetivo Geral

Dar continuidade ao processo de desenvolvimento de um modelo físico-matemático (Hidros) para o planejamento de áreas agrícolas visando a conservação de água e solo e a melhoria das condições (quantitativas e qualitativas) de disponibilização da água produzida nestas áreas.

Objetivos Específicos

1. Aperfeiçoar o software Terraço 2.0 e o modelo físico-matemático a ele associado com a incorporação das seguintes funções: metodologia para o cálculo do espaçamento entre terraços que permita a sua estimativa em função da área da seção de acumulação definida pelo projetista; procedimento computacional que permita o dimensionamento das barragens de contenção das águas superficiais de chuvas (barraginhas); adequação do procedimento para otimizar a locação de sistemas de terraceamento; e metodologia para o dimensionamento de sistemas de terraceamento do tipo misto.

2. Incorporação ao software Estradas e ao modelo físico-matemático a ele associado de procedimentos que permitam: a consideração da variação da declividade do canal e do comprimento da área de contribuição ao longo da estrada; e o dimensionamento do canal de condução do escoamento da estrada para a bacia de acumulação.

3. Proceder a avaliação dos modelos desenvolvidos.

4. Metodologia

4.1. O Hidros

Tendo em vista o fato que o presente trabalho constituiu em uma ação de aperfeiçoamento de alguns dos modelos já disponíveis no Hidros, na seqüência apresenta-se uma descrição de seus principais módulos constituintes que sofreram alteração com o desenvolvimento deste projeto. Maiores informações a respeito destes modelos, bem como cópias dos softwares a eles associados, podem ser encontradas no endereço eletrônico www.ufv.br/dea/gprh.

4.1.1. Plúvio 2.0

O principal fator climático interveniente no processo erosivo é a chuva. O conhecimento da equação que relaciona a intensidade, duração e freqüência da precipitação também apresenta grande interesse de ordem técnica em Engenharia, em razão de sua freqüente aplicação nos projetos de obras hidráulicas, como: vertedores, retificação de cursos d'água, galerias de águas pluviais, bueiros, sistemas de drenagem agrícola, urbana e rodoviária, entre outros.

As dificuldades que existem para a obtenção das equações de chuvas intensas decorrem de limitações referentes aos dados disponíveis, seja em termos de densidade da rede pluviográfica, seja em relação ao pequeno período de observação disponível. Além disso, para a determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas é necessário um exaustivo trabalho de análise, interpretação e codificação de uma grande quantidade de dados. Neste sentido, desenvolveu-se um software, denominado Plúvio 2.0 (www.ufv.br/dea/gprh/pluvio), que possibilita a obtenção da equação de chuvas intensas para qualquer localidade dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Tocantins. Para os demais estados, permite sua obtenção apenas para as localidades onde já existem as equações.

Tendo em vista o fato da caracterização da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação depender exclusivamente dos quatro parâmetros utilizados nesta equação, e de já se ter determinado em projetos anteriores os seus valores em diversas localidades, desenvolveu-se metodologia para a obtenção das

equações de chuvas intensas em locais em que essa não é conhecida. Essa metodologia está fundamentada no uso de interpolador que permite obter cada um dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação a partir das informações disponíveis para o Estado. Desta forma, é possível quantificar os parâmetros da equação de intensidade, duração e frequência da precipitação para qualquer localidade desses Estados e, conseqüentemente, obter a própria equação de chuvas intensas para esse local.

Na Figura 1 são apresentadas telas relativas ao Plúvio 2.0. A Figura 1a apresenta a tela para a seleção do Estado de interesse e a Figura 1b apresenta os resultados relativos aos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência (K, a, b, c) para uma localidade específica do Estado de São Paulo, bem como a latitude e longitude da localidade especificada. Maiores informações podem ser obtidas pelo sistema de “Ajuda” disponível no software.

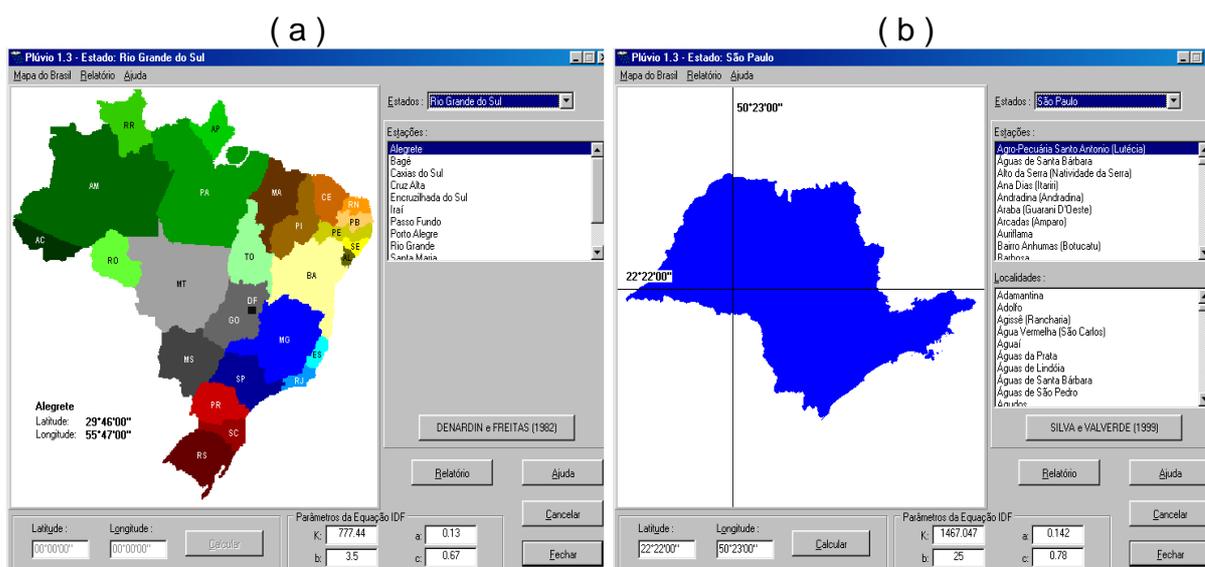


Figura 1 – Telas para a seleção do Estado a ser estudado (a); e para a obtenção dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação determinados para uma localidade do Estado de São Paulo (b).

4.1.2. Hidrograma 2.1

Uma das grandes dificuldades no projeto de obras hidráulicas e para a contenção do escoamento superficial é a estimativa do volume de escoamento superficial, tendo em vista o fato de que as metodologias desenvolvidas no exterior, como é o caso do Método do Número da Curva, apresentam limitações quanto ao seu uso para as condições edafoclimáticas brasileiras. Tendo em vista este fato,

Pruski et al. (1997) desenvolveram uma metodologia, baseada na consideração dos diversos fatores que interferem nos processos associados à produção do escoamento superficial, para determinar o volume de escoamento superficial em localidades em que a relação entre intensidade, duração e frequência da precipitação é conhecida. Silva (1999), utilizando este modelo, desenvolveu metodologia para a obtenção do hidrograma de escoamento ao longo de encostas e em canais e drenos de superfície.

O software Hidrograma 2.1 (www.ufv.br/dea/gprh/hidrograma) permite obter: o hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma encosta, considerando condições uniformes ou não, ou em seções transversais do canal de terraços ou drenos de superfície; a vazão máxima e seu tempo de ocorrência; a profundidade e a velocidade máximas do escoamento superficial; e o volume e a lâmina de escoamento superficial em áreas agrícolas.

O modelo desenvolvido para a estimativa da vazão de escoamento superficial, tanto em encostas como concentrado em canais, é feito com base nas equações que regem o escoamento gradualmente variado em superfícies livres, as quais foram estabelecidas por Saint-Venant. São equações que traduzem os princípios físicos da conservação da massa (equação da continuidade) e da conservação da quantidade de movimento (equação da dinâmica) (Silva, 1996). O modelo de ondas cinemáticas é uma das formas de aplicação das equações de Saint-Venant.

O software Hidrograma 2.1 fornece o hidrograma de escoamento superficial, emite relatórios e simula o efeito sobre a vazão máxima e o volume escoado decorrente da variação de: comprimento, taxa de infiltração estável, declividade e rugosidade para condições de encosta e comprimento, declividade e rugosidade para condições de canal de terraços ou drenos de superfície. Na Figura 2 são apresentadas telas relativas ao software Hidrograma 2.1. A Figura 2a diz respeito à tela de abertura do software, enquanto a Figura 2b apresenta a tela relativa aos resultados obtidos com o emprego do software para uma condição específica.

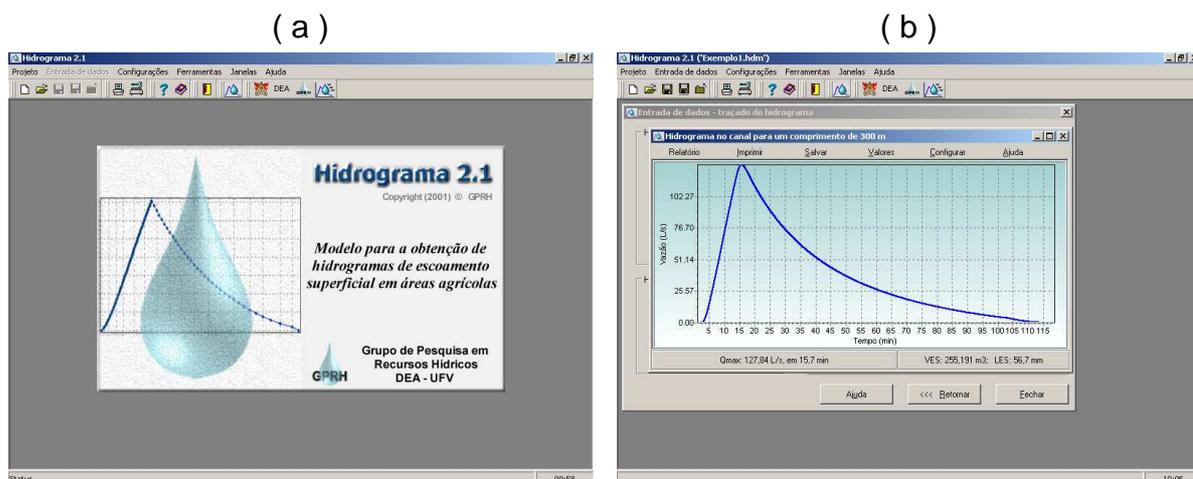


Figura 2 – Telas de abertura do software Hidrograma 2.1 (a); e pertinente aos resultados obtidos com o emprego do software para uma condição de escoamento concentrado em um canal (b).

4.1.3. Terraço 2.0

Tendo em vista: as grandes perdas que ocorrem na produção agrícola em decorrência da erosão; a necessidade de implantação de práticas conservacionistas que garantam a preservação ambiental; e o elevado custo de implantação e manutenção de sistemas de conservação de solos e drenagem de superfície, é fundamental que a implantação desses sistemas seja feita de forma adequada, otimizando o projeto e minimizando o seu custo.

O software Terraço 2.0 (www.ufv.br/dea/gprh/terraço2) constitui uma evolução do software *Terraço for Windows* (www.ufv.br/dea/gprh/terraço) e que permite, além do dimensionamento e manejo de sistemas de conservação de solos e drenagem de superfície, funções já desenvolvidas por este: realizar a locação, em planta, de sistemas de terraceamento em nível; acessar bancos de dados relativos à descrição dos principais tipos de sistemas de terraceamento e critérios para a sua seleção; e simular o comportamento de sistemas de terraceamento com gradiente e drenagem de superfície. Elaborado com uma interface amigável, sua utilização é muito simples. Dispõe de um sistema de ajuda onde constam informações técnicas sobre os procedimentos utilizados para os cálculos e sobre a utilização do software.

Na Figura 3 são apresentadas telas relativas ao software Terraço 2.0. A Figura 3a diz respeito à tela de abertura do software, enquanto a Figura 3b apresenta a tela relativa aos resultados obtidos com o emprego do software para uma condição específica de dimensionamento de sistemas de terraceamento em nível, em que, em primeiro plano, são apresentados os resultados e, ao fundo, a tela

relativa à entrada de dados. A Figura 3c apresenta os resultados pertinentes a simulações realizadas para sistemas de terraceamento com gradiente e a Figura 3d mostra resultados pertinentes ao emprego do módulo de locação de sistemas de terraceamento.

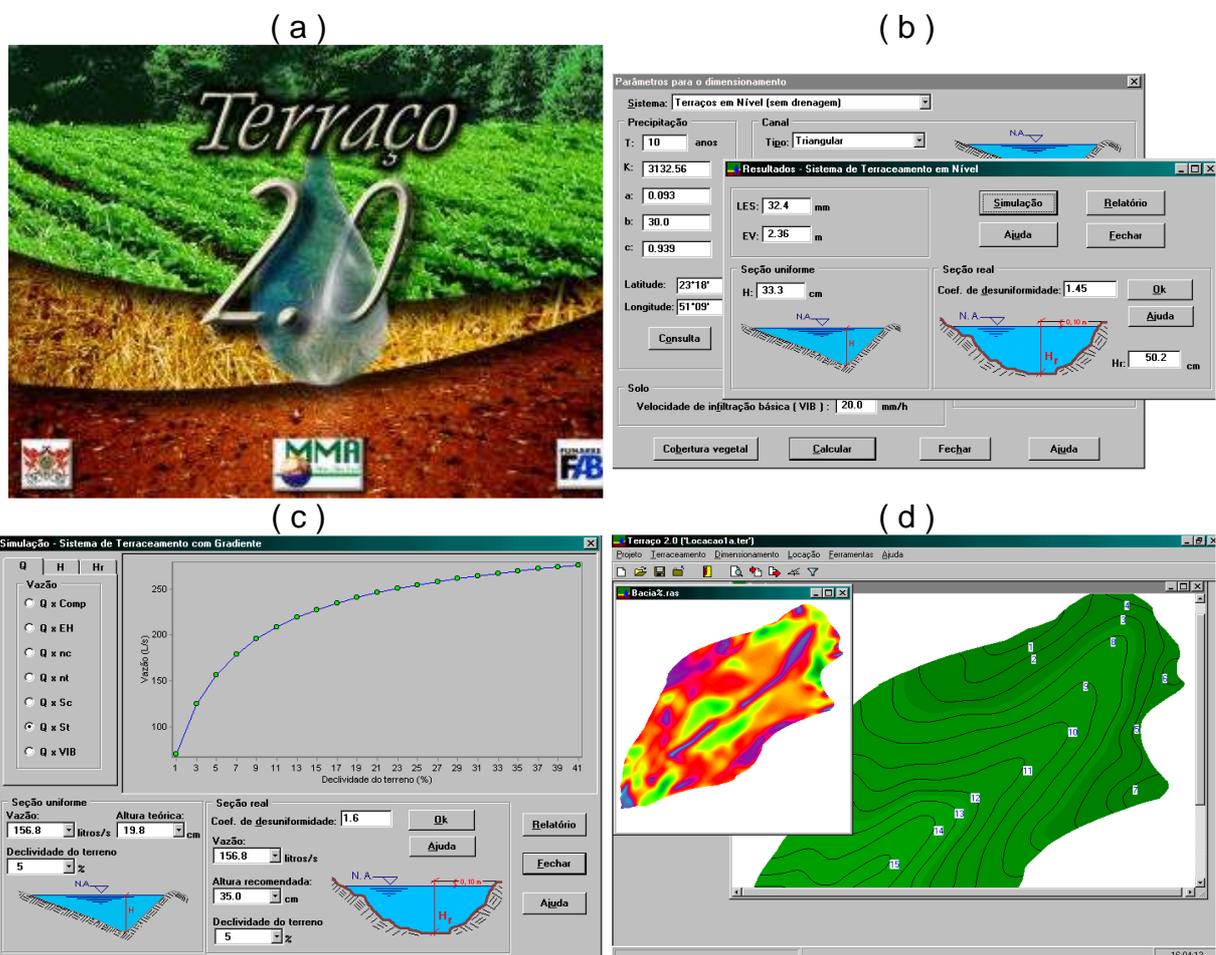


Figura 3 – Telas relativas ao software Terraço 2.0: abertura (a); dimensionamento de sistemas de terraceamento em nível (b); simulação do desempenho de sistemas de terraceamento com gradiente (c); e locação de sistemas de terraceamento em nível (d).

4.1.4. Estradas

O espaçamento máximo entre desaguadouros é aquele em que a perda provocada pelo escoamento iguala a perda tolerável. Para a aplicação do modelo desenvolvido para o dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas (descrito mais detalhadamente no item 4.2.2) foi elaborado um software intitulado Estradas. As informações requeridas pelo software para a realização das simulações são aquelas referentes às condições da precipitação e do escoamento, obtidas com a utilização dos softwares Plúvio 2.0 e Hidrograma,

respectivamente, bem como as características pertinentes ao leito da estrada e às demais áreas de contribuição.

Além da determinação do espaçamento entre desaguadouros, o modelo permite a quantificação da vazão e do volume escoado, possibilitando o dimensionamento do canal e do sistema para acumulação de água.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas telas do software desenvolvido. Na Figura 4a é apresentada a tela de abertura, incluindo o nome, função e grupo de desenvolvimento. Na Figura 4b é apresentada a tela para entrada de dados referentes à precipitação, sendo utilizado o software Plúvio 2.0, e na Figura 4c a tela para entrada dos dados referentes ao leito da estrada. Nas Figuras 5a e 5b são apresentadas as telas referentes à entrada de dados para o canal e a tela de resultados, respectivamente. O software permite, além da determinação do espaçamento entre desaguadouros, o dimensionamento do sistema de acumulação de água.

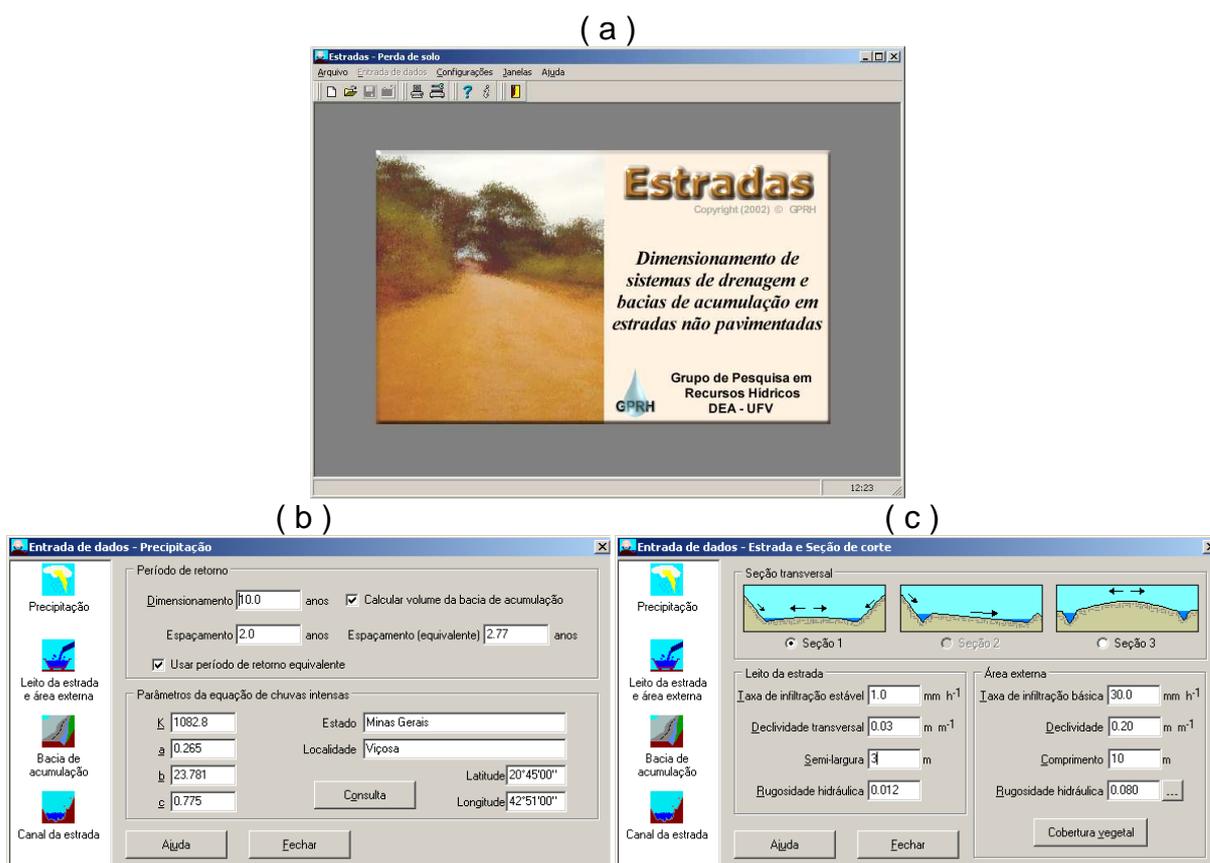


Figura 4 – Telas referentes ao software desenvolvido, sendo: a) tela de entrada do software; b) tela para a entrada dos dados referentes à precipitação; e, c) tela para entrada dos dados referentes ao leito da estrada.

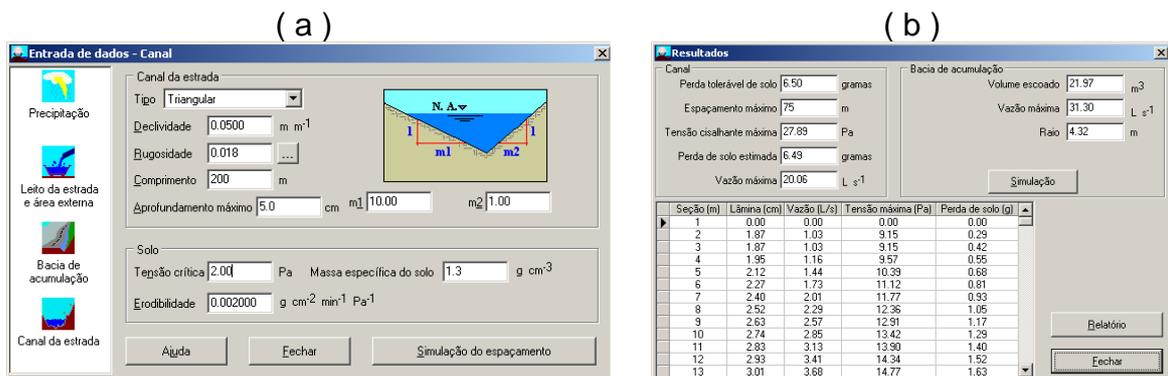


Figura 5 – Telas referentes ao software desenvolvido, sendo: a) tela para entrada dos dados referentes ao canal; e b) tela com os resultados fornecidos pelo software.

