

CRISTINA D'ORNELLAS FILIPAKIS SOUZA

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A ESTIMATIVA DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S729s
2010

Souza, Cristina D'Ornellas Filipakis, 1979-
Sistema computacional para a estimativa do escoamento
superficial / Cristina D'Ornellas Filipakis Souza. – Viçosa,
MG, 2010.

xvii, 71f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 69-71

1. Hidrologia - Modelos matemáticos. 2. Hidrologia -
Processamento de dados. 3. Escoamento superficial.
4. Erosão. 5. Solos - Conservação. 6. Água - Conservação.
7. Software - Desenvolvimento. I. Universidade Federal de
Viçosa. II. Título.

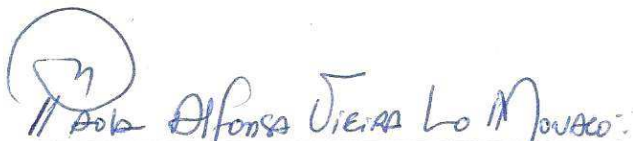
CDD 22. ed. 551.48

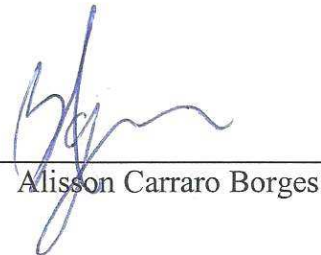
CRISTINA D'ORNELLAS FILIPAKIS SOUZA

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A ESTIMATIVA DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

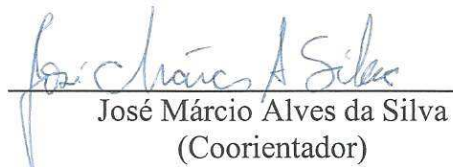
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 30 de julho de 2010.


Paola Alfonsa Vieira Lo Mônaco


Alisson Carraro Borges


Mauro Aparecido Martinez


José Márcio Alves da Silva
(Coorientador)


Fernando Falco Pruski
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela segunda chance dada por Ele para que eu concluísse o mestrado, pois Ele nunca me faltou, mesmo em momentos em que duvidei da Sua presença em minha vida.

Às minhas filhas, Giovanna e Isadora, que tiveram a paciência de conviver com uma mãe estressada por vários anos, pelo carinho e pela alegria ao me receber em casa depois de um dia de trabalho e estudo. Amo vocês!

Aos meus pais. Certamente não conseguirei colocar em palavras o que eles significam na minha vida. À minha mãe, pelo amor incondicional, pelas horas de conversa e pelo apoio em todos os aspectos de minha vida e pelas vezes em que ficou com minhas filhas para que eu terminasse este trabalho. Ao meu pai, pela presença silenciosa, silêncio esse que vale por mil palavras, e pela certeza de seu apoio em qualquer momento, bom ou ruim.

Ao meu esposo, Flávio, que me acompanha desde os meus 15 anos, pelo apoio em toda a minha trajetória pessoal e profissional e pela companhia em todos os momentos difíceis. Te amo muito.

De forma muito especial, à minha chefe e amiga, Parcilene, e ao meu amigo e colega Fabiano, por serem muito especiais e pelo apoio quando perdi minha primeira chance, dando-me a certeza que eu não deixaria de estar entre eles. A confiança deles foi decisiva para eu ter forças ao recomeçar esta caminhada.

Ao meu orientador, professor Fernando Falco Pruski, pela enorme paciência, pelas orientações preciosas e pelo apoio até o final deste trabalho. Aos professores do

MINTER, que, por meio de suas aulas, mostraram o motivo pelo qual a UFV é uma das melhores universidades do país.

À Conceição, que me auxiliou na decisão de começar um mestrado novamente, em uma área completamente nova, e me mostrou as possibilidades de trabalho na mesma. A ela e ao Washington, pela orientação e pelas palavras de apoio neste processo.