4.2. Aperfeiçoamento dos modelos físico-matemáticos contidos no hidros

4.2.1. Terraço 2.0

Como principais aperfeiçoamentos incorporados ao software Terraço 2.0 pode-se citar a incorporação de: a) metodologia para o cálculo do espaçamento entre terraços que permita a sua estimativa em função da área da seção de acumulação definida pelo projetista; b) metodologia para o dimensionamento de “barraginhas”; c) procedimento que permita otimizar a locação de sistemas de terraceamento; e d) metodologia para o dimensionamento de sistemas de terraceamento do tipo misto.

4.2.1.1. Associação do Terraço ao software ClimaBr

O ClimaBR é um software que permite gerar dados diários de precipitação, da lâmina precipitada, a duração, o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea para os eventos gerados, além do perfil instantâneo dos mesmos.

O perfil originalmente utilizado pelo software é uma exponencial decrescente, com a intensidade máxima instantânea de precipitação ocorrendo a partir do início do evento (Pruski et al., 1997). Este perfil foi preservado no Terraço 4.0, porém foi criada uma nova opção, que consiste na associação do Terraço ao ClimaBR e considera o perfil de precipitação de precipitação como sendo uma dupla exponencial.

O usuário deve selecionar o dia para o qual deseja realizar as simulações, sendo que os parâmetros da dupla exponencial são determinados automaticamente.

4.2.1.2. Incorporação de metodologia para o cálculo do espaçamento entre terraços com base na seção de acumulação definida pelo projetista

Em meio à polêmica atualmente existente sobre a adoção de terraceamento em lavouras conduzidas sob plantio direto, a Emater-RS, a Embrapa Trigo e produtores rurais se propuseram a validar a metodologia proposta no software Terraço. Conforme Denardin et al. (1998) (www.cnpt.embrapa.br/p_co08.htm), a validação da metodologia proposta no Terraço teve início em 05/1997 com a participação da Emater-RS, Embrapa-Trigo e de produtores rurais e foi realizada em uma área de 149 ha, situada no município de Sarandi-RS. O sistema de terraceamento projetado constou de terraços de base larga e sem gradiente. Na área em que foi realizado o trabalho de validação ocorreu precipitação de 2.450 mm no período de 1/9/97 a 13/5/98, sendo que a média anual é de 1.788 mm. As chuvas de 142 mm (dia 10/10) e de 125 mm (dia 30/10) constituem precipitações com períodos de retorno de 25 e 12 anos, respectivamente. Além disso, ocorreram ainda precipitações de 371 mm, no período de 9 a 16/10, e de 325 mm, no período de 29/10 a 7/11 sem, contudo, terem provocado danos ao sistema de terraceamento implantado.

Na quantificação do espaçamento entre terraços foi pré-definida a capacidade de armazenamento dos terraços em $1,5 \text{ m}^3/\text{m}$ e utilizado o procedimento disponível no software Terraço para proceder, manualmente, o ajuste do espaçamento que produz o volume de escoamento superficial pré-definido. Visando facilitar a aplicação desta metodologia é que foi implementado no software Terraço uma metodologia para a estimativa do espaçamento entre terraços, a qual está baseada na definição, por parte do usuário, da altura pretendida para o sistema de terraceamento. Com base nesta informação e utilizando o procedimento desenvolvido por Pruski et al. (1997) para o cálculo da lâmina máxima de escoamento superficial foi feito o cálculo do espaçamento entre terraços para que o volume de escoamento superficial produzido seja condizente com a capacidade de armazenamento de água estabelecida para o terraço.

A estimativa do volume máximo de escoamento superficial é realizada com base em metodologia desenvolvida por Pruski et al. (1997) e que está baseada na

premissa de que o solo se encontra com umidade próxima à saturação quando da ocorrência da chuva de projeto. Para esta condição a taxa de infiltração é estável e igual a T_{ie} .

Para a obtenção do escoamento superficial máximo é utilizado um Modelo de Balanço de Água na Superfície do Solo (Figuras 6 e 7) descrito pela equação

$$ES = PT - I_a - I \quad (1)$$

em que ES = lâmina de escoamento superficial máximo, mm; PT = precipitação total, mm; I_a = abstrações iniciais, mm; e I = infiltração acumulada, mm.

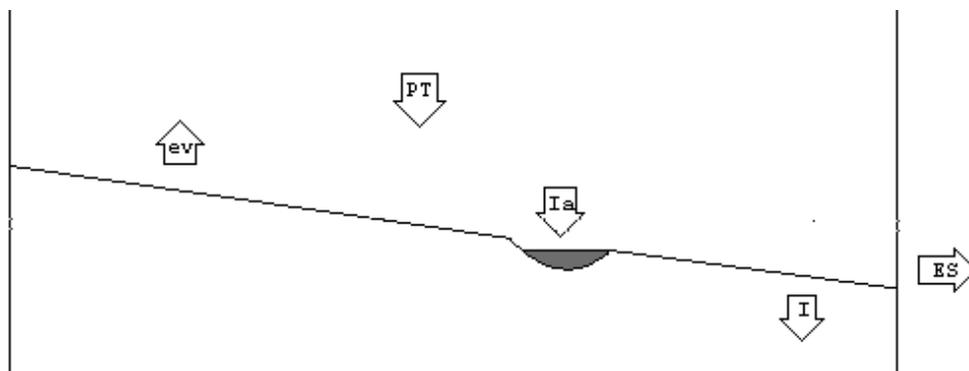


Figura 6 – Componentes do Método do Balanço de Água na Superfície do Solo.

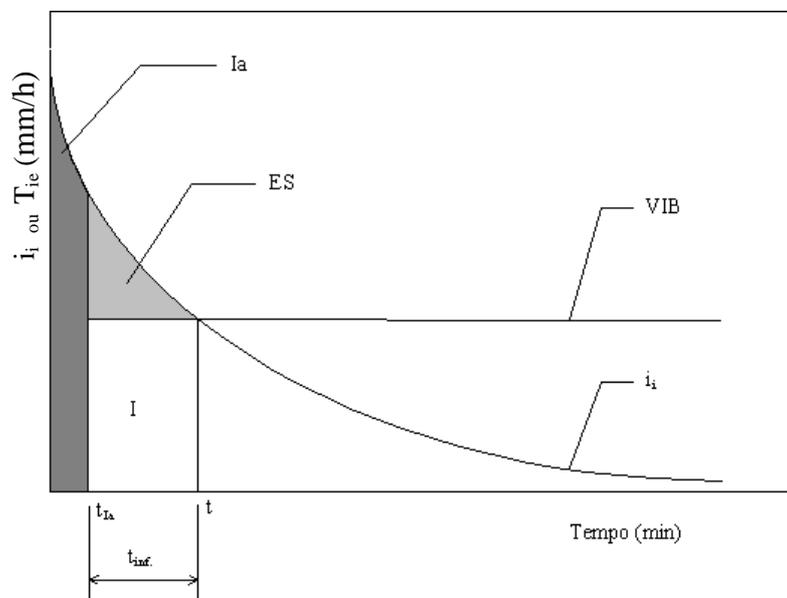


Figura 7 – Representação esquemática dos componentes associados ao método proposto por Pruski et al. (1997), considerando o aumento das abstrações iniciais.

A precipitação total, correspondente a uma duração t (min), é obtida pela equação

$$PT = \frac{i_m t}{60} \quad (2)$$

em que i_m é a intensidade máxima média de precipitação, mm h^{-1} .

Para a obtenção de i_m utiliza-se a equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação, expressa por

$$i_m = \frac{K T^a}{(t + b^c)} \quad (3)$$

Substituindo a equação 3 na equação 2 e derivando em relação ao tempo obtém-se a intensidade de precipitação instantânea (i_i) no instante t .

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{c t}{t + b} \right) \quad (4)$$

O escoamento superficial máximo é aquele correspondente ao instante em que i_i se torna igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}). Para essa condição, têm-se

$$i_m \left(1 - \frac{c t}{t + b} \right) - T_{ie} = 0 \quad (5)$$

O valor de t correspondente ao escoamento superficial máximo é obtido pelo método de Newton-Raphson. Para esta duração pode-se calcular a precipitação total pela equação 2 e as abstrações iniciais (I_a) podem ser calculadas pela equação proposta no Método do Número da Curva e representada por

$$I_a = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad (6)$$

em que CN é o número da curva, cujo valor pode variar entre 1 e 100, e depende do uso e manejo da terra, grupo de solo, condição hidrológica e umidade antecedente do solo.

Na determinação do CN é empregado o critério recomendado pelo Soil Conservation Service - SCS-USDA. Como a taxa de infiltração aproxima-se da T_{ie} , considera-se que a umidade do solo, no momento de ocorrência da precipitação de projeto, é a correspondente a AMC III, ou seja, a precipitação acumulada nos cinco dias anteriores à precipitação estudada é igual ou maior que 52,5 mm.

O tempo correspondente à ocorrência das abstrações iniciais é obtido pela equação

$$\int_0^{t_{ia}} i_i dt = I_a \quad (7)$$

em que t_{ia} é o intervalo de tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial, min.

Substituindo a equação 4 na equação 7 e integrando-a tem-se

$$\frac{1}{60} \frac{K T^a t_{ia}}{(t_{ia} + b)^c} = I_a \quad (8)$$

Para a resolução da equação 8 deve ser utilizado o método de convergência de Newton – Raphson.

A infiltração ocorrida durante o tempo correspondente às abstrações iniciais não é considerada no cálculo da infiltração acumulada, uma vez que está incluída no valor de I_a . A infiltração acumulada (I) é calculada pela equação

$$I = \frac{T_{ie} t_{inf}}{60} \quad (9)$$

em que $t_{inf} = t - t_{ia}$ é a duração da infiltração, min.

Uma vez determinados os valores de PT , I_a e I para a duração da precipitação obtida pela equação 5 obtém-se o valor de ES pela equação 1.

O cálculo do espaçamento horizontal entre terraços é feito pela equação

$$EH = \frac{VUT}{ES} \quad (10)$$

em que EH = espaçamento horizontal entre terraços, m; e VUT = volume unitário de armazenamento pelo terraço, $m^3 m^{-1}$.

4.2.1.3. Metodologia para o dimensionamento de “barraginhas”

Uma vez determinada a lâmina de escoamento superficial, conforme o procedimento descrito anteriormente, e quantificada a área de contribuição para a barraginha pelo projetista, o seu dimensionamento é feito conforme descrito a seguir. As formas consideradas são a semicircular e a retangular (Figuras 8 e 9).

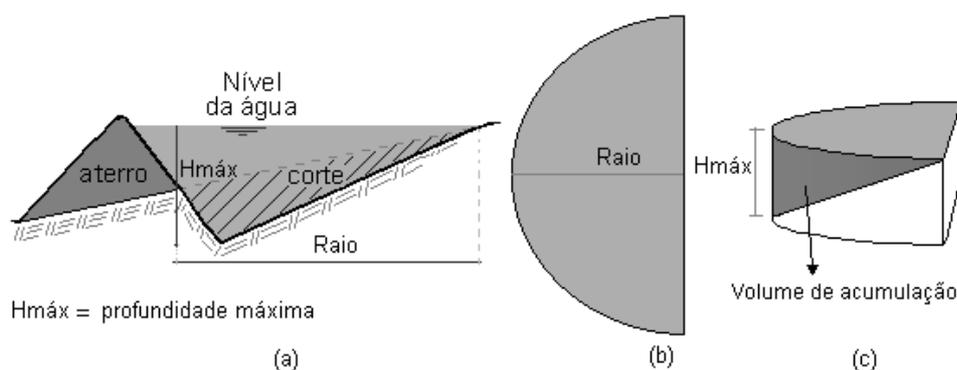


Figura 8 – Representação esquemática da bacia de acumulação com formato semicircular, indicando a vista lateral na seção central (a), em planta (b) e em perspectiva (c).

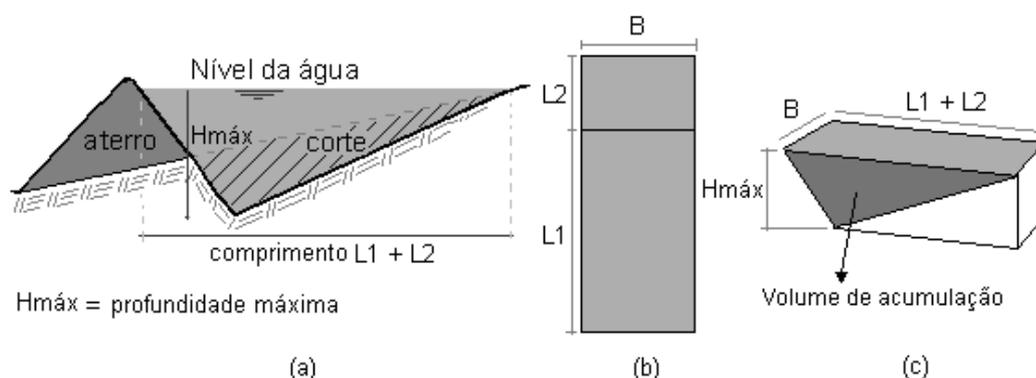


Figura 9 – Representação esquemática da bacia de acumulação com formato retangular, indicando a vista lateral (a), em planta (b) e em perspectiva (c).

Para o dimensionamento das bacias, considera-se a profundidade máxima (H_{max}) como dado a ser fornecido pelo técnico, sendo o raio para a bacia semicircular calculado pela equação

$$R = \sqrt{\frac{4V}{\pi H_{\text{máx}}}} \quad (11)$$

em que R = raio da bacia de acumulação semicircular, m; V = volume de acumulação, m³; e H_{máx} = profundidade máxima de água a ser acumulada na bacia, m.

Para as bacias retangulares o cálculo da largura é realizado pela equação

$$B = \frac{2V}{H_{\text{máx}} L} \quad (12)$$

em que B = largura da bacia de acumulação, m; e L = comprimento da bacia de acumulação, m.

O volume a ser acumulado pela barraginha é obtido pelo produto da lamina máxima de escoamento superficial pela área de contribuição de escoamento para a barraginha, a ser definida pelo projetista.

3.2.1.4. Procedimento para otimizar a locação de sistemas de terraceamento

Tendo em vista a importância que representa o planejamento integrado para a adequada conservação de água e solo desenvolveu-se um modelo, disponível no software Terraço 2.0, que utiliza imagens geradas em Sistemas de Informações Geográficas para o dimensionamento e a locação de sistemas de terraceamento em nível.

Visando a otimização do modelo desenvolvido para a locação de sistemas de terraceamento aos avanços ocorridos desde que foi gerado, em 1997, procedeu-se a adequação do modelo computacional visando, inclusive, possibilitar o seu uso com imagens obtidas tanto com o sistema de posicionamento global como com formatos de uso comum em sistemas de informações geográficas e ainda não contemplados.

No desenvolvimento do Terraço 4.0 diversas ferramentas foram implementadas com o intuito de atender o máximo de entradas definidas pelo usuário. As ferramentas de visualização de imagens passaram a trabalhar com novos formatos de arquivos, gerados pelos softwares ArcView, Surfer e Idrisi. Os

arquivos digitais constituem a base de dados para a locação do sistema de terraceamento em nível.

O ArcView gera os arquivos "flt" e "asc", que são arquivos do tipo raster (matricial). O primeiro, com formato binário, está relacionado a um arquivo de cabeçalho "hdr", contendo informações sobre a imagem armazenada no "flt". O segundo, com formato texto, contém um cabeçalho semelhante ao do arquivo "hdr", porém no próprio "asc". No cabeçalho constam informações como tipo de arquivo, número de linhas e colunas, valores mínimos e máximos de coordenadas e outros atributos da imagem.

Os arquivos gerados pelo Surfer são "grd", semelhantes ao "asc" gerado pelo ArcView. O Idrisi gera o arquivo "img", que está relacionado com o arquivo de cabeçalho "doc", formatos que assemelham-se ao "flt" e "hdr", respectivamente, gerados pelo ArcView. Algumas dessas ferramentas não possuem todos os requisitos necessários para um funcionamento adequado do Terraço, o que gera inconsistência e, conseqüentemente, inúmeras falhas. Devido a essas ocorrências, e com o conhecimento desses formatos, houve a necessidade de desenvolvimento de um novo modelo, o Terraço 4.1, que atenda aos requisitos de utilização propostos por cada ferramenta.

O Terraço 4.1 ainda encontra-se em desenvolvimento e proporcionará a manipulação dos arquivos gerados por esses softwares pela ferramenta Filtro, que permite atenuar imperfeições provenientes de problemas decorrentes da interpolação da imagem vetorial para a imagem raster, e pela ferramenta Declividade, já que é necessária a existência e manipulação do arquivo imagem relativo à elevação.

O procedimento originalmente utilizado no Terraço 2.0 segue as etapas:

Entrada de dados - constituem em entradas para o software os dados correspondentes ao sistema de terraceamento e o banco de dados fisiográfico. Ao usuário cabe definir a metodologia para o dimensionamento do sistema de terraceamento, o tipo, uso e manejo do solo e o critério para a escolha do tipo de terraço a ser locado. São solicitadas, ainda, as imagens de elevação e declividade da área a ser analisada.

Cálculo da declividade média da bacia ou parcela - tendo em vista o fato do espaçamento entre terraços depender da declividade do terreno, procede-se, a partir da imagem que contém as feições de declividade, o cálculo da média aritmética dos valores contidos nas diferentes células referentes à área de interesse.

Escolha do tipo de terraço a ser locado - uma vez conhecido o valor da declividade média da área de interesse, o software, por meio dos critérios disponíveis para escolha do tipo de terraço, permite selecionar o terraço recomendado para a declividade encontrada, cabendo ao usuário a escolha da metodologia desejada.

Ponto de maior altitude da bacia ou parcela - a locação do sistema de terraceamento é realizada a partir do ponto de cota mais elevada da imagem analisada. Este ponto é obtido pela consulta à imagem de elevação, analisando-se os valores das cotas presentes em todas as células da área em análise e identificando-se a célula que apresenta maior cota.

Consulta ao software Plúvio 2.0 - pela consulta ao Plúvio 2.0 são obtidas informações relativas à equação de chuvas intensas para a localidade de interesse.

Estimativa preliminar do espaçamento vertical entre terraços - de posse do valor da declividade média da área em análise procede-se a estimativa preliminar do espaçamento vertical entre terraços (EV_i).

Locação do terraço em função de EV_i - a cota para início da locação do primeiro terraço na área estudada é obtida subtraindo da cota do pixel de maior altitude da área o valor de EV_i . Nos terraços subseqüentes a cota para início da locação é obtida subtraindo da cota de locação do terraço anterior o valor de EV_i . A locação é realizada utilizando um algoritmo que, a partir do valor da cota obtida para o terraço, realiza uma análise dos valores das cotas das células que estão a sua volta, identificando aquela que mais se aproxima da cota do terraço que está sendo locado.

Identificação da área de influência do terraço - como área de influência de cada terraço é considerada a área situada entre dois terraços adjacentes. Para o primeiro terraço locado e para aqueles localizados nas bordas da área em estudo, a área de influência corresponde àquela isolada por estes, ou situada entre estes e o limite de área a montante. Tendo sido esta área isolada, procede-se o cálculo da declividade apenas na área de influência do terraço.

Cálculo da declividade média na área de influência do terraço - o procedimento comumente utilizado para o dimensionamento de sistemas de terraceamento considera a declividade média de toda a área a ser terraceada, não levando em consideração as variações espaciais naturais do terreno. Como a declividade do terreno é utilizada em praticamente todos os procedimentos para cálculo do espaçamento vertical entre terraços, é importante que a sua

determinação permita uma boa estimativa do valor real. Nesse sentido, a fim de considerar as variações da declividade ao longo da área estudada, recalcula-se a declividade média na área de influência de cada terraço. Para o cálculo da declividade na área de influência do terraço, esta área é isolada considerando como limites os terraços ou as bordas da imagem que limitam esta área.

Estimativa final do espaçamento vertical entre terraços - com o valor da declividade média da área de influência do terraço procede-se o cálculo do espaçamento vertical (EV_f) que é efetivamente utilizado para a locação do terraço.

Relocação do terraço em função de EV_f - possuindo-se o valor de EV_f , procede-se a relocação dos terraços utilizando o mesmo procedimento já descrito.

Verificação da existência de terraços órfãos - devido à variação da topografia e à possibilidade de ocorrer o isolamento de regiões a partir da locação de um dado terraço em uma mesma bacia hidrográfica ou parcela, é necessária a verificação da existência destas regiões e da necessidade de locação de terraços nelas, sendo estes designados como terraços órfãos.

Para a verificação da existência dessas regiões e da necessidade de locação de terraços órfãos, procedem-se as operações:

- soma-se ao último terraço locado o valor de EV_f , obtendo-se a cota correspondente ao terraço anterior;
- realiza-se a procura, na área de influência do último terraço locado, de valor de cota correspondente à cota do terraço anterior;
- a identificação de uma célula com valor de cota igual à cota do terraço anterior representa a existência de um terraço órfão; e
- verifica-se, quando da existência de célula com valor de cota igual à cota do terraço anterior, a sua proximidade com relação aos terraços já locados. A locação do terraço órfão só é necessária quando a célula com o valor da cota se encontrar suficientemente afastada de algum outro terraço.

Este procedimento é repetido para cada terraço locado, inclusive para procurar outros terraços órfãos na área de influência do próprio terraço órfão locado.

Verificação do final da locação - tendo em vista que a locação inicia a partir do ponto de maior cota da área ou parcela, o final da locação é observado quando subtraindo o valor de EV_i da cota do último terraço locado não forem mais encontrados valores de cota que permitissem a locação. Isso indica que a região restante não comporta mais um terraço, sendo então considerado o final da locação na área em análise.

O procedimento descrito e utilizado pelo Terraço 2.0 apresenta, entretanto, algumas inconsistências e limitações quando da ocorrência de regiões que exigem a locação de terraços órfãos, o que faz o software abortar a execução. Para superar esta dificuldade está sendo desenvolvido um novo método que permite a separação de áreas, representadas por um arquivo imagem, com cotas superiores a um valor pré-definido.

O método em desenvolvimento considera como dados de entrada o espaçamento vertical inicial, calculado utilizando a declividade média da área total, obtida pela média das declividades de cada pixel da área (Figura 10), e o arquivo imagem que representa a elevação da área (Figura 11). Com estes dados separa-se as cotas superiores à cota máxima subtraída do espaçamento vertical inicial encontrado utilizando as equações disponíveis para o cálculo do espaçamento entre terraços, gerando uma nova imagem (Figura 12). Com a imagem obtida é calculado o espaçamento vertical final, utilizando a sua declividade média. A partir de então são separadas da imagem inicial todas as cotas superiores à cota de corte, que é a cota máxima subtraída do espaçamento vertical final, e o processo continua para a área restante da imagem até que toda a área seja processada. Nas Figuras 12a e 12b são apresentadas duas iterações do processo aplicado à área mostrada na Figura 11, iniciando pela cota máxima e utilizando um espaçamento vertical arbitrário de 2 m.

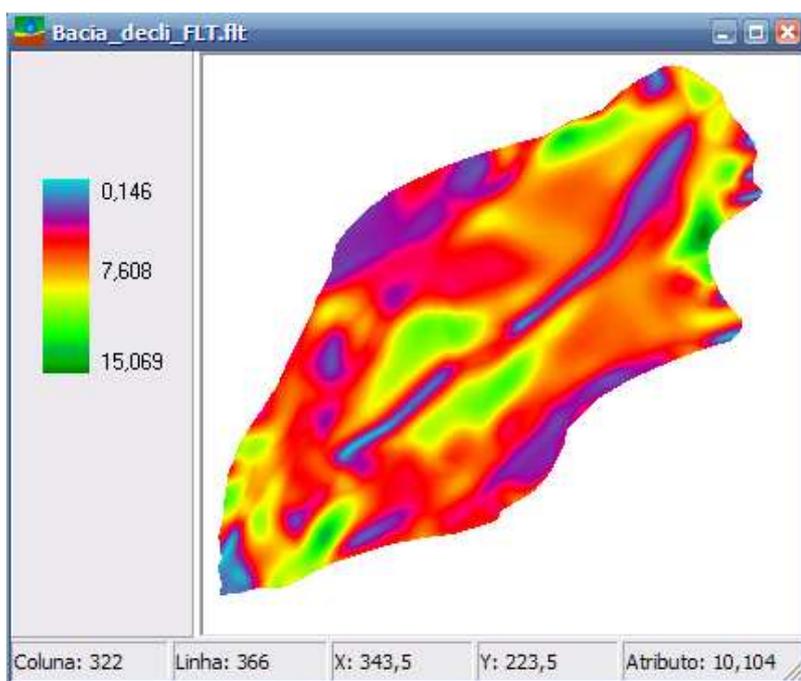


Figura 10 – Imagem que representa a declividade de cada pixel da área.

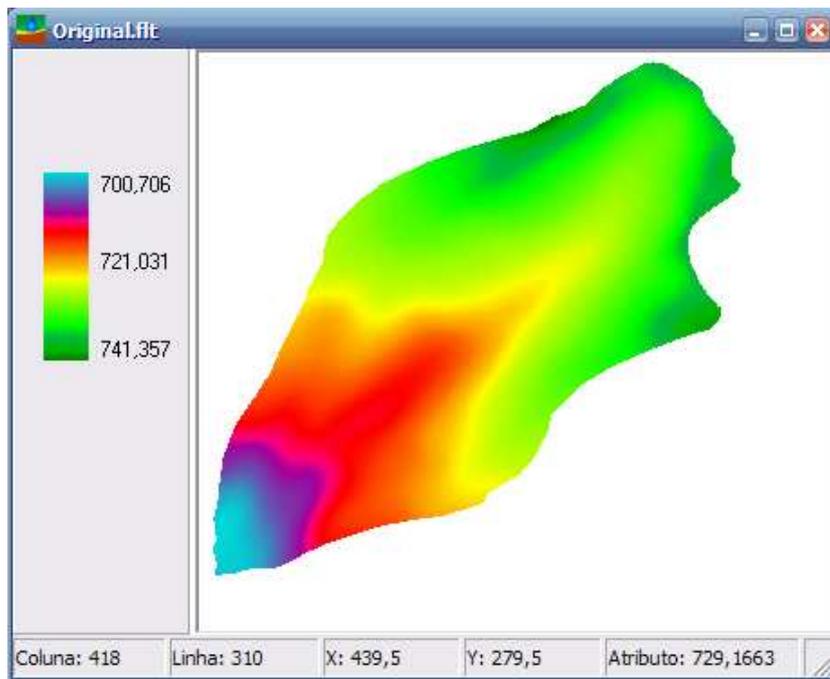


Figura 11 – Imagem que representa a elevação da área.

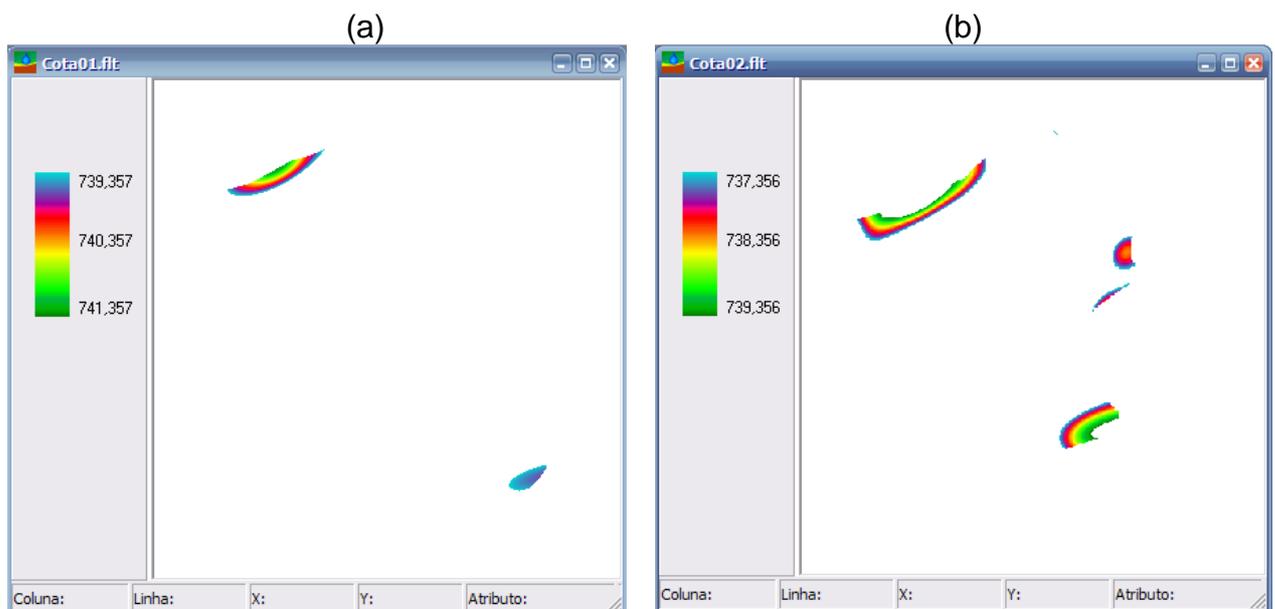


Figura 12 – Primeira iteração do processo aplicado à área total (a); e segunda iteração do processo aplicado à área restante após a primeira iteração (b), ambas utilizando o espaçamento vertical arbitrário de 2m.

4.2.1.5. Metodologia para o dimensionamento de sistemas de terraceamento do tipo misto

Terraços mistos são aqueles construídos em nível e em que o escoamento da água para as áreas externas somente inicia a partir do momento em que a água atinge um determinado nível. São terraços que, portanto, até certo volume de escoamento superficial funcionam como terraços de retenção, garantindo o acúmulo

e infiltração de água no solo. A partir deste volume de escoamento superficial retido é que começam a trabalhar como terraços com gradiente, promovendo o escoamento do excedente de escoamento superficial para fora da área de interesse. Para os eventos com menores escoamentos superficiais os terraços mistos garantirão a infiltração de todo o volume escoado, sendo eliminado apenas o escoamento provindo de eventos extremos, quando a retenção do excesso de escoamento superficial poderia vir a colocar em risco as estruturas hidráulicas. Este sistema permite, portanto, assegurar as vantagens relativas aos sistemas de terraceamento em nível sem, contudo, apresentar os riscos associados a este sistema. Apresenta, entretanto, como limitações para o seu uso a dificuldade de dimensionamento e locação (quando o canal escoadouro é um conduto livre) ou o alto custo de implantação (quando o escoadouro é um conduto forçado). Visando potencializar o uso deste tipo de prática é que se desenvolveu uma metodologia baseada em princípios físico-matemáticos para o dimensionamento de sistemas de terraceamento do tipo misto.

O dimensionamento dos sistemas de terraceamento misto foi feito com base no traçado do hidrograma de escoamento superficial, realizado partindo-se do princípio que a vazão aumenta até o momento em que a contribuição advinda do ponto mais remoto atinge a seção considerada. A partir de então a vazão decresce com o tempo. Desta forma, são identificados dois trechos distintos no traçado do hidrograma de escoamento superficial (Figura 13): trecho ascendente: há um crescimento da vazão com o tempo em virtude do aumento da área de contribuição para o escoamento superficial até a célula considerada; e trecho descendente: a vazão decresce com o tempo, começando no momento que a água advinda da célula mais remota atinge a célula considerada.

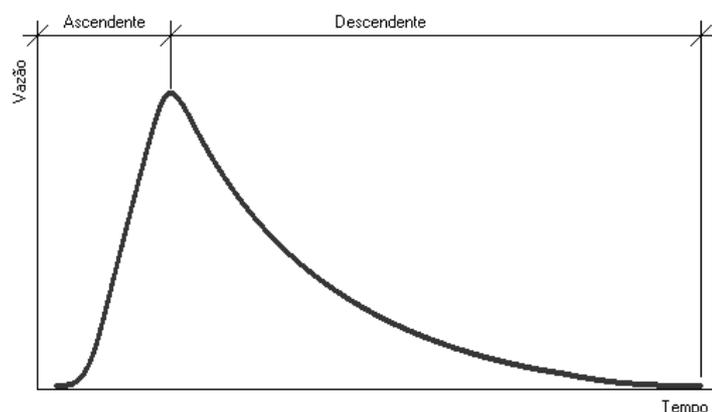


Figura 13 – Representação gráfica de um hidrograma de escoamento superficial, visualizando-se os trechos ascendente e descendente.

A divisão da encosta em um sistema matricial permite a análise do escoamento em qualquer posição. Assim, o hidrograma de escoamento superficial pode ser traçado para qualquer posição da encosta ou de canais de terraços ou drenos de superfície. A análise do hidrograma de escoamento superficial foi feita para duas condições: escoamento sobre a superfície da encosta, seguindo a direção do declive (Figura 14a) e escoamento concentrado no canal (Figura 14b).

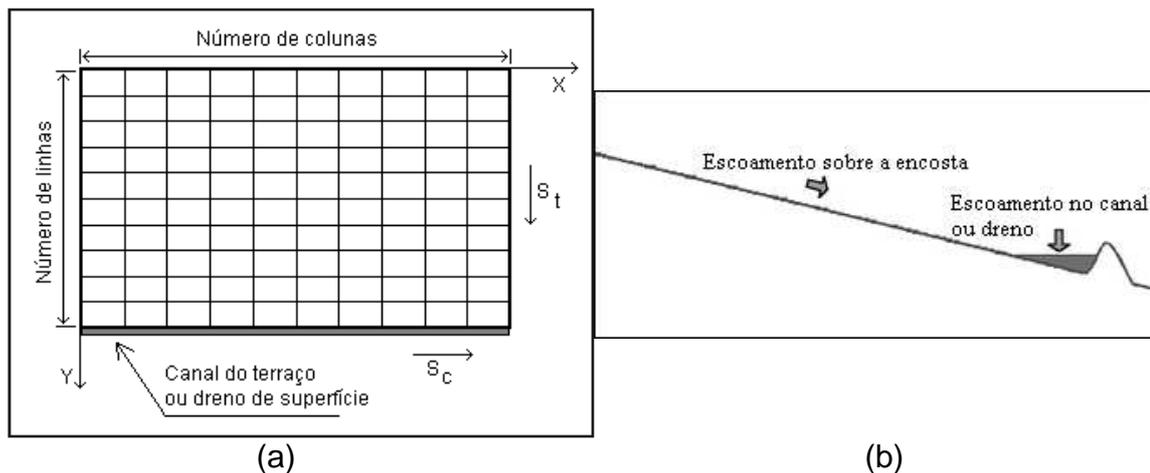


Figura 14 – Representação esquemática da divisão da encosta em um sistema matricial (a) e do escoamento concentrado no canal (b).

Para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial para qualquer posição ao longo da encosta foram utilizadas as duas equações que regem o escoamento gradualmente variado em superfícies livres e que foram estabelecidas em 1871 por Saint-Venant, traduzindo os princípios físicos da conservação da massa (continuidade) e da quantidade de movimento (dinâmica) (Silva, 1996). O modelo de ondas cinemáticas, uma simplificação das equações de Saint-Venant, pode ser expresso por (Muñoz-Carrera & Parsons, 1999):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T_{ie} \quad (13)$$

$$S_0 = S_f \quad (14)$$

em que h = profundidade do escoamento, L; t = tempo, T; q = vazão por unidade de largura na direção do escoamento, L² T⁻¹; x = coordenadas retangulares, L; i_i = intensidade instantânea de precipitação, L T⁻¹; T_{ie} = taxa de infiltração estável, L T⁻¹; S_0 = declividade da superfície do solo, L L⁻¹; e S_f = declividade da linha de energia, L L⁻¹.

O modelo de ondas cinemáticas, ao considerar $S_f = S_o$, assume uma seção transversal média de escoamento. Com a utilização de equações tipicamente usadas para condições de regime uniforme, obteve-se a relação entre a vazão e a profundidade de escoamento expressa por:

$$q = \alpha h^\beta \quad (15)$$

Os parâmetros α e β são obtidos utilizando a equação de Manning, podendo ser expressos como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_o}}{n} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{5}{3} \quad (16)$$

em que n é o coeficiente de rugosidade do terreno, $T L^{-1/3}$.

A equação 12 foi resolvida utilizando o método de diferenças finitas segundo o algoritmo proposto por Braz (1990) e o valor da profundidade do escoamento calculada foi transformado em vazão pela equação 15, sendo a intensidade de precipitação instantânea obtida pela equação 3.

A modelagem do escoamento superficial no canal foi realizada utilizando o modelo de ondas cinemáticas (equação 13) adaptado para o escoamento em condições de canais:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (17)$$

em que A = seção transversal do escoamento, L^2 ; Q = vazão total do escoamento no canal, $L^3 T^{-1}$; e q = vazão por unidade de largura proveniente da encosta, $L^2 T^{-1}$.

A vazão total do escoamento no canal foi obtida utilizando-se a equação de Manning, expressa por

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_c^{1/2} \quad (18)$$

em que n = coeficiente de rugosidade do canal, $L^{-1/3}$; T ; R_h = raio hidráulico, L ; e S_c = declividade longitudinal do canal, $L L^{-1}$.

A equação 17 é resolvida utilizando o método de diferenças finitas segundo o algoritmo proposto por Braz (1990) e o valor da área transversal do escoamento calculada é transformado em vazão pela equação 18.

Para o dimensionamento do sistema de terraceamento misto foi considerado que até que seja atingida a capacidade de armazenamento dos terraços todo o volume escoado será retido nos terraços, começando o escoamento na sua extremidade a partir de então, e sendo este quantificado pelas equações 17 e 18.

A determinação da capacidade de armazenamento dos terraços foi feita considerando como parâmetro de referência o período de retorno do evento. A capacidade de armazenamento é determinada de acordo com hidrogramas traçados para eventos com período de retorno igual a 10 anos. Para os eventos com período de retorno superior a 10 anos são traçados dois hidrogramas, um correspondente ao período de retorno de 10 anos e outro ao período de retorno determinado pelo usuário. Os hidrogramas são sobrepostos (Figura 15) e o valor da diferença entre o volume total escoado para cada um deles corresponde ao excedente do escoamento que deve ser transportado às extremidades do canal. A linha vertical caracteriza o tempo para o qual o volume escoado é igual ao volume total escoado correspondente ao período de retorno de 10 anos.

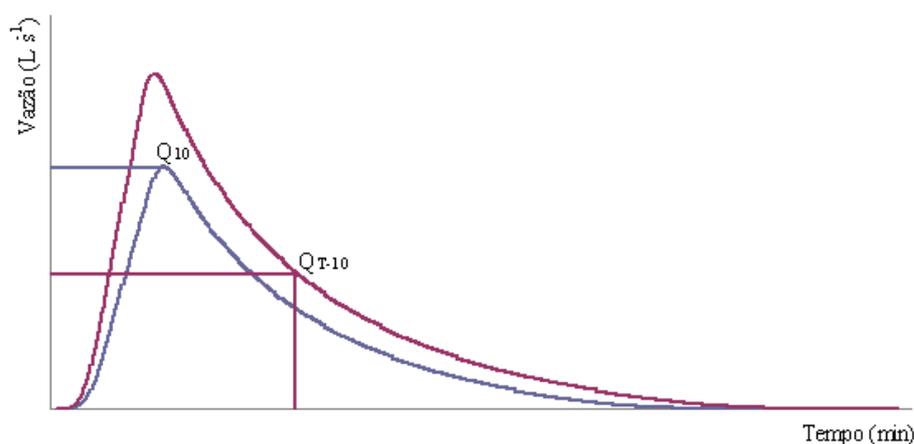


Figura 15 – Representação gráfica de hidrogramas de escoamento superficial para tempos de retorno igual e superior a 10 anos.

Para conter e transportar o volume excedente do escoamento é calculado, através da equação 19, resolvida pelo método de Newton-Raphson, o valor de ΔH ,

que corresponde a um acréscimo no valor da altura do escoamento no canal (Figura 16).

$$\frac{Qn}{\sqrt{I}} = \frac{\Delta A}{\Delta \rho}^{\frac{5}{3}} \quad (19)$$

$$I = \frac{\Delta H}{L/2} \quad (20)$$

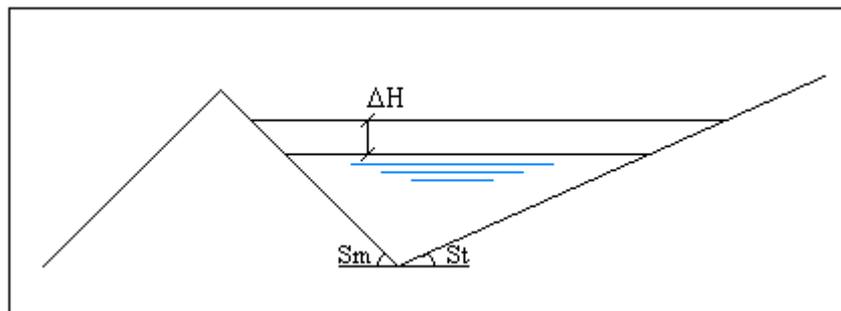


Figura 16 – Representação da seção transversal do terraço.

O dimensionamento e a adequação do canal escoadouro são feitos utilizando o procedimento já disponível no software Canal (www.ufv.br/dea/gprh/canal) (Figura 17), que foi desenvolvido visando o dimensionamento de condutos livres, tanto com seção regular como irregular. Para tanto deve ser procedido o ajuste, trecho a trecho, visando a combinação das variáveis que condicionam o processo de escoamento em condutos livres a fim de assegurar que estas não acarretem a sua erosão.

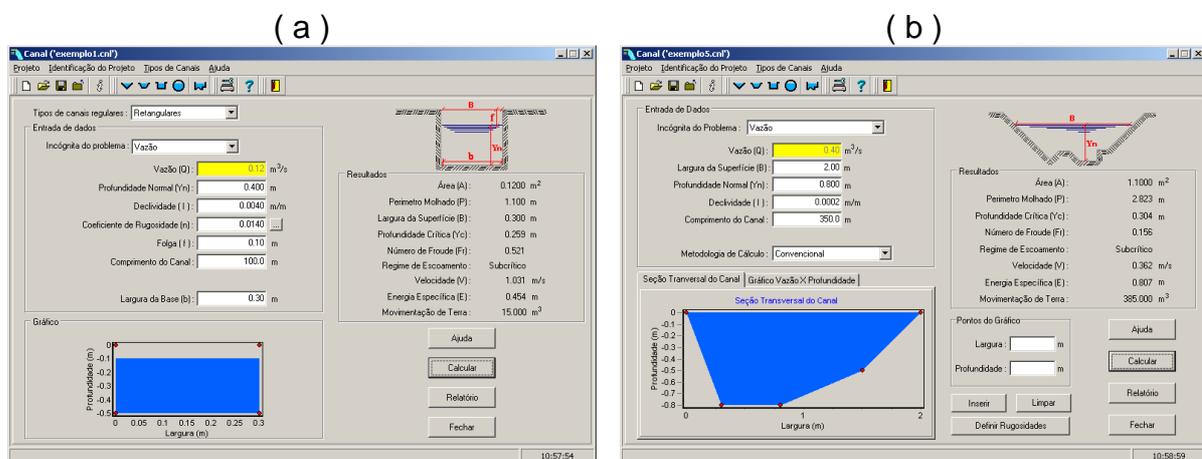


Figura 17 – Telas relativas ao software Canal: dimensionamento de canal trapezoidal (a); e dimensionamento de canal com seção irregular (b).

Para fins de comparação do sistema de terraceamento misto com os sistemas de retenção e de drenagem, foi realizado um estudo de caso considerando as condições de precipitação do município de Uberlândia, em uma área com 100 m de comprimento de rampa, declividade de 7%, solo sem preparo, rugosidade igual a 0,120 e taxa de infiltração básica do solo igual a 15 mm h⁻¹. Para o canal, considerou-se o revestimento de grama e algumas ervas daninhas, rugosidade igual a 0,03, declividade de 0,1% e comprimento igual a 1000 m.

O dimensionamento dos terraços de retenção e de drenagem foi feito utilizando o software Terraço 4.0, considerando terraços de seção uniforme.

4.2.2. Estradas

A realização do presente projeto propiciou a incorporação ao software Estradas de procedimentos que permitem a consideração da variação da declividade do canal e do comprimento da área de contribuição ao longo da estrada.

No modelo para obtenção do espaçamento entre desaguadouros inicialmente determina-se as condições de escoamento no canal de drenagem da estrada e, posteriormente, a capacidade do solo em resistir ao desprendimento de partículas provocado pelo escoamento. O sistema para armazenamento do escoamento superficial é determinado a partir do espaçamento máximo entre desaguadouros e do estabelecimento da lâmina e do volume de escoamento para este comprimento.

Para a determinação do espaçamento entre desaguadouros é necessária a obtenção do hidrograma de escoamento no canal e, a partir da associação deste com as características de resistência do solo à erosão é feita a quantificação da perda de solo no canal, a qual é comparada a um limite considerado tolerável. Para obtenção do hidrograma no canal é necessária a determinação do hidrograma de escoamento nas encostas referentes à estrada e à área de contribuição externa a esta.

Para determinação do hidrograma, tanto a área de contribuição relativa ao leito da estrada quanto a externa a esta são divididas 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 utilizando as equações de Saint Venant (equações 17 e 18). O hidrograma no canal é obtido acumulando os hidrogramas correspondentes à contribuição de cada linha, sendo as vazões do leito da estrada e da área externa somadas de acordo com a

coincidência dos tempos de chegada do escoamento à célula considerada. A Figura 18 representa a divisão das áreas de contribuição ao escoamento relativas ao leito da estrada e à área externa em linhas e colunas, para a determinação do hidrograma no canal. Nesta figura é representado o esquema relativo a áreas de contribuição regulares, entretanto o presente projeto considera o desenvolvimento de um modelo que contempla tanto irregularidades nas áreas de contribuição como na declividade das áreas de contribuição e do próprio canal de drenagem.