Ao Marlon, pelo apoio no desenvolvimento do sistema e pela dedicação até os últimos dias do trabalho. Ao José Márcio, pelas orientações na utilização do Plúvio.

A todos os professores de Sistemas de Informação e Redes de Computadores do CEULP/ULBRA, principalmente pelas conversas animadas na hora do lanche, e, em especial, à minha amiga Madianita, que sempre se preocupou em saber como as coisas estavam e me deu força para continuar esta caminhada.

A todos os colegas do MINTER, em especial ao José Geraldo e ao Edivaldo, colegas de mestrado que se tornaram amigos.

A Kelen e a Diêmy, pela confiança depositada no trabalho administrativo e pela compreensão nos momentos de ausência.

E, por fim, à Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado.

BIOGRAFIA

CRISTINA D'ORNELLAS FILIPAKIS SOUZA, filha de Georgios Filipakis e Maria da Graça Portinho D'Ornelas, nasceu em 22 de junho de 1979, em Cruz Alta, RS.

Em 2000, graduou-se em Sistemas de Informação, pelo Centro Universitário Luterano de Palmas.

Em 2003, especializou-se em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Em 2008, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, em nível de Mestrado, concluindo-o em julho de 2010.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Ciclo hidrológico.....	3
2.2. Processo de formação do escoamento superficial.....	5
2.3. Fatores que influenciam o escoamento superficial	6
2.4. Consequências do escoamento superficial	6
2.5. Modelos para estimativa do ES.....	8
2.5.1. Método racional.....	8
2.5.2. Método do número da curva.....	10
3. METODOLOGIA	11
3.1. Escopo do sistema ESCOA.....	11
3.2. Método racional	12

3.2.1. Equação de Kirpich	16
3.2.2. Equação SCS – método cinemático.....	16
3.2.3. Equação de Ven Te Chow	19
3.2.4. Equação de Picking	19
3.2.5. Equação de Giandotti	19
3.2.6. Equação SCS Lag.....	19
3.2.7. Equação de Dodge.....	20
3.3. Método do número da curva	21
3.4. Representação das atividades executadas no Sistema ESCOA	26
3.4.1. Diagramas de atividade para a estimativa da vazão máxima	26
3.4.2. Diagramas de atividade para a estimativa da lâmina escoada.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1. Módulo de estimativa da vazão máxima.....	37
4.1.1. Informando a área da bacia e coeficiente de escoamento superficial.....	39
4.1.2. Utilizando o Plúvio 2.1	44
4.1.3. Calculando o tempo de concentração e a vazão máxima	46
4.1.3.1. Equação de Kirpich	47
4.1.3.2. Equação SCS – método cinemático.....	48
4.1.3.3. Equação Ven Te Chow.....	51
4.1.3.4. Equação de Picking	52
4.1.3.5. Equação de Giandotti	53
4.1.3.6. Equação SCS Lag.....	54
4.1.3.7. Equação de Dodge.....	57
4.1.3.8. Gerando o relatório do método racional.....	57
4.2. Módulo de estimativa da lâmina escoada.....	59
4.2.1. Importando o arquivo de dados de precipitação.....	59
4.2.2. Informando o AMC para os cinco primeiros dias da série.....	60