Os hidrogramas resultantes das encostas são obtidos resolvendo as equações 13 e 14 para diferentes intervalos de tempo (Δt), sendo, para cada Δt , obtida a vazão correspondente.

A modelagem do escoamento superficial no canal é realizada utilizando a equação

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r = q_e + q_{sc} \quad (21)$$

em que A = seção transversal molhada pelo escoamento, m^2 ; Q = vazão escoada no canal, $m^3 s^{-1}$; e q_r = vazão resultante por unidade de largura, proveniente do leito da estrada e da área externa de contribuição, $m^2 s^{-1}$; q_e = vazão, por unidade de largura, proveniente da estrada, $m^2 s^{-1}$; e q_{sc} = vazão, por unidade de largura, proveniente da área externa de contribuição, $m^2 s^{-1}$.

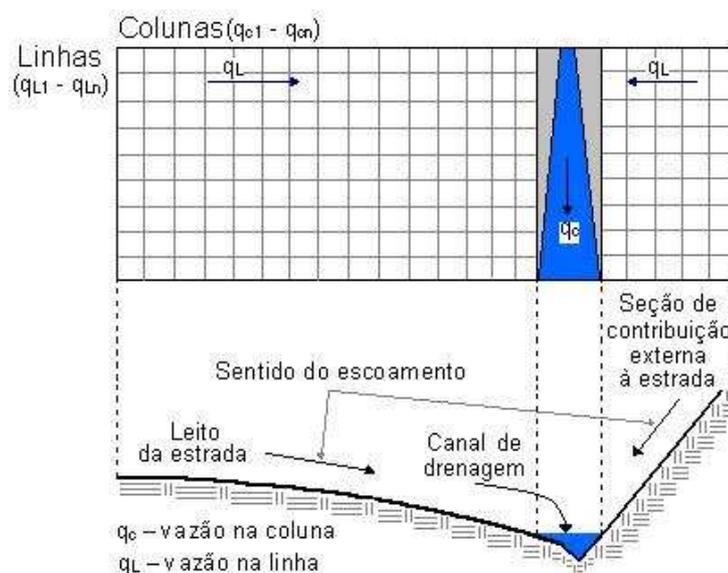


Figura 18 – Subdivisão para determinação do hidrograma no canal de drenagem da estrada.

Considerando que durante o período de manutenção mais de uma precipitação provoque tensão cisalhante acima da tensão crítica, o período de retorno efetivamente considerado no traçado do hidrograma deve ser superior ao período de manutenção da estrada. Por este motivo, estabelece-se um período de retorno, denominado período de retorno equivalente (T_{req}), utilizando a equação

$$T_{req} = K_{T_{req}} T_{ra} \quad (22)$$

em que $K_{T_{req}}$ = coeficiente de majoração aplicado ao período de retorno referente ao período de manutenção considerado, adimensional; e T_{ra} = período de retorno da série anual para manutenção da estrada, anos.

O cálculo de $K_{T_{req}}$ é feito pela equação

$$K_{T_{req}} = \frac{T_{ra}}{T_{rp}} \quad (23)$$

em que T_{rp} corresponde ao período de retorno da série parcial.

Considerando um período de retorno igual a T_{req} (utilizado para determinação do espaçamento entre desaguadouros), as intensidades de precipitação obtidas são mais elevadas do que aquelas obtidas mediante o uso de T_{ra} , o que provoca a redução do espaçamento entre desaguadouros.

A tensão cisalhante associada ao escoamento é calculada pela equação da resistência, expressa por

$$\tau_E = \gamma R_h S \quad (24)$$

em que τ_E = tensão provocada pelo escoamento, kgf m^{-2} ; γ = peso específico da água, kgf m^{-3} ; R_h = raio hidráulico, m; e S = declividade do canal, m m^{-1} .

Tendo em vista que a tensão provocada pelo escoamento em canais não ocorre de maneira uniforme em toda a seção transversal, considera-se apenas a tensão máxima, a qual provoca as maiores perdas de solo. Desta forma, o valor do R_h é substituído, na equação 22, pela profundidade de escoamento, enquanto a

unidade de saída é transformada para Pascal (Pa). A equação resultante, utilizada para calcular a tensão cisalhante, é

$$\tau_E = \frac{\gamma y S}{0,102} \quad (25)$$

em que τ_E = tensão provocada pelo escoamento, Pa; e y = profundidade de escoamento, m.

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, entretanto, 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 e, desta forma, também em suas margens, permitindo, assim, que pequenos danos provocados pela erosão nos canais possam ser facilmente recuperados. Outro aspecto a ser considerado refere-se ao custo de implantação do sistema de drenagem, o qual aumenta para as condições em que as perdas são consideradas nulas. Desta forma, no desenvolvimento deste modelo, considera-se a possibilidade de ocorrência de perdas de solo em limites considerados toleráveis, ou seja, que não representem comprometimento ao tráfego na estrada ao final do intervalo considerado para a realização de manutenção.

Visando a determinação de limites para os quais as perdas de solo devidas à erosão possam ser consideradas toleráveis sob o ponto de vista de trafegabilidade da estrada, estabelece-se um aprofundamento máximo (a_{pm}) tolerável para o canal de drenagem na seção correspondente ao comprimento máximo. Esta seção corresponde ao comprimento final do canal, justamente 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. A perda de solo correspondente ao a_{pm} é determinada pela equação

$$P_{st} = V_s \rho_s \quad (26)$$

em que P_{st} = perda de solo tolerável, g; V_s = volume de solo a ser removido pela erosão, cm^3 ; e ρ_s = massa específica do solo, $g\ cm^{-3}$.

A partir das características do canal e da vazão obtidas e utilizando a equação 23, o hidrograma de escoamento é transformado em um gráfico que indica a variação da tensão cisalhante com o tempo. Para cada intervalo de 1 m de canal obtém-se o perfil de variação da tensão provocada pelo escoamento com o tempo.

Para que ocorra perda de solo, a tensão provocada pelo escoamento deve superar a tensão crítica para cisalhamento do solo. A determinação da perda de solo é feita tomando-se a diferença entre a tensão média associada a cada intervalo de tempo e a tensão crítica de cisalhamento do solo.

A perda de solo corresponde ao somatório das perdas ocorridas em todos os intervalos em que a tensão provocada pelo escoamento supera a tensão crítica para cisalhamento do solo, sendo determinada pela equação

$$PS_e = \sum_{i=1}^{i_2} [(\tau_M - \tau_c) \Delta t K A] \quad (27)$$

em que PS_e = perda de solo provocada pelo escoamento superficial, g; τ_M = tensão média de cisalhamento no intervalo de tempo Δt , Pa; τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo, Pa; Δt = intervalo de tempo, min; K = erodibilidade do solo, $g \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$; e A = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo, cm^2 .

Para identificação do comprimento recomendável entre desaguadouros é feita a determinação da perda de solo para cada comprimento de canal para o qual é determinado o gráfico da variação da tensão cisalhante com o tempo. A perda provocada pelo escoamento é comparada à perda tolerável. A excedência da perda tolerável indica a necessidade da existência de um desaguadouro para o comprimento imediatamente anterior, sendo este o espaçamento recomendável entre desaguadouros.

4.3. Monitoramento dos modelos desenvolvidos

A validação dos modelos depende do acompanhamento e quantificação das respostas do ambiente frente aos eventos climatológicos e antrópicos. Neste sentido, para dar continuidade ao processo de avaliação dos modelos hidrológicos que têm sido desenvolvidos pelo GPRH-DEA/UFV, procedeu-se a ampliação da

estrutura experimental existente, visando a associação das informações obtidas através do uso dos modelos desenvolvidos com as informações obtidas experimentalmente.

4.3.1. Determinação das perdas de solo e de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas simuladas

Para intensificar o processo de aquisição de dados, foram também simuladas chuvas intensas utilizando um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes, conforme modelo desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Laboratory, vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (NSERL/USDA-ARS), construído e adaptado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV).

Os módulos do simulador de chuvas foram montados na área experimental do, localizada no município de Viçosa, em Minas Gerais. Sob cada um deles foram individualizadas quatro parcelas experimentais, as quais foram delimitadas por chapas metálicas com dimensões de 1,0 m de comprimento por 0,7 m de largura, cravadas no solo a 15 cm de profundidade, com a maior dimensão no sentido do declive (Figura 19).

As calhas coletoras do escoamento superficial (Figura 20) foram ligadas a um dispositivo, tipo funil, direcionado no sentido da declividade do terreno, permitindo a condução da água e do solo aos recipientes de coleta.

Para homogeneizar as condições superficiais do solo a área experimental foi preparada com uma aração e duas gradagens. Em seguida foi montada a estrutura para realização dos testes. Entre as aplicações dos perfis de precipitação sobre as parcelas foi feito o revolvimento do solo, a fim de evitar que os efeitos de uma aplicação interferissem nos resultados do teste subsequente.



Figura 19 – Vista parcial da área experimental.

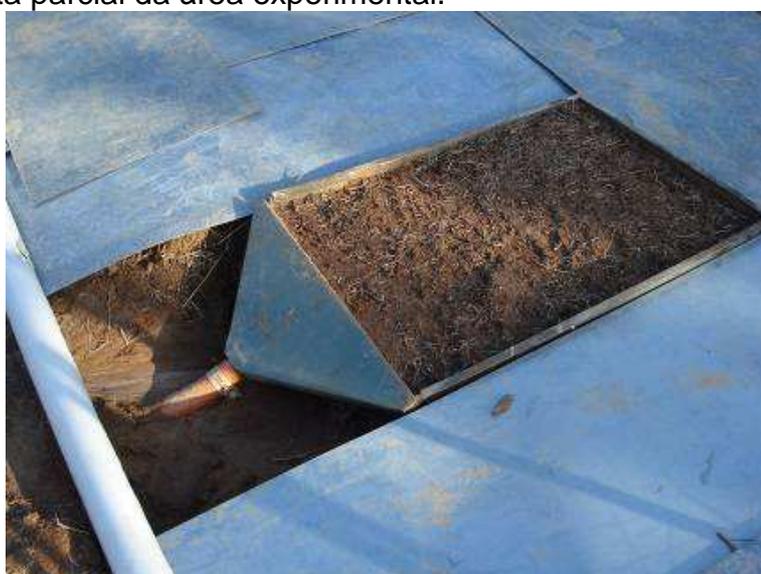


Figura 20 – Estrutura de coleta do escoamento.

A realização do experimento consistiu na aplicação dos tratamentos correspondentes ao baixo teor de água no solo, e após 24 h, de forma aleatória, foram repetidas as aplicações, correspondendo às duas condições de umidade do solo, sendo o mesmo procedimento utilizado para as duas condições de cobertura do solo (solo coberto e solo descoberto) (Figura 21a e 21b). Os perfis de precipitação aplicados em cada parcela foram aleatorizados.

(a)

(b)



Figura 21 – Detalhe das condições de cobertura, solo coberto (a) e solo descoberto (b).

Considerando que cada tratamento corresponde à combinação de perfil de precipitação, condição de cobertura e umidade do solo, estes serão reaplicados por nove vezes, contabilizando a realização de 144 testes. Porém, em decorrência do grande tempo exigido no redesenvolvimento e calibração do simulador de chuvas, além do fato de se ter incorporado nos testes de campo condições correspondentes a duas coberturas, o que duplicou o número de testes necessários, os testes de campo ainda não foram concluídos.

Embora para a avaliação dos modelos desenvolvidos não sejam requeridas informações referidas as perdas de solo, elas também estão sendo quantificadas visando a análise do efeito de diferentes perfis de precipitação nas perdas de solo e água, projeto em andamento no DEA/UFV.

As perdas de solo foram determinadas pela coleta do solo transportado pelo escoamento superficial até a extremidade final da estrutura de coleta, na qual foi instalado um funil onde foi colocada uma manta sintética (Figura 22) para possibilitar a retenção das partículas de solo transportadas durante a realização do teste. A coleta de solo foi realizada de dois em dois minutos, durante os 30 minutos de aplicação do perfil de precipitação. Ao final do teste o solo foi colocado para secar ao ar por aproximadamente dois dias, até atingir a umidade higroscópica, e então foi levado à estufa, a 65° C por um período de 48 horas, para determinar o peso seco do solo.

As perdas de água decorrentes do escoamento superficial foram coletadas em dois reservatórios de acumulação construídos com tubos de PVC, um com 150 mm e outro com 250 mm de diâmetro, sendo o volume total igual a 67 L. No primeiro reservatório foi apoiado o funil com a manta sintética e no segundo foi instalado um

Thalimedes, que permitiu a medição da altura do nível da água em intervalos de um minuto (Figura 22). A lâmina de escoamento superficial foi determinada pela equação 10.



Figura 22 – Estrutura de coleta de água e solo.

4.3.2. Determinação das perdas de solo e de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas naturais

Foram implantadas seis parcelas experimentais na parte inferior de uma encosta localizada próxima ao Laboratório de Mecanização do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (MG) em solo do tipo Cambissolo Háplico Tb distrófico Latossólico, para monitoramento das perdas de solo e de água sob condições de chuvas naturais durante cinco safras agrícolas (2002/2003 a 2006/2007). Cada parcela possuía tipo de preparo e de cobertura do solo diferenciados, contemplando os seguintes tratamentos (Figura 23): SMA - solo cultivado com soja; DMA - solo descoberto; MMA - solo cultivado com milho; MEN - solo cultivado com milho; DEN - solo descoberto; SEM - solo cultivado com soja.

O solo de todas as parcelas foi preparado de forma convencional (uma aração e duas gradagens) no sentido do declive e, quando cultivado, o cultivo também foi feito no sentido do declive.

A cultura do milho foi plantada com espaçamento de 0,80 m x 0,20 m, totalizando uma população de 62.500 plantas ha⁻¹ e a soja com espaçamento de 0,50 m x 0,05 m, totalizando 400.000 plantas ha⁻¹. A adubação foi realizada visando a obtenção de uma produtividade média de 7 t ha⁻¹ e 3 t ha⁻¹ para as culturas do

milho e da soja, respectivamente (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999).

As parcelas experimentais, com declividades médias variando de 15,0 a 19,2%, foram compostas das seguintes partes: i) área de captação da chuva, com dimensão de 3,50 m de largura e 11 m de comprimento, delimitada com chapas galvanizadas de 0,25 m de altura, com aproximadamente 0,10 m enterrados no solo (Figura 23); ii) calha coletora e tubo de PVC instalados na parte inferior da parcela (Figura 23) para condução do escoamento superficial para a estrutura de coleta das perdas de solo e de água; e iii) estrutura de coleta posicionada na extremidade inferior da área experimental, composta por um sistema de filtragem, no qual os sedimentos transportados pelo escoamento superficial eram retidos no filtro (Bidim OP 30) (Figura 24a) e o escoamento superficial era conduzido para uma caixa retangular, construída de chapa de aço galvanizada (Figura 24b). Esta caixa apresentava na sua extremidade final um vertedor triangular, utilizado para a medição da vazão de escoamento superficial, sendo a altura de lâmina vertente registrada por meio do equipamento denominado Thalimedes (Figura 25), em intervalos de um minuto, instalado na própria caixa a uma distância de aproximadamente 0,30 m a montante do vertedor.

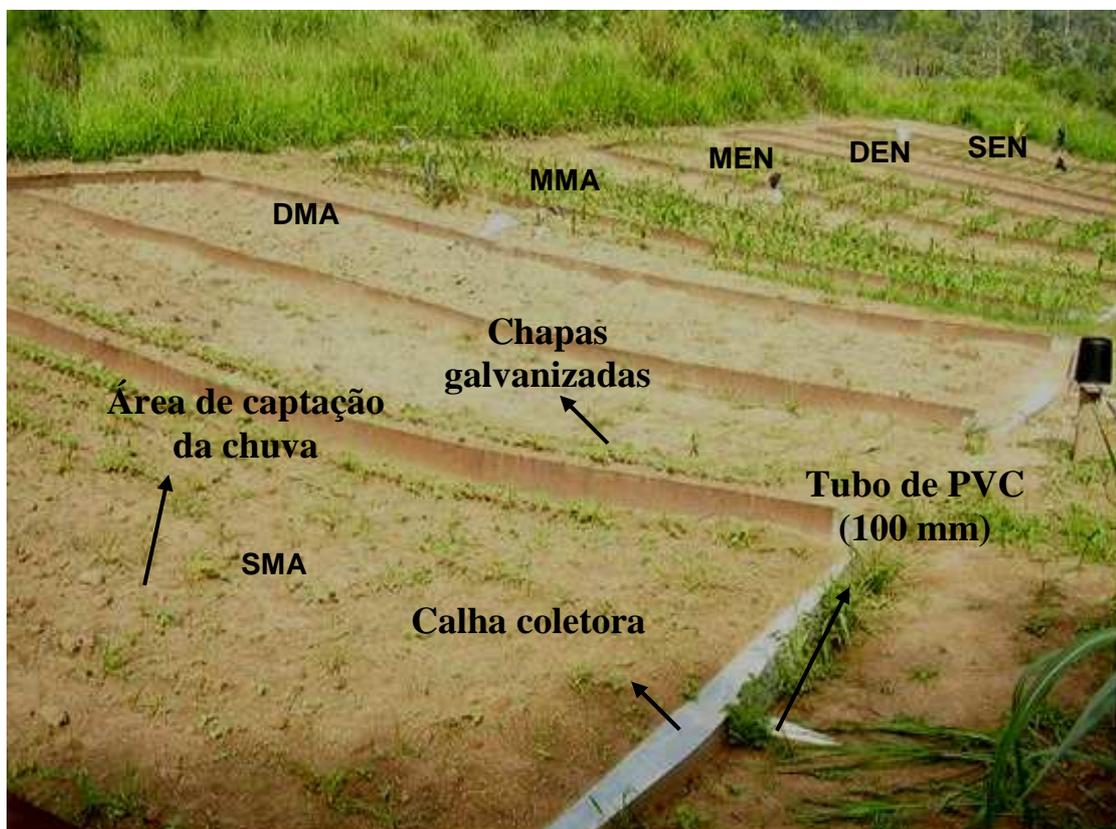


Figura 23 – Parcelas experimentais para monitoramento das perdas de solo e de água sob condições de chuva simulada.

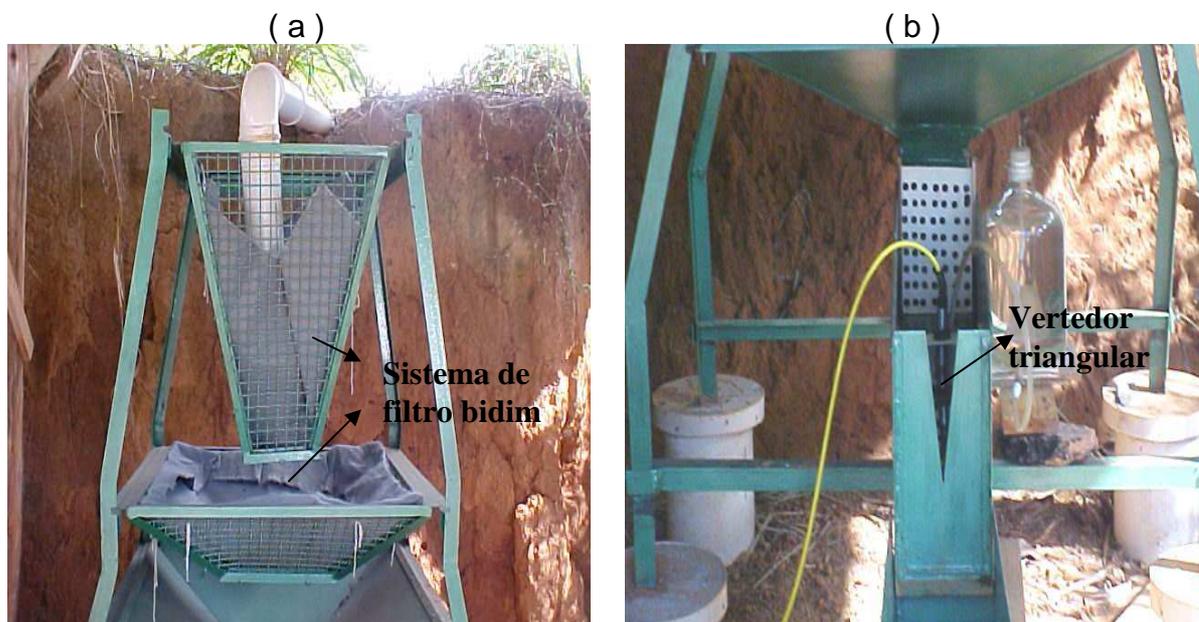


Figura 24 – Fotos relativas ao sistema de coleta de dados para a estimativa das perdas de solo (a) e água (b).



Figura 25 – Detalhes da altura de lâmina vertente obtida por meio do sensor de nível (a) do equipamento Thalimedes (b).

A precipitação total, bem como sua distribuição temporal, foi registrada em pluviógrafo do tipo pulso (Figura 26a) instalado na área experimental, o qual estava conectado a um “Datalogger” (Figura 26b) que armazenava o número de pulsos no coletor a cada dois minutos, permitindo assim a avaliação das perdas de solo e de água em função de diferentes durações e intensidades de precipitação.

(a)

(b)

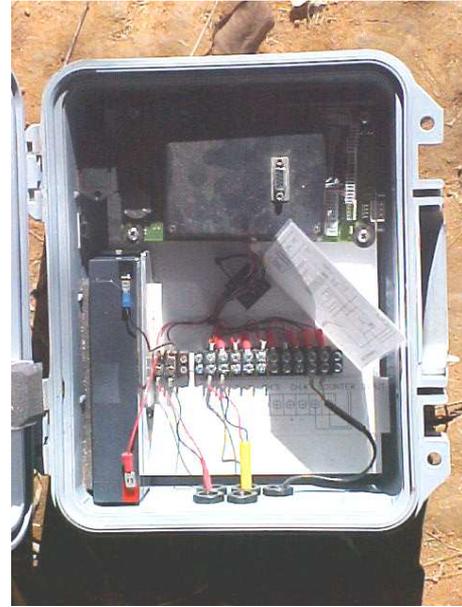


Figura 26 – Pluviógrafo do tipo pulso (a) utilizado na aquisição de dados de precipitação conectado ao “Datalogger” (b).

A lâmina de escoamento superficial foi obtida pela relação entre o volume total escoado e a área da parcela experimental.

$$L_{esc} = \frac{V_{esc}}{A} \quad (28)$$

em que: L_{esc} = lâmina total de escoamento superficial, mm; V_{esc} = volume total de escoamento superficial, L; e A = área da parcela experimental, m^2 .

De posse dos dados de lâmina de escoamento superficial e da lâmina precipitada em cada evento de chuva, obteve-se o coeficiente de escoamento superficial utilizando-se a seguinte equação:

$$C_{esc} = \frac{L_{esc}}{L_{Ppt}} \quad (29)$$

em que: C_{esc} = coeficiente de escoamento superficial, adimensional; e L_{Ppt} = lâmina precipitada, mm.

As perdas de solo foram quantificadas pelo método direto (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990), por meio da coleta dos sedimentos transportados juntamente com o escoamento superficial até a estrutura de coleta, localizada a

jusante de cada parcela experimental. Nesta estrutura de coleta colocou-se uma manta de bidim previamente pesada e identificada, para possibilitar a coleta das partículas de solo transportadas pelo escoamento superficial durante a ocorrência das chuvas.

Cessada a chuva, o bidim com solo era retirado da estrutura de coleta e colocado para secar ao ar, por um período de quatro a cinco dias, para posterior determinação da sua massa seca. No ato da pesagem do solo, o mesmo era homogeneizado e retirado amostras para determinar a umidade residual do solo para, com isso, possibilitar a determinação do peso do solo seco. O restante do solo que ficava no bidim era levado, juntamente com o bidim, para uma estufa de circulação de ar à temperatura de 65°C, por um período de 72 horas, para posterior determinação da massa seca. A quantificação dos sólidos em suspensão que passaram pelo material filtrante foi realizada a partir de uma correlação entre os dados de quantidade de sedimentos retidos e de sedimentos em suspensão obtidos por Pereira (1999). A massa total de solo seco foi obtida por meio do somatório do solo retido no material filtrante e do solo em suspensão que passou pelo filtro.

Como abstração inicial, é considerada a lâmina acumulada do início da precipitação ao início do escoamento superficial. A determinação desse valor é possível a partir da análise comparativa dos registros do pluviógrafo e dos thalimedes utilizados no experimento.

A taxa de infiltração é obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação, medida pelo pluviógrafo, e o valor escoado, medido pelo thalimedes.

A determinação do volume de escoamento superficial é feita a partir da integração do hidrograma registrado pelo thalimedes e a lâmina de escoamento superficial é obtida através da integração dos valores da taxa de infiltração obtidos durante o evento considerado. As perdas de solo são quantificadas utilizando o método direto. A umidade do solo é monitorada continuamente em diferentes profundidades no perfil do terreno através de blocos de resistência elétrica.

Paralelamente à montagem e instalação das parcelas experimentais foram realizadas amostragens de solo para a determinação de parâmetros essenciais à análise das informações obtidas por meio do monitoramento.

Os valores obtidos por intermédio do modelo serão comparados com os encontrados no campo, estabelecendo-se uma correlação linear entre eles. Será efetuada também uma análise do resíduo do conjunto de dados obtidos pelo modelo e pelo experimento utilizando a Soma dos Quadrados do Resíduo, verificando-se a

dispersão ocorrida, o que também mostrará a precisão com que o modelo representa os resultados obtidos pelo experimento. Para verificar a exatidão do modelo físico-matemático será aplicado o teste t para os coeficientes da equação de regressão entre os valores preditos pelo modelo e aqueles observados em campo. Tal teste verificará se o coeficiente linear (a) é igual a zero e se o coeficiente angular (b) é igual a um para o nível de significância de 5%.

A comparação entre os valores obtidos pelos modelos e os obtidos em campo não será apresentada neste relatório em função do reduzido número de testes realizados até o presente momento, o que não permite avaliar de forma consistente o desempenho do modelo.

5. Resultados

5.1. Terraços

5.1.1. Aprimoramento do Terraço

A Figura 27 apresenta a tela de abertura do Terraço 4.0, software que constitui em uma evolução do software Terraço 3.0 ao qual foi inserido o gerador de séries climáticas sintéticas CimaBr 2.0. O software Terraço 4.0 está disponível para download no link <ftp://ftp.ufv.br/dea/gprh/Terraco4/>.



Figura 27 – Tela de abertura do Terraço 4.0.

O Terraço 4.0 permite ao usuário dimensionar e locar sistemas de conservação do solo do tipo terraceamento.

Na Figura 28, visualiza-se a entrada de dados do módulo de dimensionamento de sistemas de conservação do solo do Terraço 4.0, podendo observar a associação com o módulo de dimensionamento de barragens de contenção (campo Barraginha).

Para acessar a geração da série sintética, o usuário deve pressionar o campo **Dupla exponencial** e em seguida o botão **Gerar série sintética**. A utilização da

dupla exponencial como representação do perfil da precipitação também está disponível para o dimensionamento de sistemas de conservação do solo do tipo terraço em nível e terraço em gradiente. Após a geração da série climática sintética, é exibida a série sintética de precipitação (Figura 29). Caso o usuário queira visualizar novamente a série sintética de precipitação, deve pressionar o botão **Exibir perfis de precipitação**.

Para acessar o módulo de dimensionamento de barraginhas, o usuário deve selecionar esta opção no campo Sistema.

No campo Barraginha, o usuário deve selecionar o formato (semicircular ou retangular) e informar a profundidade da barraginha e a área de contribuição do escoamento superficial (Figura 28). Uma vez fornecidos os parâmetros, o usuário deve pressionar o botão Calcular e uma tela contendo os resultados do dimensionamento de uma barraginha é mostrada (Figura 30). Ao usuário é permitido realizar as seguintes simulações: raio versus profundidade; volume versus área de contribuição; volume versus taxa de infiltração e lâmina de escoamento superficial versus taxa de infiltração. O usuário pode pressionar o botão Relatório para gerar um relatório contendo os dados de entrada e os resultados obtidos.

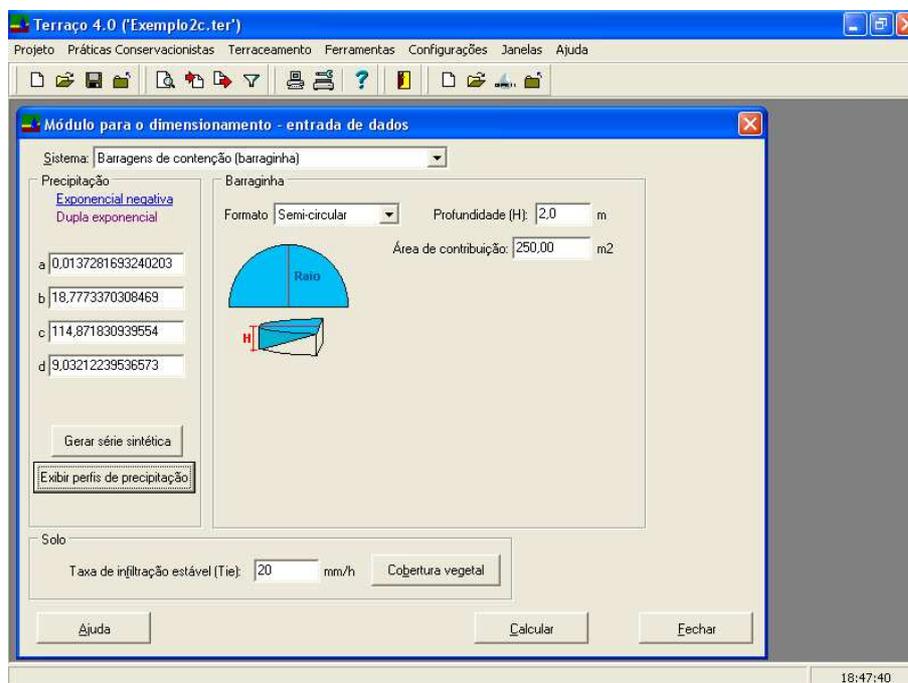


Figura 28 – Tela de entrada de dados do Terraço 4.0 relativo à associação com o gerador de série climática sintética e ao módulo de dimensionamento de barragens de contenção (barraginhas).

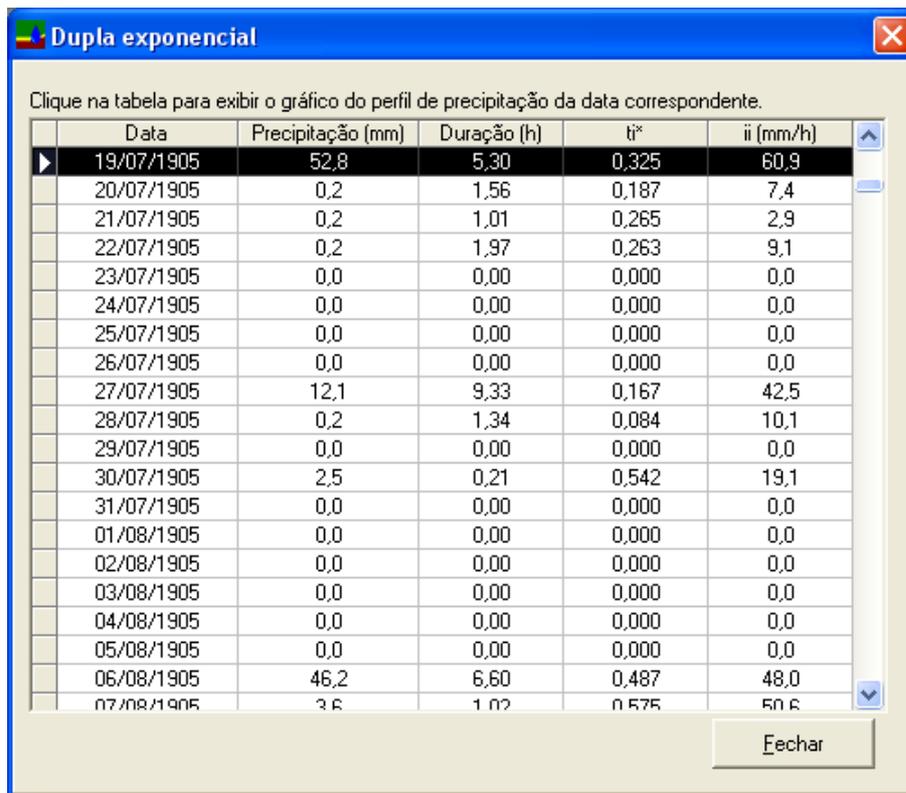


Figura 29 – Visualização da série sintética de precipitação, obtida com o ClimaBr, no Terraço 4.0.

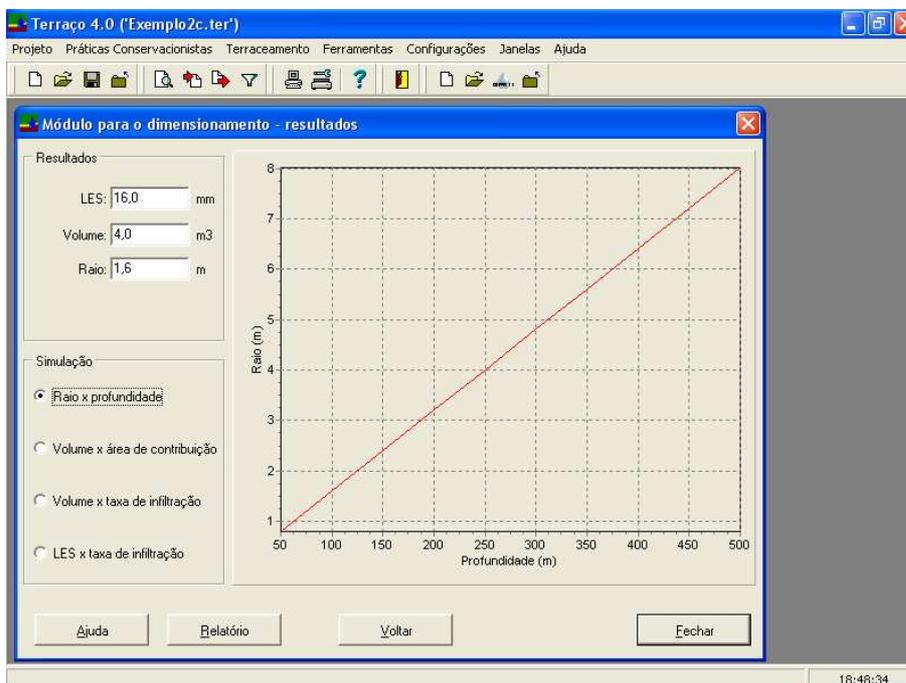


Figura 30 – Tela relativa aos resultados do dimensionamento de uma barraginha e às simulações possíveis.

O cálculo do espaçamento entre terraços a partir da capacidade armazenamento está disponível para terraços em nível. Para tanto, o usuário deve selecionar a opção Terraços em nível (sem drenagem) no campo Sistema (Figura

31). Para acessar o cálculo do espaçamento a partir da capacidade de armazenamento, o usuário deve selecionar a opção Capacidade de armazenamento no campo Espaçamento - Método. Após isto, o usuário deve pressionar o botão Definir. Será exibida uma tela (Figura 32) relativa ao módulo para fornecimento dos parâmetros necessários ao cálculo do espaçamento.

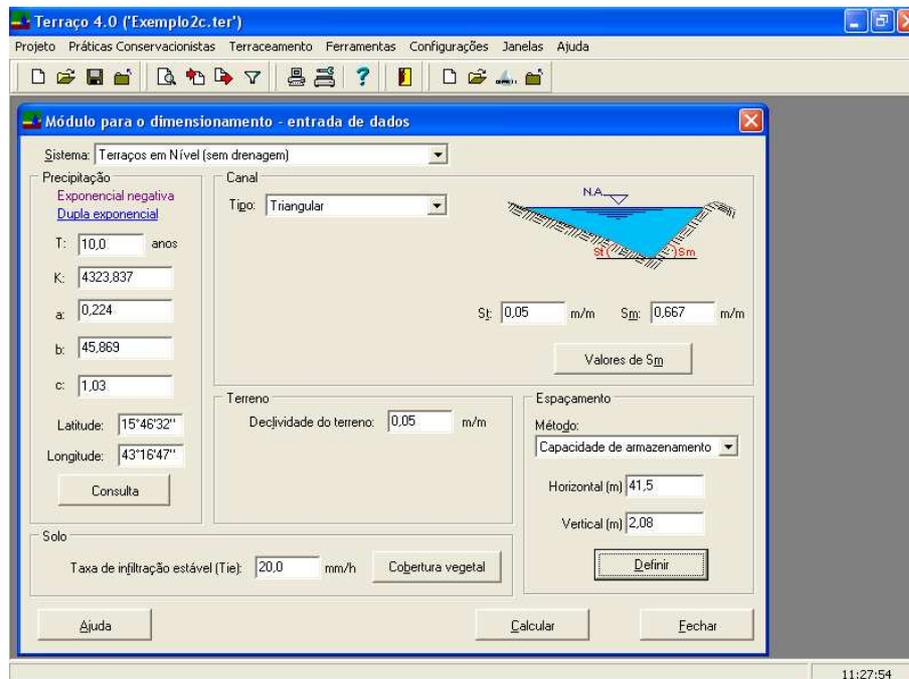


Figura 31 – Tela apresentando módulo para dimensionamento de terraços em nível.

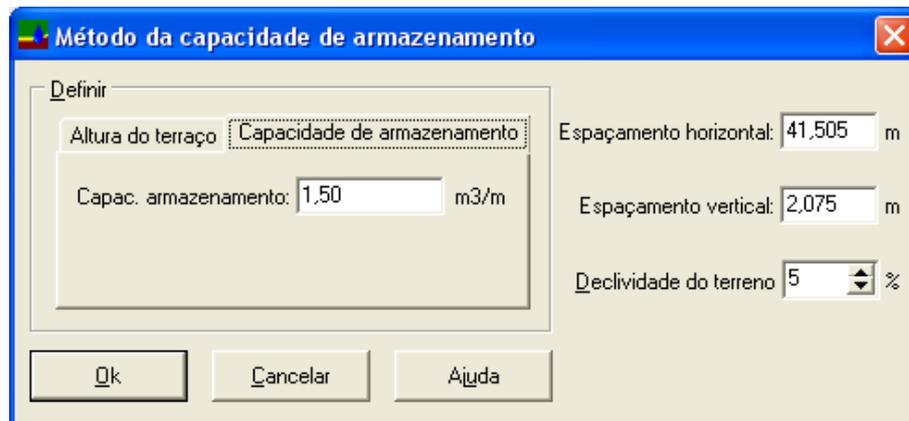


Figura 32 – Módulo para cálculo do espaçamento entre terraços a partir da capacidade armazenamento.

Uma vez definidas as condições, o usuário deve pressionar os botões Ok, para retornar ao módulo de dimensionamento de terraços em nível (Figura 31), e Calcular, para efetuar o dimensionamento do terraço em nível.

Após isto, será mostrada uma tela contendo o resultado do dimensionamento (Figura 33). O usuário pode visualizar e imprimir um relatório contendo os dados de entrada e os resultados (Figura 34) pressionando o botão Relatório.

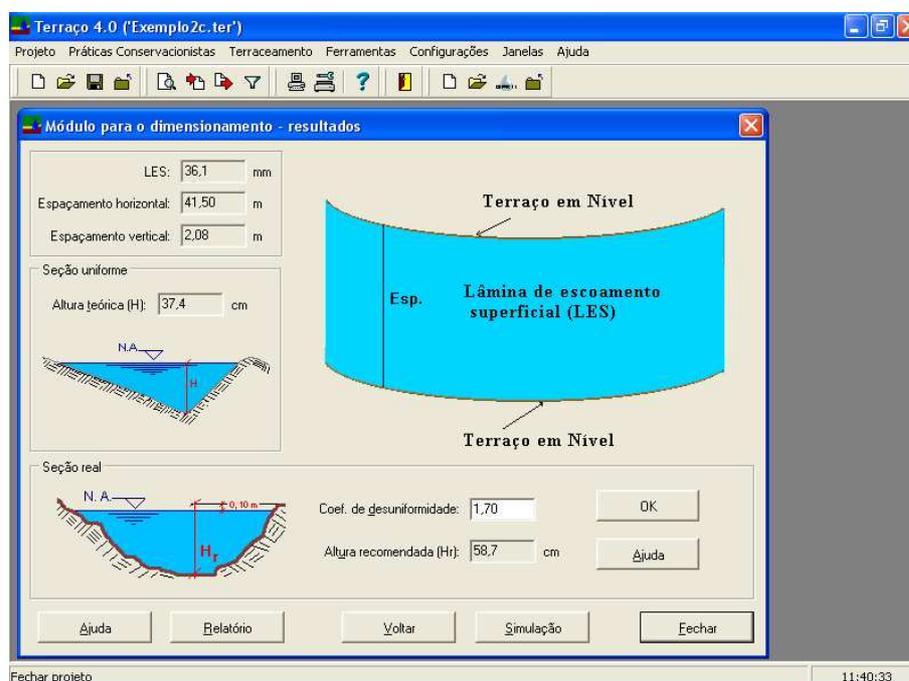


Figura 33 – Tela referente ao resultado de dimensionamento de terraços em nível.



Figura 34 – Tela referente a parte do relatório gerado pelo Terraço 4.0.

5.1.2. Terraceamento do tipo misto

Na Figura 35 são apresentados os hidrogramas de escoamento superficial obtidos para períodos de retorno iguais a 10, 20, 30 e 50 anos para as condições

correspondentes ao estudo de caso realizado. As linhas verticais caracterizam para cada período de retorno considerado, o tempo para o qual o volume escoado é igual ao volume total escoado correspondente ao período de retorno de 10 anos.

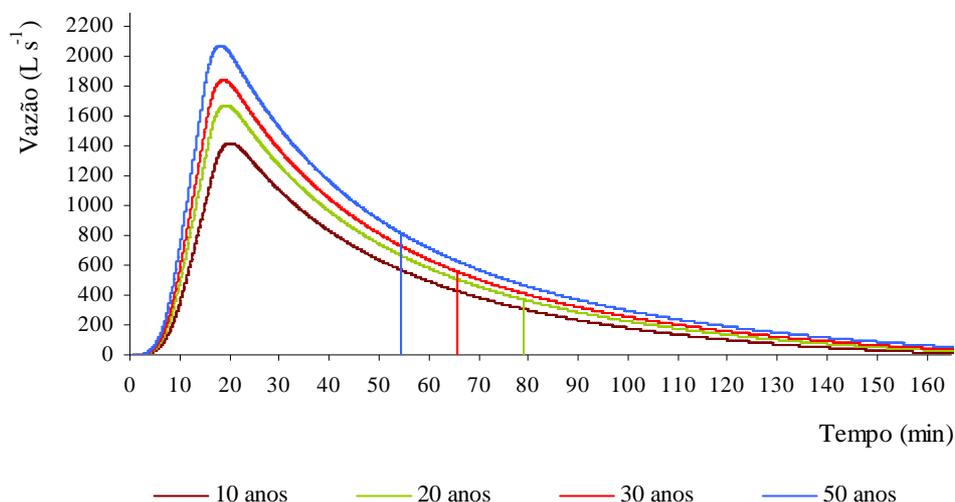


Figura 35 – Sobreposição dos hidrogramas de escoamento superficial para períodos de retorno iguais à 10, 20, 30 e 50 anos.

O volume a ser armazenado no canal (V_{armz}), a altura do terraço (H), a vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x}$) e o volume (V_{dren}) a serem transportados no canal, para cada período de retorno (T) e para cada sistema de terraceamento, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da análise dos hidrogramas

	Terraços em nível				Terraços com gradiente				Terraços mistos			
	10	20	30	50	10	20	30	50	10	20	30	50
T (anos)	10	20	30	50	10	20	30	50	10	20	30	50
V_{armz} (m^3)	3791	4580	5102	5831	-	-	-	-	3791	3791	3791	3791
H (m)	0,99	1,08	1,24	1,32	0,71	0,75	0,77	0,80	-	1,04	1,05	1,07
$Q_{m\acute{a}x}$ ($m^3 s^{-1}$)	-	-	-	-	1,42	1,68	1,85	2,08	-	0,37	0,56	0,82
V_{dren} (m^3)	-	-	-	-	3791	4580	5102	5831	-	789	1311	2040

Na Tabela 3, observa-se para os terraços de retenção um crescimento do volume armazenado (até 53,8%) e da altura do terraço (19,6%) quando do aumento do período de retorno de 10 para 50 anos. Já para os terraços de drenagem percebe-se a redução da eficiência de conservação da água, tendo em vista que, enquanto os terraços de retenção apresentam capacidade de armazenamento de todo o escoamento superficial, os terraços de drenagem transportam todo esse escoamento. Em contrapartida, o seu custo de implantação é a princípio, minimizado, tendo em vista a menor altura dos terraços (até 45%) em relação

àqueles do sistema de retenção. Nestes sistemas, entretanto, é necessária a consideração de um canal escoadouro para o escoamento da vazão transportada pelos terraços.