4.2.3. Definindo valores de CN para diversos períodos da série.....	61
4.2.4. Definindo valor de CN para períodos não especificados	64
4.2.5. Calculando a lâmina escoada.....	64
5. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de C recomendados por ASCE.....	13
Quadro 2 - Valores de C, recomendados pelo Soil Conservation Service	14
Quadro 3 - Valores de C, segundo adaptação do critério de Fruhling, adotados pela Prefeitura de São Paulo.....	14
Quadro 4 - Valores de C propostos pelo Colorado Highway Department	15
Quadro 5 - Velocidades médias de escoamento superficial ($m s^{-1}$).....	17
Quadro 6 - Coeficientes de rugosidade para diversas condições de superfície de canais de terra	18
Quadro 7 - Velocidades de escoamento superficial ($m s^{-1}$) em função da declividade (I) e tipo de cobertura vegetal.....	18
Quadro 8 - Características das bacias-base das equações para o cálculo do tempo de concentração	21
Quadro 9 - Valores de CN para bacias com ocupação agrícola para condições de umidade antecedente AMC II.....	23
Quadro 10 - Valores de CN para bacias com ocupação urbana para condições de umidade antecedente AMC II.....	24
Quadro 11 - Classes de umidade antecedente do solo conforme a chuva ocorrida nos cinco dias anteriores à chuva crítica, no período de crescimento da cultura	24
Quadro 12 - Correção do CN para condições iniciais de umidade diferentes da média (AMC II).....	25

Quadro 13 - Subdivisões pertinentes ao caminho percorrido pelo escoamento superficial	38
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica do ciclo hidrológico.	4
Figura 2 - Componentes associados do Método do Número da Curva.	21
Figura 3 - Diagrama de atividades para a escolha da grandeza a ser estimada.	26
Figura 4 - Diagrama de atividades da estimativa da vazão máxima.	27
Figura 5 - Diagrama de atividades para estimar o coeficiente de escoamento superficial C.	28
Figura 6 - Diagrama de atividades para preenchimento automático dos coeficientes.	28
Figura 7 - Diagrama de atividades da equação de Kirpich.	29
Figura 8 - Diagrama de atividades do método cinemático.	30
Figura 9 - Diagrama de atividades do método Ven Te Chow.	31
Figura 10 - Diagrama de atividades da equação Picking.	31
Figura 11 - Diagrama de atividades da equação Giandotti.	32
Figura 12 - Diagrama de atividades da equação SCS Lag.	33
Figura 13 - Diagrama de atividades da equação Dodge.	34
Figura 14 - Diagrama de atividades da estimativa da lâmina escoada.	35
Figura 15 - Tela inicial do sistema ESCOA.	36
Figura 16 - Tela inicial para estimativa da vazão máxima.	39

Figura 17 - Tela para estimativa da vazão máxima com o valor da área da bacia preenchido.....	40
Figura 18 - Valores de C propostos por ASCE.....	41
Figura 19 - Valores de C propostos pelo Soil Conservation Service – USDA.....	42
Figura 20 - Valores de C conforme o critério de Fruhling.	43
Figura 21 - Valores de C conforme o Colorado Highway Department.	44
Figura 22 - Tela do Plúvio 2.1 com a localização Palmas – Tocantins selecionada.	45
Figura 23 - Tela para estimativa da vazão máxima com os valores da área da bacia, do coeficiente de escoamento superficial, dos dados de precipitação e do período de retorno preenchidos.	46
Figura 24 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação de Kirpich para a estimativa do t_c	47
Figura 25 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se o método cinemático para a estimativa do t_c	48
Figura 26 - Valores de velocidade conforme Porto et al.	49
Figura 27 - Valores da velocidade para canais bem definidos (equação de Manning)...	50
Figura 28 - Valores da velocidade conforme Matos et al.	51
Figura 29 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se o método Ven Te Chow para a estimativa do t_c	52
Figura 30 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação Picking para a estimativa do t_c	53
Figura 31 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação Giandotti para a estimativa do t_c	54
Figura 32 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação SCS Lag para a estimativa do t_c	55
Figura 33 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação agrícola.....	56
Figura 34 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação urbana.....	56
Figura 35 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se equação Dodge para a estimativa do t_c	57
Figura 36 - Exemplo de relatório gerado pelo sistema para o cálculo da vazão máxima.	58
Figura 37 - Tela inicial da estimativa da lâmina escoada.	59

Figura 38 - Tela com mensagem de erro ao importar um arquivo com falhas.	60
Figura 39 - Tela de estimativa da lâmina escoada com o arquivo carregado e com a unidade antecedente dos cinco primeiros dias selecionada.	61
Figura 40 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação agrícola.....	62
Figura 41 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação urbana.....	63
Figura 42 - Vários períodos selecionados.	63
Figura 43 - Valor de CN para períodos não selecionados.	64
Figura 44 - Tabela completa, contendo os valores de CN e lâmina escoada para cada data.	65
Figura 45 - Mensagem de confirmação de exportação de arquivo.	66
Figura 46 - Arquivo exportado.	66

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de drenagem da bacia.
AMC	Antecedent Moisture Condition.
C	Coefficiente de escoamento superficial.
CN	Curva-Número.
H	Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.
ha	Hectare.
im	Intensidade máxima média de precipitação.
K, a, b, c	Parâmetros de ajuste à estação pluviométrica utilizada como base.
L	Comprimento do talvegue.
Li	Distância do trecho considerado.
n	Coefficiente de rugosidade.
pdf	Portable Document Format.
Qmax	Vazão máxima de escoamento superficial.
R	Raio hidráulico.
s	Declividade do fundo do canal.
S	Infiltração potencial.
S ₀	Declividade média do talvegue.
SCS	Soil Conservation Service.
t	Duração da precipitação.
T	Período de retorno.

t_c	Tempo de concentração.
v	Velocidade média.
V_i	Velocidade média no trecho.

RESUMO

SOUZA, Cristina D'Ornellas Filipakis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Sistema computacional para a estimativa do escoamento superficial.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadores: José Márcio Alves da Silva e Conceição Aparecida Previero.

O escoamento superficial consiste no processo de movimento da água sobre a superfície do solo e é parte integrante do ciclo hidrológico. Este processo possui algumas consequências negativas para o meio ambiente, pois a este pode estar associado a erosão hídrica, que além de reduzir a camada mais fértil do solo, também leva consigo corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas, que, além dos prejuízos ambientais, promove ainda financeiros para a atividade agrícola. Para que tais prejuízos sejam evitados, faz-se necessário conhecer o comportamento do escoamento superficial, e o primeiro passo neste sentido consiste em estimá-lo. As estimativas da vazão máxima e da lâmina escoada são essenciais para que ocorra um melhor planejamento de obras e ações a fim de evitar ou amenizar suas consequências. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema computacional que possibilitasse a estimativa da vazão máxima e da lâmina do escoamento superficial a partir dos métodos Racional e Número da Curva respectivamente. Para tanto, foram desenvolvidos diagramas de atividades que representassem as funcionalidades do sistema, contendo as diversas opções disponibilizadas para o usuário. Então, o sistema foi implementado utilizando o

ambiente de programação Delphi® 2006 e foi testado com dados fictícios de bacias hidrográficas. O desenvolvimento do sistema possibilitou a automatização dos cálculos da vazão máxima e da lâmina escoada, que envolvem muitas equações e variáveis, garantindo maior rapidez na obtenção dos valores e confiabilidade dos mesmos.

ABSTRACT

SOUZA, Cristina D'Ornellas Filipakis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Computacional system for estimating the runoff**. Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-advisers: José Márcio Alves da Silva and Conceição Aparecida Previero.

Runoff is the process of moving water on the soil surface and is part of the hydrological cycle. This process has some negative consequences for the environment, since this may be associated with water erosion, which also reduces the most fertile soil layer, also carries with lime, fertilizer and pesticides, which, in addition to environmental damage, promotes yet funding for agricultural activities. For such losses are avoided, it is necessary to understand the behavior of runoff, and the first step in this direction is to estimate it. Estimates of maximum flow and blade disposed are essential so that a better planning of works and actions to avoid or mitigate its consequences. The objective was to develop a software that would enable the estimation of maximum flow and blade surface runoff from the methods and Rational Curve Number respectively. It had been developed activity diagrams represent the functionality of the system, containing the various options available to the user. Then the system was implemented using the programming environment Delphi ® 2006 and was tested with dummy data of a watershed. The development of the system enabled the automation of calculations of maximum flow and blade disposed, which involve many variables and equations, ensuring greater speed in getting the value and reliability of them.