Considerando que o sistema misto, como o próprio nome já diz, constitui em uma solução intermediária entre os outros dois sistemas, pode-se evidenciar na Tabela 3, o efeito da utilização deste sistema na capacidade de armazenamento, na altura dos terraços e no volume e vazão de drenagem. Em relação à eficiência de armazenamento da água que é nula para terraços de drenagem, no terraçamento misto, ela representa 82,8%, 74,4% e 65,0% daquela correspondente à dos terraços de retenção, para períodos de retorno de 20, 30 e 50 anos, respectivamente.

Com relação à altura dos terraços evidencia-se no sistema misto, como era de se esperar, valores intermediários entre os observados para os sistemas de retenção e de drenagem, representando uma alternativa para a redução dos custos de implantação e manutenção dos terraços.

Para eventos extremos, com períodos de retorno superiores a 10 anos e com maiores magnitudes de escoamento superficial, o volume excedente, a ser transportado pelo canal escoadouro até a seção de deságüe, foi significativamente menor para o terraçamento misto, correspondendo 17,2%, 25,9% e 35,0% dos volumes e à 22,0%, 30,1% e 39,4% das vazões máximas que seriam transportados nos canais escoadouros dos terraços de drenagem para períodos de retorno de 20, 30 e 50 anos, respectivamente.

5.2. Estradas

Visando implementar outras funcionalidades ao software Estradas, desenvolveu-se uma nova versão, em ambiente de programação Delphi 7, a qual foi denominada de Estradas 2.0. Na Figura 36, apresenta-se a tela de abertura do software Estradas 2.0, o qual está disponível para download no endereço <ftp://ftp.ufv.br/dea/gprh/Estradas2/>.

O Estradas 2.0 permite inserir vários trechos longitudinais de uma estrada e calcular para cada trecho a perda de solo, determinar o comprimento recomendável entre desaguadouros e dimensionar bacias de acumulação.

Para tanto, o Estradas 2.0 foi dividido em módulos que permitem o gerenciamento de trechos da estrada, manipulação dos dados de entrada de cada trecho, aplicação da metodologia e geração de relatórios. Na Figura 37, apresenta-

se a tela de entrada de dados do perfil longitudinal de uma estrada, relativos aos parâmetros do canal de drenagem.

Para se adicionar um trecho ao perfil longitudinal da estrada, o usuário deve pressionar o botão Adicionar trecho, o qual adiciona um trecho ao final do perfil. Caso o usuário queira inserir um trecho entre dois trechos já adicionados, deve pressionar o botão Inserir trecho. O botão Apagar trecho permite ao usuário apagar um trecho do perfil longitudinal da estrada. O campo Trecho da estrada informa ao usuário para qual trecho do perfil longitudinal da estrada são mostrados os parâmetros. Este campo inicia com o valor 1, que representa o ramo esquerdo do gráfico apresentado na Figura 37.

Ainda na Figura 37, o usuário deve fornecer os valores dos parâmetros referentes a cada trecho do perfil da estrada, relativos ao canal da estrada, quais sejam: seção transversal do canal de drenagem da estrada (triangular ou trapezoidal), comprimento, declividade, aprofundamento máximo e rugosidade. Caso o usuário queira mudar a seção transversal do canal de drenagem para trapezoidal, basta clicar com o mouse no campo Canal trapezoidal. Salienta-se que o trecho para o qual o usuário fornece os parâmetros está indicado no campo Trecho da estrada.

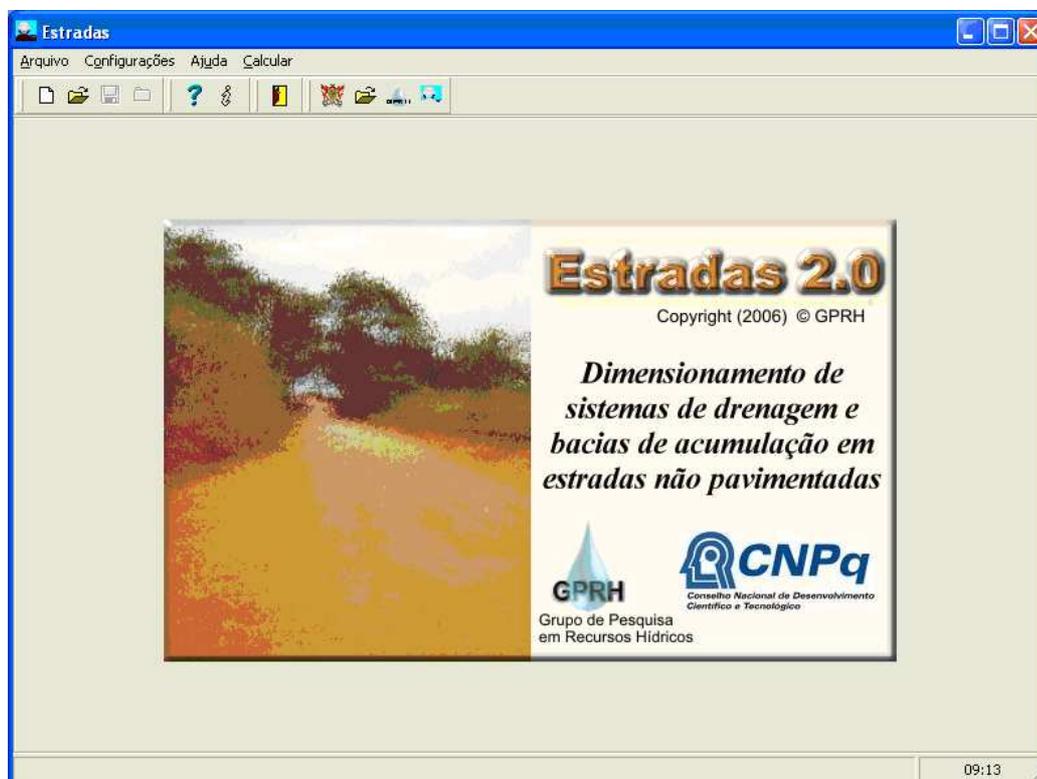


Figura 36 – Tela de abertura do software Estradas 2.0.

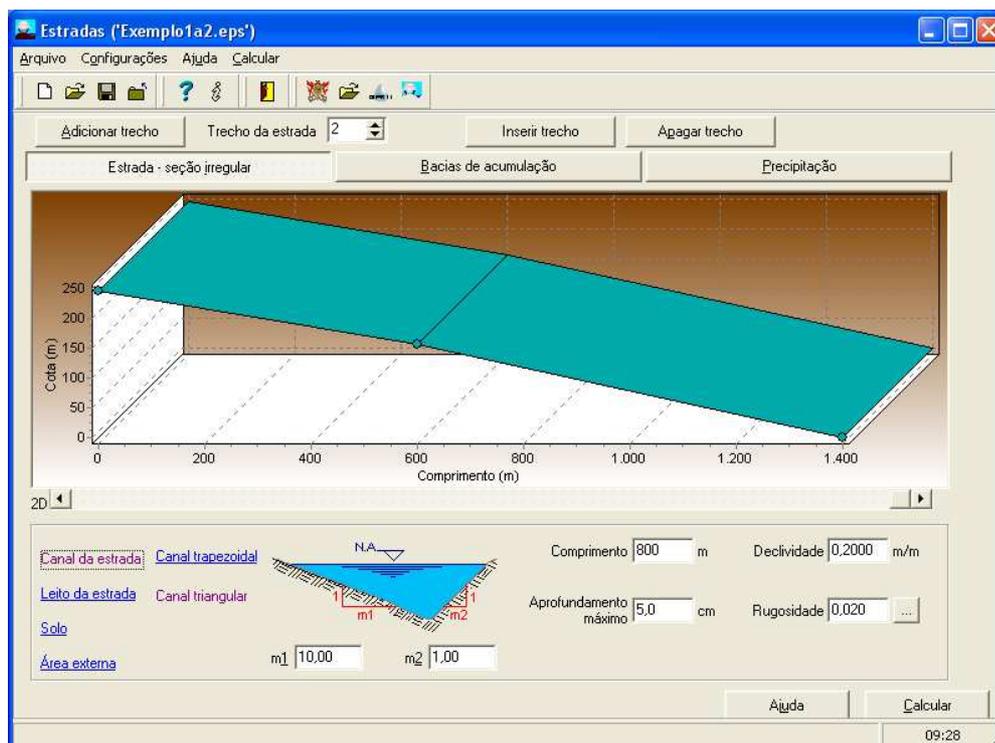


Figura 37 – Tela apresentando a entrada de dados para o perfil longitudinal de uma estrada relativos aos parâmetros do canal de drenagem.

Em relação à rugosidade, o Estradas 2.0 possui um banco de dados que possibilita ao usuário consultar valores de rugosidade hidráulica para condições típicas de canais de drenagem (Figura 38). Para acessar este banco de dados, o usuário deve pressionar o botão , próximo ao campo Rugosidade.

Para fornecer os parâmetros relativos ao leito da estrada, ao solo e à área externa, o usuário deve pressionar o mouse nos campos Leito da estrada, Solo e Área externa, respectivamente.

Consulta a valores de rugosidade do canal			
Canal de terra retilíneo e uniforme	Mínimo	Normal	Máximo
<input type="radio"/> Limpo, recentemente construído	0,016	0,018	0,020
<input type="radio"/> Limpo, mas já tendo sofrido intemperismo	0,018	0,022	0,025
<input type="radio"/> Escascalhado, seção uniforme, limpo	0,022	0,025	0,030
<input type="radio"/> Com grama curta, poucas ervas daninhas	0,022	0,027	0,033
Canal de terra sinuoso			
<input type="radio"/> Sem vegetação	0,023	0,025	0,030
<input type="radio"/> Grama, algumas ervas daninhas	0,025	0,030	0,033
<input type="radio"/> Ervas daninhas densas, plantas aquáticas em canais profundos	0,030	0,035	0,040
<input type="radio"/> Fundo em terra e lados escascalhados	0,028	0,030	0,035
<input type="radio"/> Fundo em cascalho e taludes com ervas daninhas	0,025	0,035	0,040
Valor da rugosidade: <input type="text" value="0,01"/>	<input type="button" value="Ok"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>	<input type="button" value="Ajuda"/>
Fonte: CHOW, V. T. Open-channel hydraulics . McGraw-Hill, 1986. 680p.			

Figura 38 – Banco de dados para condições típicas de canais de drenagem.

Na Figura 39, visualiza-se a tela de entrada de dados para um trecho do perfil da estrada relativos ao leito da estrada e na Figura 40, tem-se a entrada de dados dos parâmetros relativos ao solo.

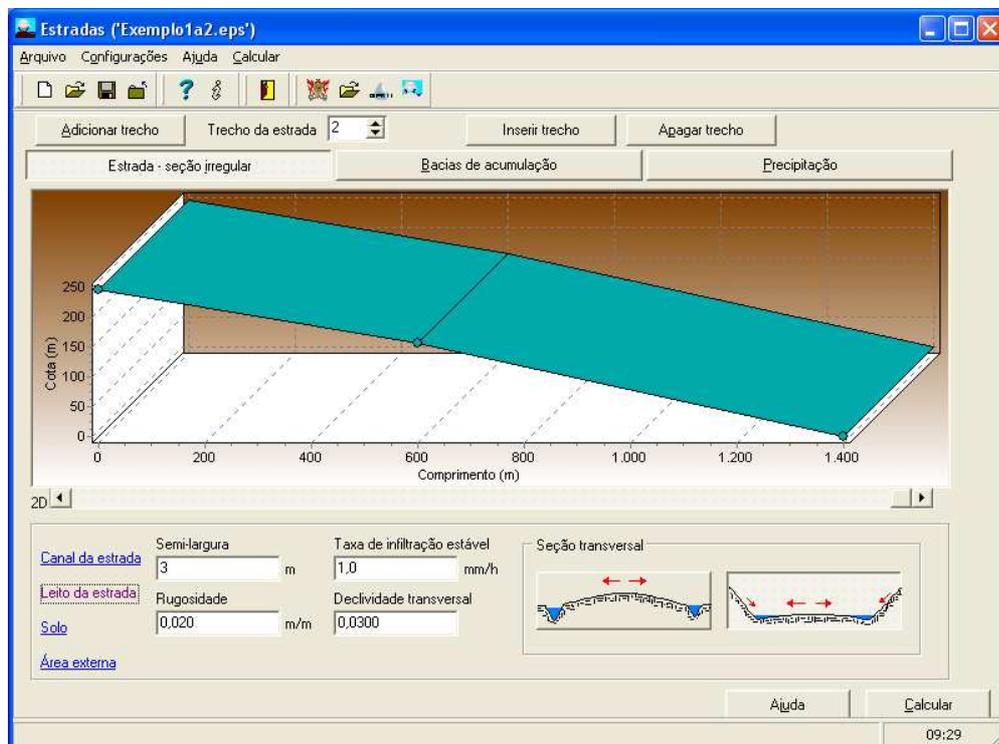


Figura 39 – Tela apresentando a entrada de dados de um trecho do perfil da estrada relativo aos parâmetros do leito da estrada.

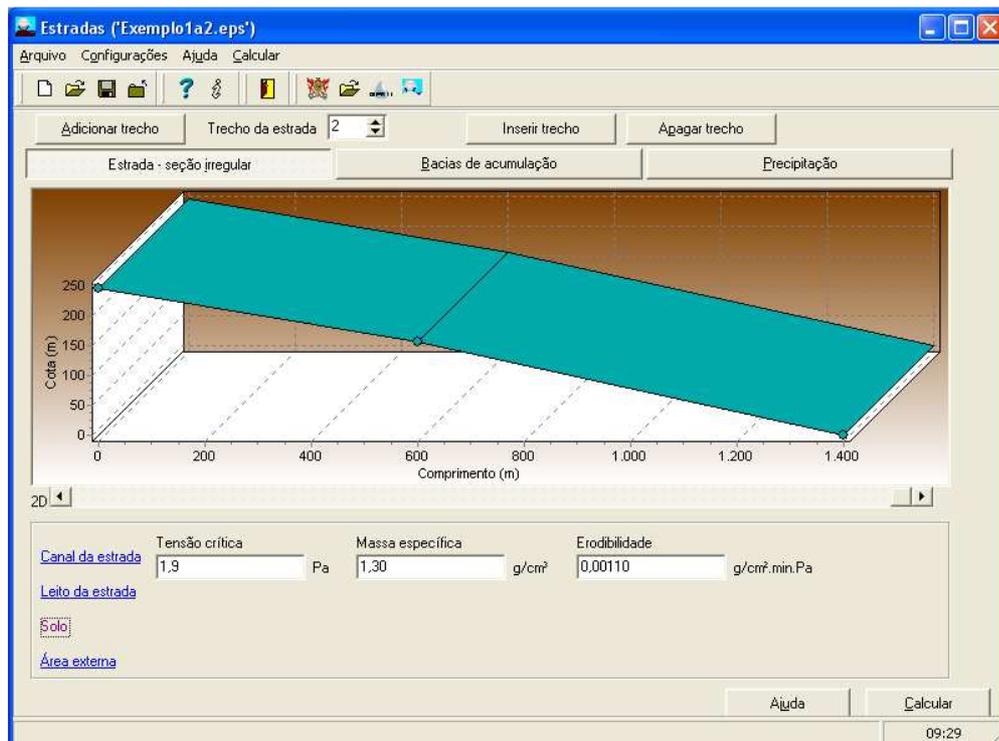


Figura 40 – Tela apresentando a entrada de dados para o perfil longitudinal de uma estrada relativos aos parâmetros do solo.

Na Figura 41, apresenta-se o módulo referente às informações pertinentes à área externa (comprimento, declividade, rugosidade, VIB e cobertura vegetal), o qual permite a obtenção do hidrograma de escoamento superficial advindo da área externa. O usuário pode adicionar um trecho à área externa (campo Adicionar trecho), apagar um trecho (campo Apagar trecho) e visualizar uma representação da encosta (campo Visualizar encosta).

Na Figura 42 tem-se uma visualização da área externa para um determinado trecho do perfil longitudinal da estrada, possibilitando ao usuário fornecer os parâmetros comprimento, declividade, rugosidade, VIB e cobertura vegetal da área externa.

Em relação à rugosidade do terreno, n_t , Figura 41 e Figura 42, o Estradas 2.0 disponibiliza ao usuário um banco de dados de valores de rugosidade do terreno para várias condições (Figura 43). Para ter acesso a este banco de dados, o usuário deve pressionar o botão  de cada trecho da área externa na coluna relativa à rugosidade do terreno.

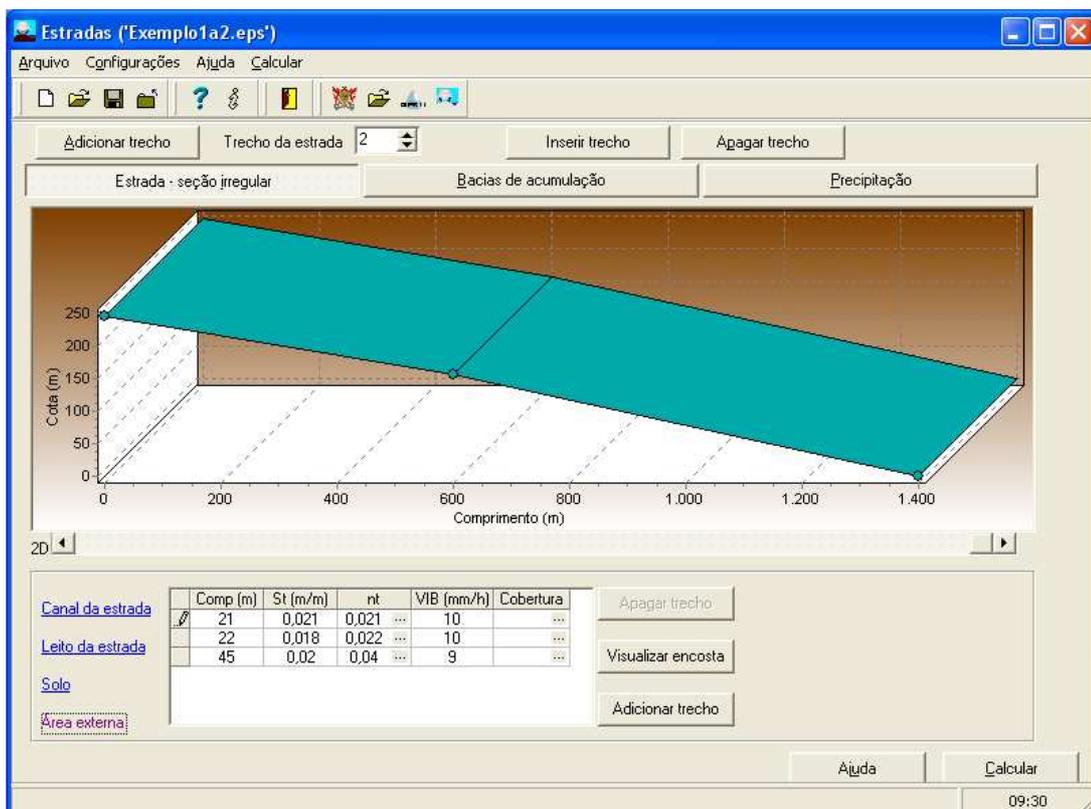


Figura 41 – Tela apresentando a entrada de dados para o perfil longitudinal de uma estrada relativos aos parâmetros da área externa: comprimento, declividade, rugosidade, VIB e cobertura vegetal.

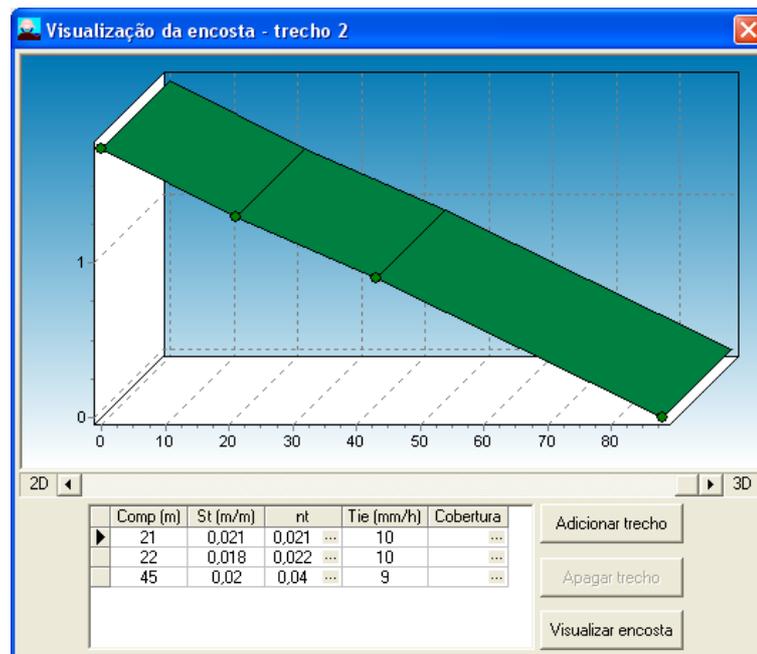


Figura 42 – Visualização da área externa para um determinado trecho do perfil da estrada.

Cultura em linha	Intervalo	Valor
Preparo primário com aiveca	0,070-0,100	0,085
Escarificador	0,080-0,120	0,100
Sem preparo	0,100-0,150	0,120
Gramma ou pastagem	0,065-0,100	0,080
Pequenos grãos	0,090-0,120	0,100
Florestas ou áreas de reflorestamento	0,120-0,180	0,150
Terra arada	0,010-0,050	0,035
Arado de aiveca	0,250-0,500	0,350
Arado de disco	0,030-0,080	0,050
	0,150-0,500	0,250
	0,030-0,070	0,040
	0,100-0,400	0,200

Fonte : BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F. **Answers: user's manual.** Chicago, United States Environmental Protection Agency, Region V, 1981. 51p.

Figura 43 – Banco de dados de valores de rugosidade do terreno.

O usuário deve também informar a cobertura vegetal de cada trecho da área externa (Figura 44). Para tanto, deve pressionar o botão [...] em cada trecho da área externa na coluna Cobertura.

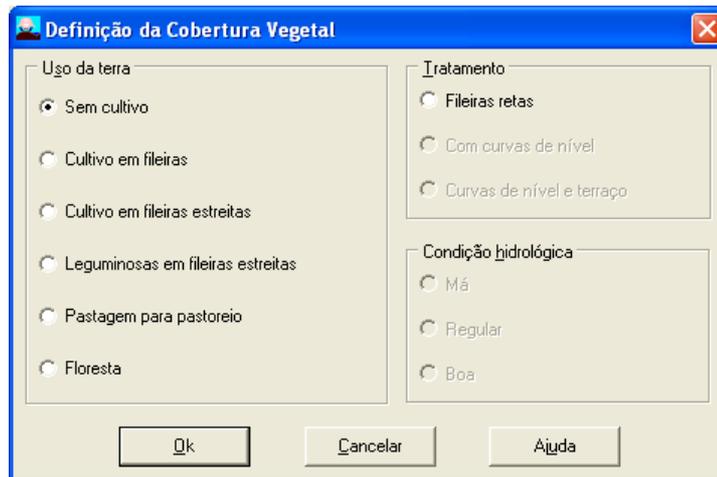


Figura 44 – Definição da cobertura vegetal de trechos da área externa para um determinado trecho do perfil da estrada.

Na Figura 44, tem-se que:

1. Uso da terra

- Sem cultivo: terra agrícola sem cobertura vegetal, a qual apresenta o mais alto potencial de escoamento superficial. Constitui situação típica das áreas cultivadas com culturas anuais, imediatamente após o preparo ou plantio.
- Cultivo em Fileiras: culturas plantadas em linhas com espaçamento tal que boa parte da superfície do solo permanece exposta ao impacto das gotas da chuva do começo ao fim do ciclo da cultura. Exemplos: milho, sorgo, tomate e soja.
- Cultivo em Fileiras Estreitas: culturas plantadas em fileiras tão próximas entre si que a superfície do solo permanece desprotegida apenas durante um curto período de tempo, imediatamente após o plantio. Exemplos: trigo, aveia e cevada.
- Leguminosas em Fileiras Estreitas ou Forrageiras em Rotação: são plantadas em fileiras bastante próximas ou, até mesmo, a lanço, como, por exemplo, a alfafa. No que diz respeito às rotações, constituem seqüências de cultivos, em que os propósitos são manter a fertilidade do solo, reduzir a erosão ou promover um suprimento de uma cultura particular.

2. Tratamento

- Fileiras Retas: constitui o tipo de plantio em que as fileiras de plantio são dispostas segundo a linha de declive do terreno.
- Com Curvas de Nível: é o tipo de tratamento em que as fileiras de plantio são posicionadas tão próximas quanto possível de curvas de nível.

- Com Curvas de Nível e Terraços: é quando, além das fileiras de plantio estarem posicionadas em nível, existem terraços para a contenção do escoamento superficial.

3. Condição hidrológica

- Boa: cobertura em mais de 75% da área.
- Regular: cobertura de 50 a 75% da área.
- Má: cobertura em menos de 50% da área.

O usuário deve também fornecer os parâmetros relativos às bacias de acumulação (Figura 45). Para ter acesso a este módulo, o usuário deve pressionar o botão Bacias de acumulação. Neste módulo o usuário deve fornecer informações relativas ao canal de condução da água da estrada para a bacia de acumulação (campo Canal de condução): seção transversal (triangular ou trapezoidal), rugosidade e declividade. O usuário tem à sua disposição o banco de dados relativos à rugosidade hidráulica de canais de drenagem (Figura 48), ao pressionar o botão Valores de rugosidade do canal.

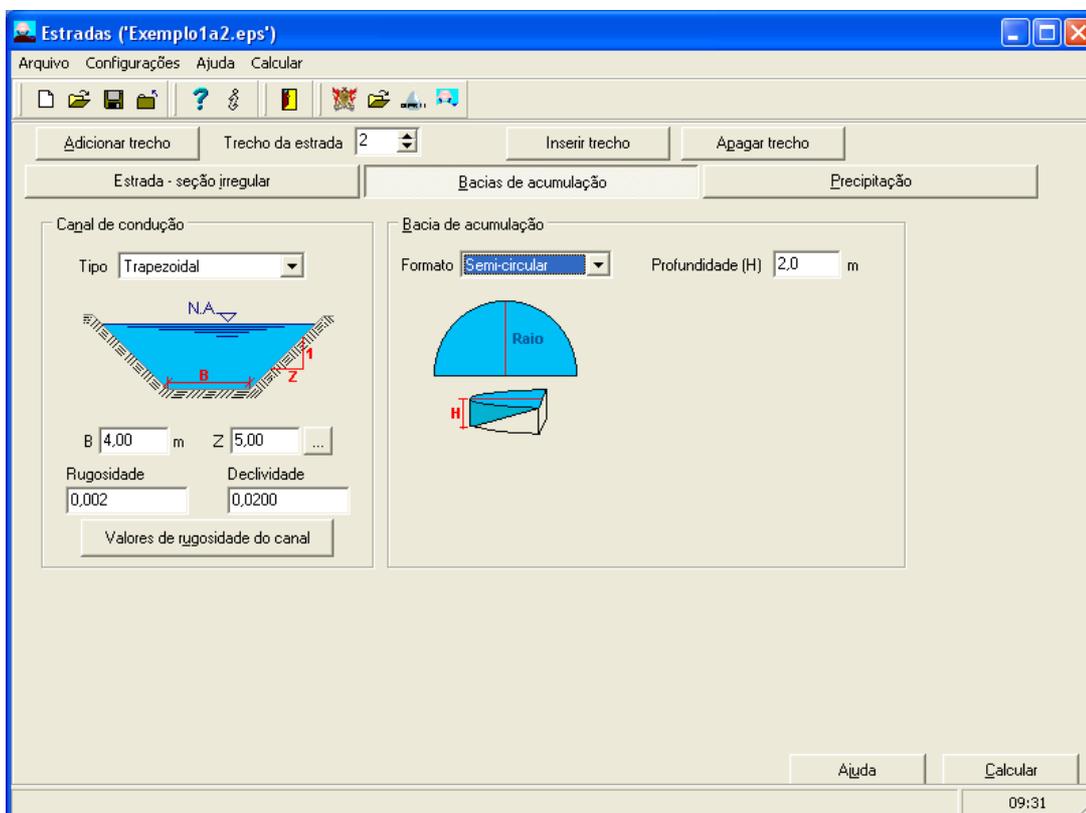


Figura 45 – Módulo relativo ao dimensionamento de bacias de acumulação.

No campo Bacia de acumulação (Figura 45), o usuário deve fornecer o formato da bacia (semi-circular ou retangular) e sua profundidade. Por motivos de segurança, aconselha-se trabalhar com profundidades inferiores a 1,50 metros.

Uma vez fornecidos todos os parâmetros para os trechos do perfil longitudinal da estrada, o usuário deve pressionar o botão Calcular. Uma tela informando o estágio da simulação será exibida (Figura 46).

Após a realização dos cálculos, uma tela contendo os resultados por metro para cada trecho do perfil longitudinal da estrada é apresentada (Figura 47). Nesta tela, são apresentados os resultados obtidos, relativos à perda tolerável de solo, ao espaçamento máximo, à tensão cisalhante máxima, à perda de solo estimada e à vazão máxima para o canal.

Em relação à bacia de acumulação, apresenta-se o volume escoado, a vazão máxima e o raio, para o caso de um formato semi-circular.

São apresentados também os valores numéricos da lâmina de escoamento superficial, da vazão, da tensão máxima e da perda de solo para cada metro do trecho especificado no campo Trecho.

Na Figura 48 apresenta-se uma parte do relatório contendo os dados de entrada, bem como os resultados obtidos para todo o perfil longitudinal da estrada.

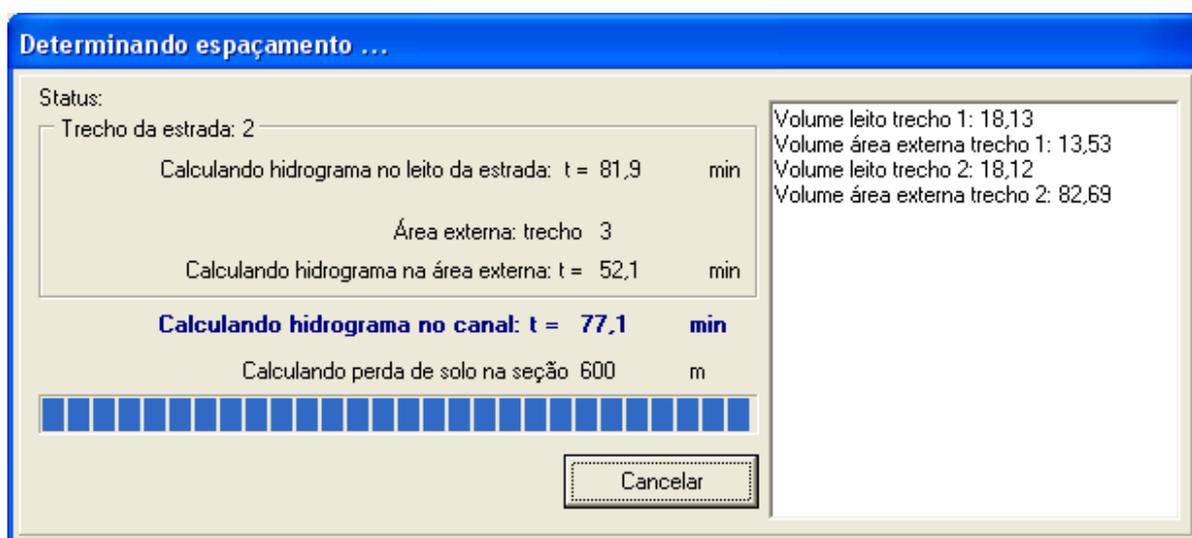


Figura 46 – Tela informando o estágio dos cálculos da perda de solo e dimensionamento das bacias de acumulação do Estradas 2.0.

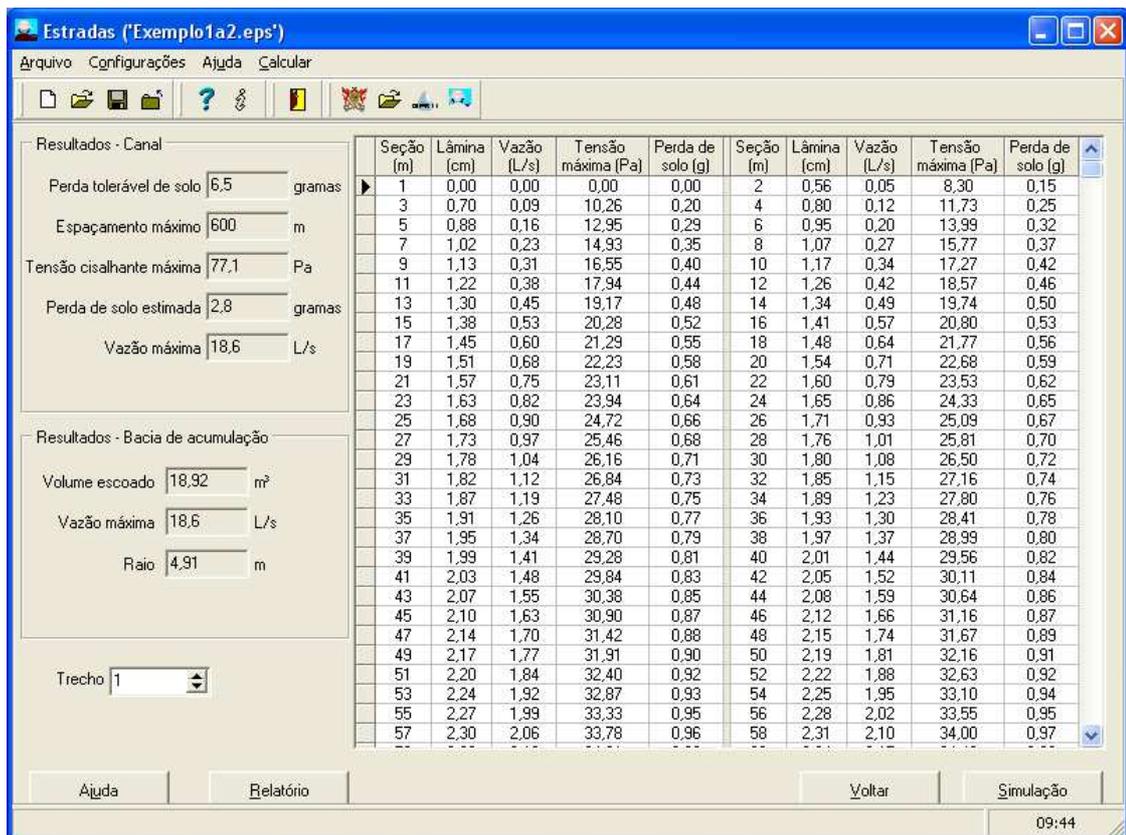


Figura 47 – Tela de resultados do Estradas 2.0 contendo as informações obtidas após a realização das simulações.



Figura 48 – Tela apresentando parte do relatório gerado pelo Estradas 2.0.

5.3. Avaliação dos modelos desenvolvidos.

5.3.2. Determinação das perdas de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas simuladas.

Em todos os testes realizados em solo com baixa umidade (aproximadamente 15%), que corresponderam a dois testes para cada um dos quatro perfis propostos, totalizando oito testes, não foi observado escoamento superficial.

Na Figura 49 são apresentados o perfil de precipitação constante aplicado e as taxas de escoamento superficial (T_{es}) para quatro testes realizados em condição de solo úmido (25 a 30%), sendo o teste 2 aplicado em solo descoberto e os demais em solo coberto.

Para os testes realizados sobre solo coberto os valores de T_{es} aumentaram gradativamente ao longo da duração, chegando a atingir o valor de até 74 mm h^{-1} , entretanto não foram observadas grandes diferenças no volume de escoamento superficial, sendo os coeficientes de escoamento superficial iguais a 0,21; 0,21 e 0,18, valores estes, portanto, correspondentes a cerca de 20% do total precipitado.

No teste em solo descoberto é evidenciado rápido aumento da taxa de escoamento superficial no início do teste, mantendo-se estas taxas altas, com valores oscilando entre 70 e 100 mm h^{-1} , ao longo da duração, sendo o coeficiente de escoamento neste teste igual a 0,81, valor, portanto, quatro vezes superior ao observado nos testes com cobertura.

Pode-se observar, portanto, diferença expressiva da T_{es} nos testes realizados em solo coberto e em solo descoberto. Assim sendo, enquanto no solo sem cobertura toda a energia cinética da precipitação do primeiro teste (igual a $1055 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$) foi dissipada sobre a superfície do solo, nos testes com cobertura ela foi absorvida em parte pela cobertura vegetal. Com isto houve uma redução considerável de taxa de infiltração (Figura 50) tanto em decorrência do progressivo aumento do selamento superficial, como também da redução do gradiente hidráulico com o aumento da lâmina infiltrada no solo.

Na Figura 51, correspondente ao perfil de precipitação exponencial decrescente e às taxas de escoamento superficial (T_{es}) para os três testes realizados em condição de solo úmido (25 a 30%) e coberto, pode-se verificar maiores T_{es} no início dos testes, com valores de até 126 mm h^{-1} , e diminuição ao longo da duração, chegando até zero, seguindo o comportamento do perfil de

precipitação aplicado, sendo os valores do coeficiente de escoamento para cada teste igual a 0,20; 0,25 e 0,32 (média igual a 0,26). Tal comportamento está diretamente associado à variação da infiltração ao longo do tempo (Figura 52), sendo esta decrescente tanto em decorrência da redução do gradiente hidráulico com do aumento do selamento superficial, sendo que próximo ao final do teste já se é evidenciada a tendência de uma constância nos valores da taxa de infiltração e passando inclusive, a intensidade de precipitação a ser determinante no processo de infiltração.

A Figura 53 se refere ao perfil de precipitação duplo exponencial adiantado simulado e às taxas de escoamento superficial (Tes) para os três testes realizados em condição de solo úmido (25 a 30%). Nesta figura pode-se verificar o aumento das Tes em função do aumento da intensidade de precipitação, sendo as maiores Tes observadas após o tempo de pico da precipitação aplicada. Pela análise da taxa de infiltração da água no solo (Figura 54) observa-se que, até um tempo de aproximadamente 8 minutos a precipitação é convertida em infiltração, sendo este fator determinante do processo de infiltração. A partir deste tempo, a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração passando o solo a ser o condicionador do processo de infiltração e o escoamento ser correspondente à diferença entre a intensidade de precipitação e a taxa de infiltração que decresce com o tempo tanto pelo aumento da profundidade da frente de umedecimento como pelo selamento superficial. Os valores do coeficiente escoamento superficial para os dois testes foram iguais a 0,21 e 0,28 (média igual à 0,25).

Na Figura 55 são apresentados o perfil de precipitação duplo exponencial atrasado simulado e as taxas de escoamento superficial (Tes) para os dois testes realizados em condição de solo úmido (25 a 30%) e coberto. Pode-se evidenciar neste teste um comportamento da infiltração (Figura 56) similar ao evidenciado no teste com o perfil adiantado, embora com uma magnitude bem superior, o que acarretou, conseqüentemente, taxas de escoamento superficial muito superiores. Os coeficientes de escoamento superficial nos testes realizados foram de 0,05 e 0,14 (média de 0,10).

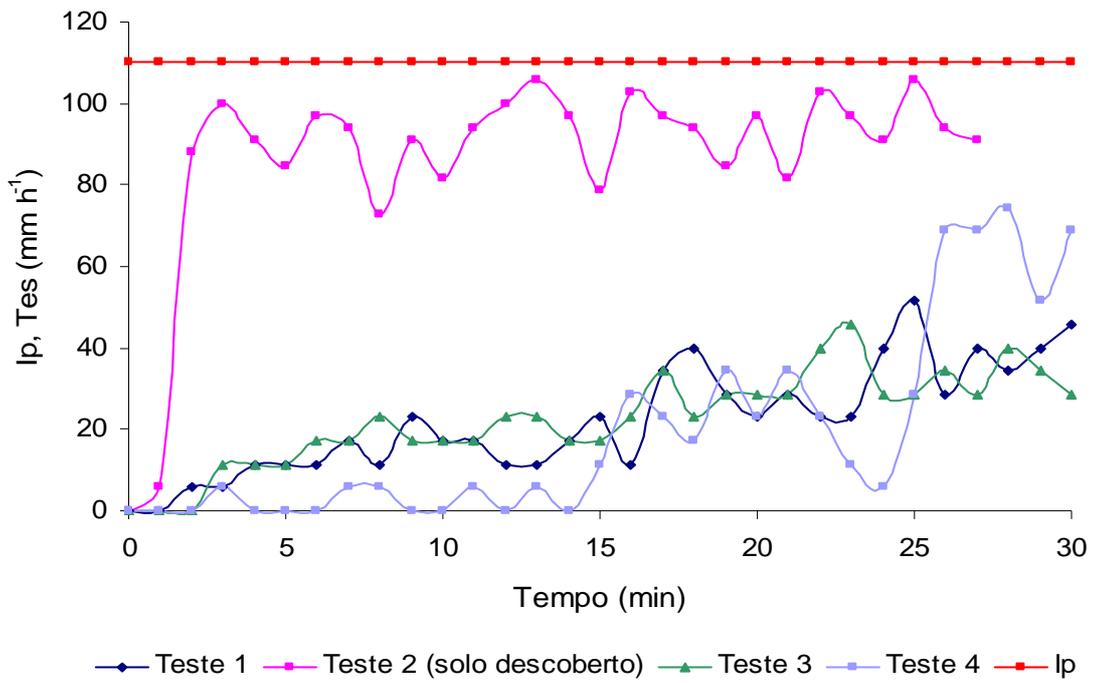


Figura 49 – Perfil de precipitação constante e taxas de escoamento superficial.

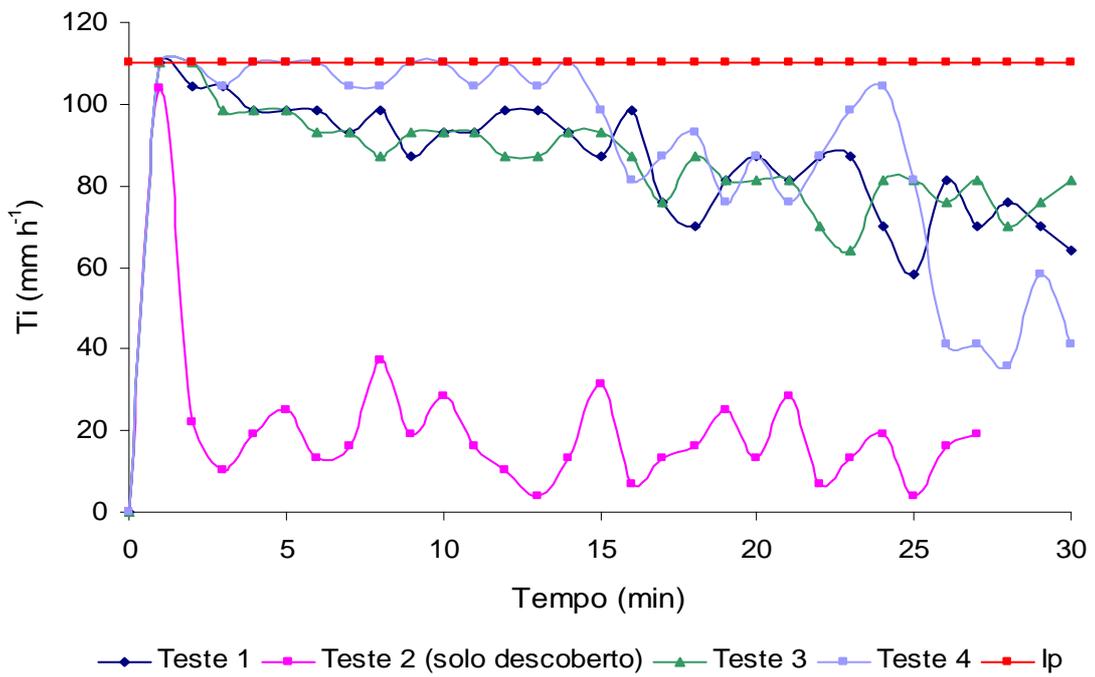


Figura 50 – Perfil de precipitação constante e taxas de infiltração.

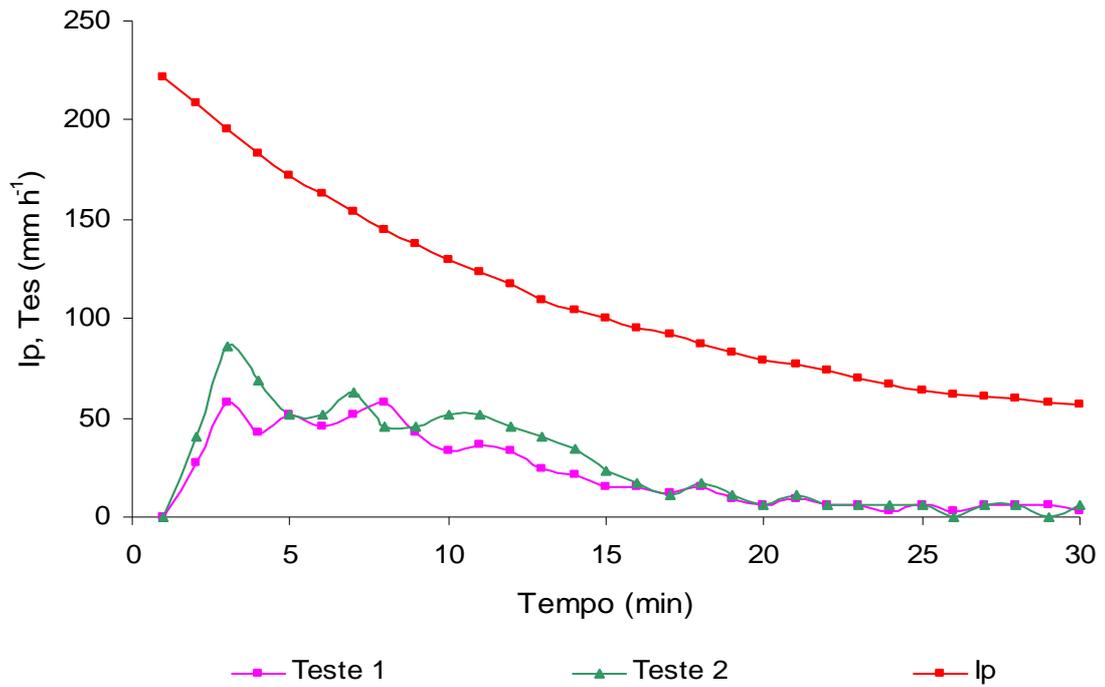


Figura 51 – Perfil de precipitação exponencial decrescente e taxas de escoamento superficial.

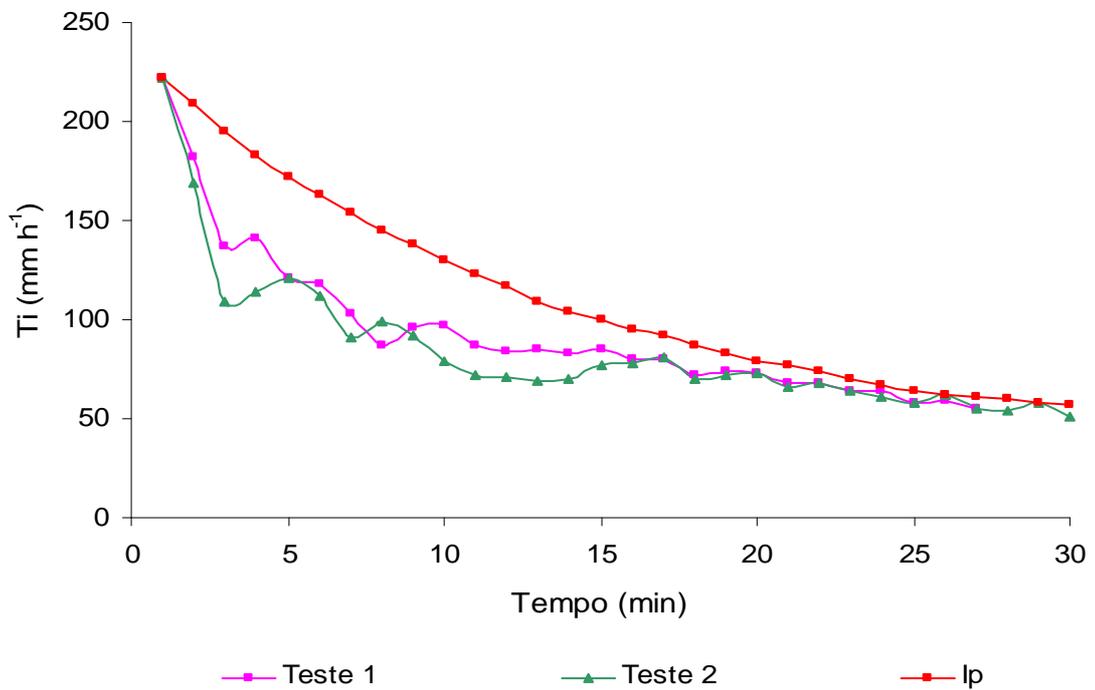


Figura 52 – Perfil de precipitação exponencial decrescente e taxas de infiltração.

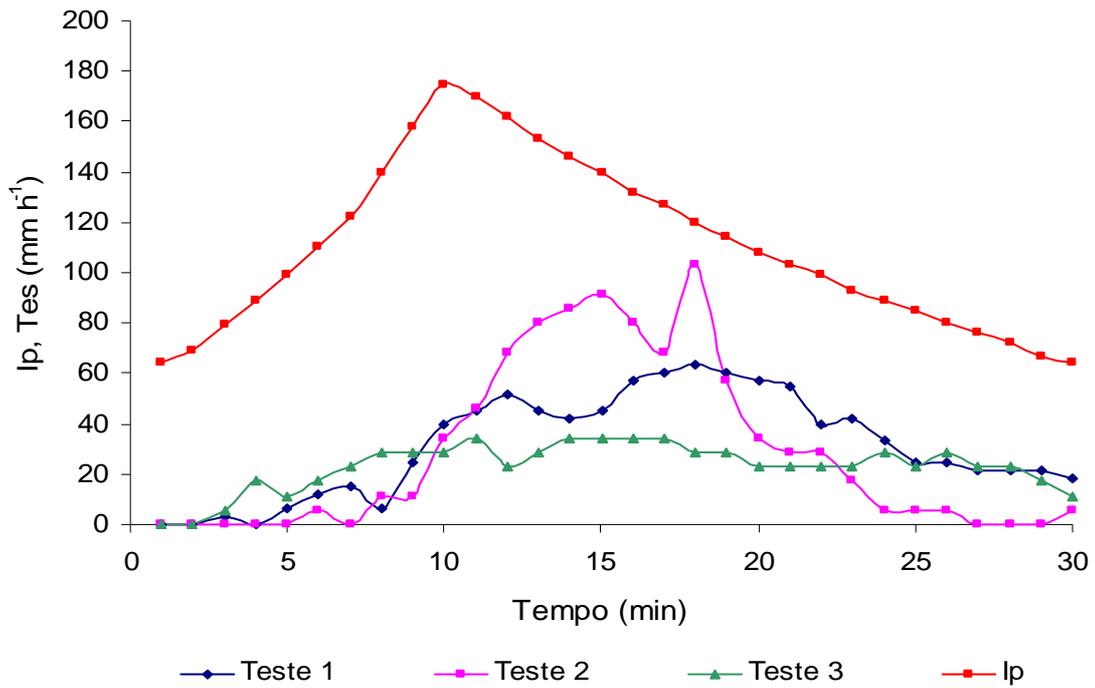


Figura 53 – Perfil de precipitação duplo exponencial adiantado e taxas de escoamento superficial.

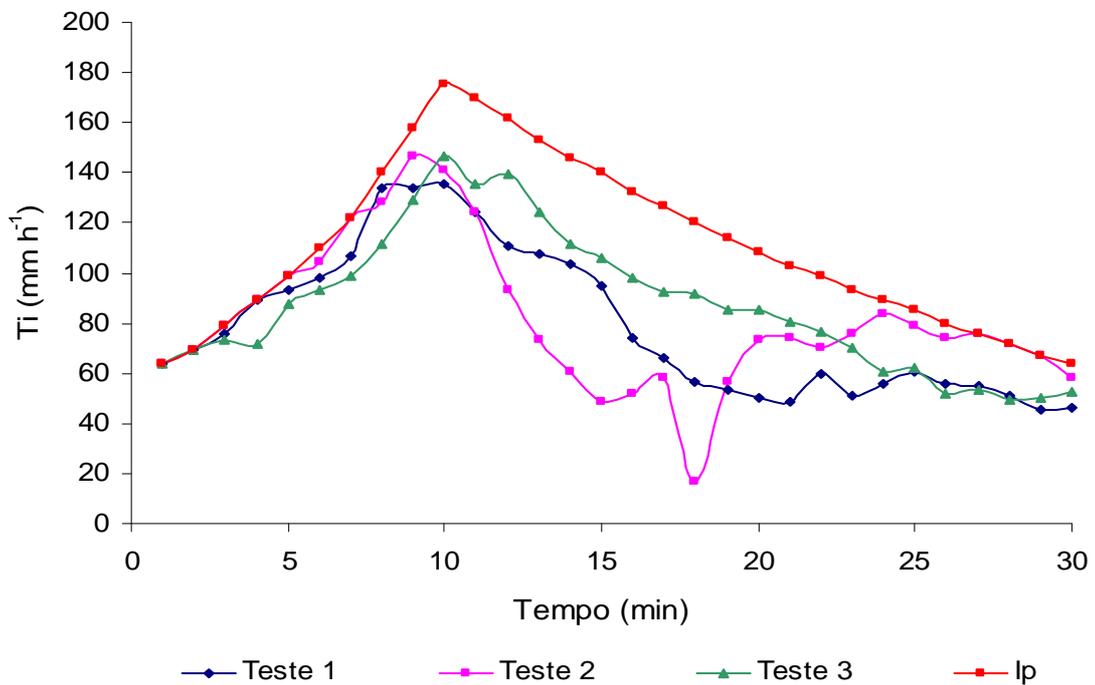


Figura 54 – Perfil de precipitação duplo exponencial adiantado e taxas de infiltração.

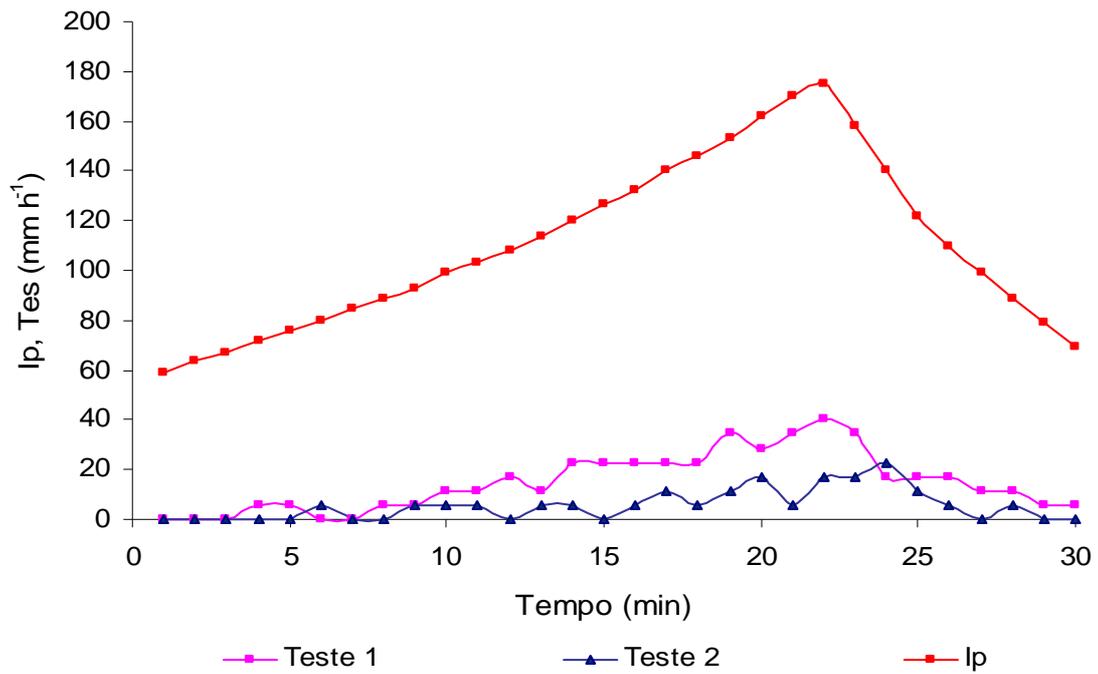


Figura 55 – Perfil de precipitação duplo exponencial atrasado e taxas de escoamento superficial.

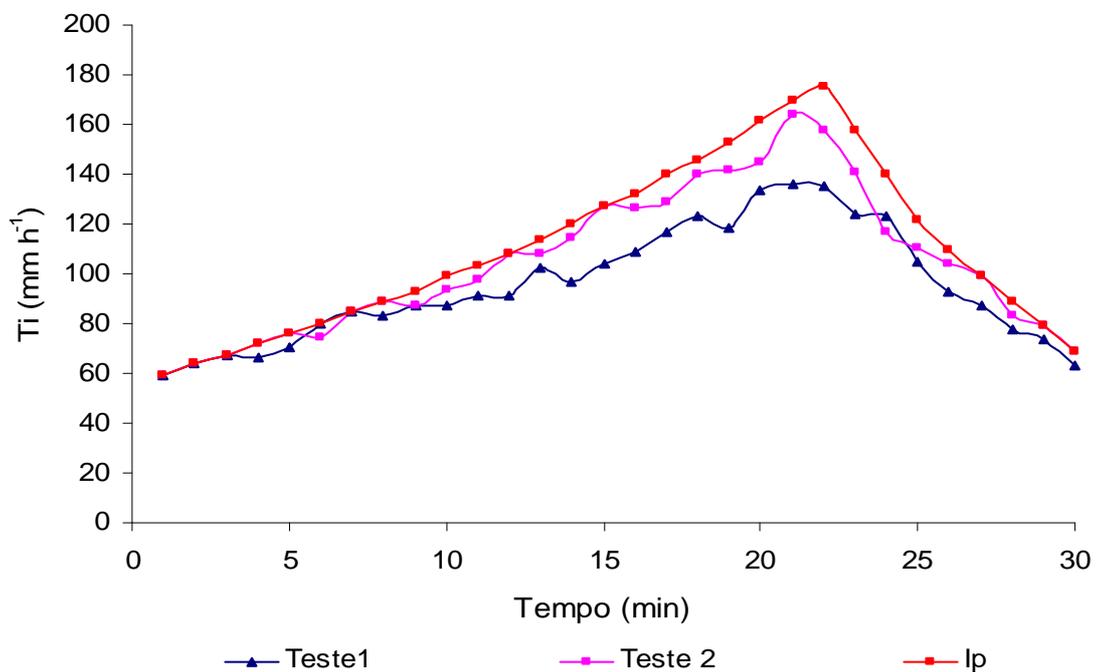


Figura 56 – Perfil de precipitação duplo exponencial atrasado e taxas de infiltração.

Para melhor visualização da relação entre os perfis de precipitação aplicados e as Tes obtidas são apresentados, na Figura 57, os valores médios das Tes correspondentes a cada um dos quatro perfis de precipitação utilizados. Considerando-se que para todos os perfis o volume precipitado foi o mesmo, pode-

se evidenciar que o maior valor do coeficiente de escoamento foi para a condição de solo sem cobertura (igual a 0,81). Para os experimentos realizados em solo coberto os valores, em ordem decrescente foram de 0,26 (perfil exponencial decrescente), 0,25 (duplo exponencial adiantado), 0,20 (constante) e 0,10 (duplo exponencial atrasado). Assim sendo pode-se observar que não ocorreram diferenças substanciais no comportamento dos três primeiros perfis e uma expressiva redução do coeficiente de escoamento superficial para o perfil duplo exponencial atrasado, fato que, inclusive, contradiz o comportamento normalmente descrito na literatura. A continuação dos testes permitirá uma análise mais rigorosa deste comportamento.

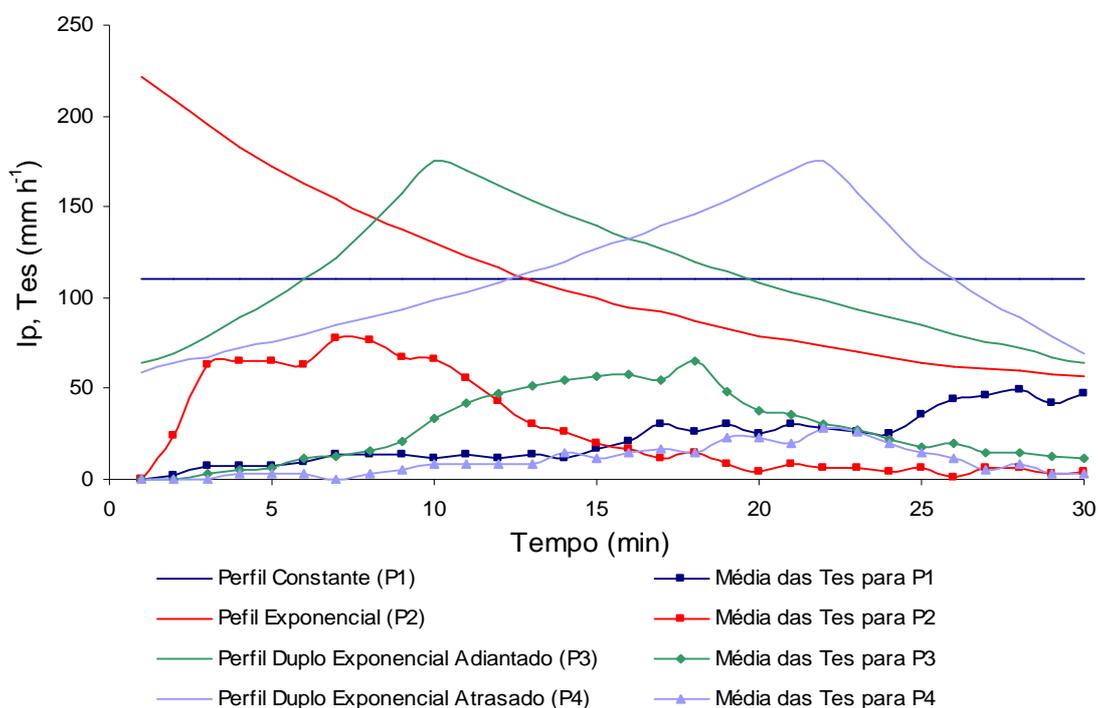


Figura 57 – Perfis de precipitação utilizados e taxas médias de escoamento superficial.

5.3.1. Determinação das perdas de água em parcelas experimentais, sob condições de chuvas naturais.

As parcelas experimentais foram monitoradas no período de dezembro de 2005 a março de 2006 e novembro de 2006 a março de 2007 (safras 2005/2006 e 2006/2007, respectivamente). Durante o período de monitoramento foram registrados 73 eventos de precipitação que geraram perdas de água. Estas perdas estão sendo analisadas individualmente considerando-se os diversos fatores que influenciam o processo de escoamento superficial, incluindo condição de cobertura e

preparo do solo, valores de umidade do solo antes da ocorrência da precipitação e precipitação nos cinco dias que antecedem o evento considerado. Para cada evento, está sendo analisado o comportamento do escoamento superficial considerando, de forma integrada, o efeito de cada um dos fatores condicionadores do escoamento superficial. Dada a complexidade envolvida, estas análises ainda não foram concluídas.

6. Bibliografia.

ANJOS FILHO, O., Estradas de terra. Jornal O Estado de São Paulo, São Paulo. Suplemento agrícola, 29 de abril de 1998.

BAHIA, V. G. CURI, N. e CARMO, D. N. et al. Fundamentos de erosão do solo. Informe Agropecuário, v. 176, n.16, 1992. p.25-31.

BERTOLINI, D., LOMBARDI NETO, F., DRUGOWICH, M.I. Programa estadual de microbacias hidrográficas. Campinas: SEAB/SP-CATI, 1993.15p.

BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo: Ícone, 1990. 355p

BRAGAGNOLO, N., PAN, W. A. A experiência de programas de manejo e conservação dos recursos naturais em microbacias hidrográficas. In: Interface da gestão de recursos hídricos: desafios da Lei das águas de 1997. Héctor Raul Muñoz, organizador. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2000. p. 176-198.

BRAS, R.L. Hydrology: an introduction to hydrological sciences. Addison- Wesley Series in Civil Engineering, Addison- Wesley Publishing Company, 643p. 1990.

BUBLITZ, U., CAMPOS, L. C. Adequação de estradas rurais em microbacias hidrográficas - especificações de projetos e serviços. Curitiba, PR: EMATER-PR, 1992. 70p. (informação técnica 18).

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SÃO PAULO – CODASP. Manual técnico de motomecanização agrícola. São Paulo, 1994. 100p.

DE MARIA, J. C. Erosão e terraços em plantio direto. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.24, n.1, 1999. p.17-21.

DENARDIN, J. E., BERTON, A., TROBETTA, A., KOCHHANN, R. .A., FALCÃO, H. Terraceamento em lavoura manejada sob sistema plantio direto. In: XXII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 1998, Fortaleza, Resumos expandidos... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do solo – Universidade Federal do Ceará, 1998. p198-199.

DNER, Anuário estatístico dos transportes: GEIPOT, 2000. www.dner.gov.br.

GRACE III, J. M., RUMMER, B., STOKES, B. J. e WILHOIT, J. Evaluation of erosion control techniques on forest roads. Transactions of the ASAE, v. 41:383-391, 1998

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; De MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C. & LANDERS, J.C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E. & PERES, J.R.R. Uso agrícola dos solos brasileiros, Rio de Janeiro, EMBRAPA, 2002, p.47-60.

HERNANI, L. C. O manejo e conservação de solo e água. Revista Ação Ambiental, v.6, n.24, 2003. p.14-17.

HIGGITT, D.L. Soil erosion and soil problems. Progress in Physical Geography, v. 1, n. 15, p. 91-100, 1991.

MADARAS, J.S.; JARRET, A.R. Spatial and temporal distribution of sediment concentration and particle size distribution scale sedimentation basin. Transactions of the ASAE, v. 43, n. 4, p. 897-902, 2000.

MANUAL DE EXECUÇÃO DE SERVIÇOS DE ADEQUAÇÃO DE ESTRADAS RURAIS, Projeto Paraná 12 meses, subcomponente manejo e conservação de recursos naturais. Paraná: DER. 2000. (informe técnico).

MARGÓLIS, E. Terraceamento na região nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1998, 1, Campinas. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.3 – 10.

MUÑOZ-CARRERA, R., PARSONS, J.E. VFSMOD – Vegetative filter strips hydrology and sediment transport model: model documentation e user's manual (version 1.04) North Carolina: Biological and Agricultural Engineering - NCSU, 1999. 92p.

PARANÁ, Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo. Curitiba, 1994. 306p.

PASTORE, E., Estudos para planejamento da conservação de estradas de terra do município e de usinas de açúcar e álcool de São Joaquim da Barra – Estado de São Paulo, In: ABPv, I SINBATRA. Anais... .Rio de Janeiro: ABPv, 1997.p.1-11.

PRUSKI, F.F., FERREIRA, P.A., RAMOS, M.M., CECON, P.R. Model to design level terraces. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.123, n.1, p.8-12, 1997

REID, L. M. e DUNNE, T. Sediment production from forest roads. Water Resources Research, v. 20, n.11, 1984. p.1753-1761.

SCHMIDT, A. V. Terraceamento na região sul. In: Simpósio sobre Terraceamento Agrícola, 1988, Campinas. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.23-25.

SILVA, J. M.A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma encosta. Viçosa:UFV, 1999. 64p. (Dissertação de mestrado).

SILVA, M. M. P. C. S. R. Modelo distribuído de simulação do escoamento superficial. Lisboa: UTL, 1996. 321p. (Tese de Doutorado).

YU, B.; CAKURS, U.; ROSE, C.W. An assessment of method for estimating runoff rates at the plot scale. Transactions of the ASAE, v. 41, n. 3, p. 653-661, 1998.

ZIEGLER, A. D., SUTHERLAND, R. A. e 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, 2000. p.2787-2791.