1. INTRODUÇÃO

A hidrologia consiste na ciência que estuda a ocorrência, circulação e distribuição da água na Terra. Engloba também o estudo das propriedades físicas e químicas da água, bem como sua interação com o meio ambiente (TUCCI, 2001).

Dentre as áreas de estudo da hidrologia destaca-se a que estuda o escoamento superficial, que trata do movimento da água sobre a superfície do solo. O escoamento superficial passa a ocorrer a partir do momento em que a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração da água no solo e em que a capacidade de armazenamento da água sobre a superfície do solo é excedida.

Uma bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para uma única seção de saída. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório. Segundo Medeiros et al. (2009), a hidrografia de uma bacia reflete a estrutura geológica, a evolução morfogenética regional, o clima e as intervenções antrópicas.

A ocupação das bacias hidrográficas pelo homem deu-se, no passado, de forma desordenada, visando apenas o benefício da população e não a manutenção dos recursos naturais. Segundo Tucci (2000), o desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido um impacto expressivo nos recursos hídricos. Um dos principais impactos tem ocorrido na drenagem urbana, sobretudo no aumento da frequência e da magnitude das inundações e na deteriorização ambiental.

A água, ao escoar pela superfície do solo, pode levar consigo partículas de solo, ocasionando a erosão hídrica. A erosão hídrica promove o assoreamento e a poluição de rios e reservatórios, prejudicando a vida aquática. Neste processo, a camada mais fértil do solo também é diminuída e compostos químicos utilizados para a correção do mesmo e defensivos agrícolas são levados com a água, causando prejuízos à exploração agrícola. Desta forma, conhecer o processo de formação e de contenção do escoamento superficial torna-se importante, para que prejuízos ambientais e financeiros possam ser reduzidos, ou até evitados.

Uma maneira de se reduzir as consequências associadas ao escoamento superficial é através da sua adequada estimativa, o que permite planejar meios de diminuir a vazão escoada ou de conter este escoamento, amenizando, assim, os problemas gerados por este processo. Existem diversos métodos para estimar o escoamento superficial. Dois deles são o método Racional, que visa estimar a vazão máxima do escoamento, e o método Número da Curva, que possibilita a obtenção da lâmina escoada. Embora sejam métodos que não envolvam grande complexidade de cálculo, a existência de um sistema computacional que execute tais cálculos trará benefícios para os profissionais da área, pois minimizará o tempo de obtenção das estimativas e possibilitará uma análise mais detalhada dos valores calculados.

Desta forma, o objetivo deste estudo consistiu em desenvolver um sistema computacional que permitisse estimar a vazão máxima e a lâmina escoada, por meio dos métodos Racional e Número da Curva, respectivamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O escoamento superficial (ES) consiste no deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Conforme Tucci (2001), o escoamento é regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade. O escoamento superficial é parte integrante do ciclo hidrológico, pois, da água que chega ao solo, parte infiltra e parte se acumula na superfície do solo, uma vez que sua capacidade de infiltração é limitada. O escoamento se inicia quando a taxa de infiltração da água no solo torna-se menor que a intensidade da precipitação e a capacidade de acumulação da água nas depressões do solo se esgota (SILVA et al., 2006).

2.1. Ciclo hidrológico

Segundo Tucci (2001), o ciclo hidrológico consiste no sistema de circulação da água entre a atmosfera e a superfície terrestre (Figura 1). A água tem seu movimento impulsionado pela energia solar, pela rotação terrestre e pela gravidade, e este movimento ocorre em dois sentidos. No sentido superfície-atmosfera, o fluxo da água ocorre em forma de vapor e no sentido atmosfera-superfície, o fluxo ocorre principalmente na forma de precipitação.

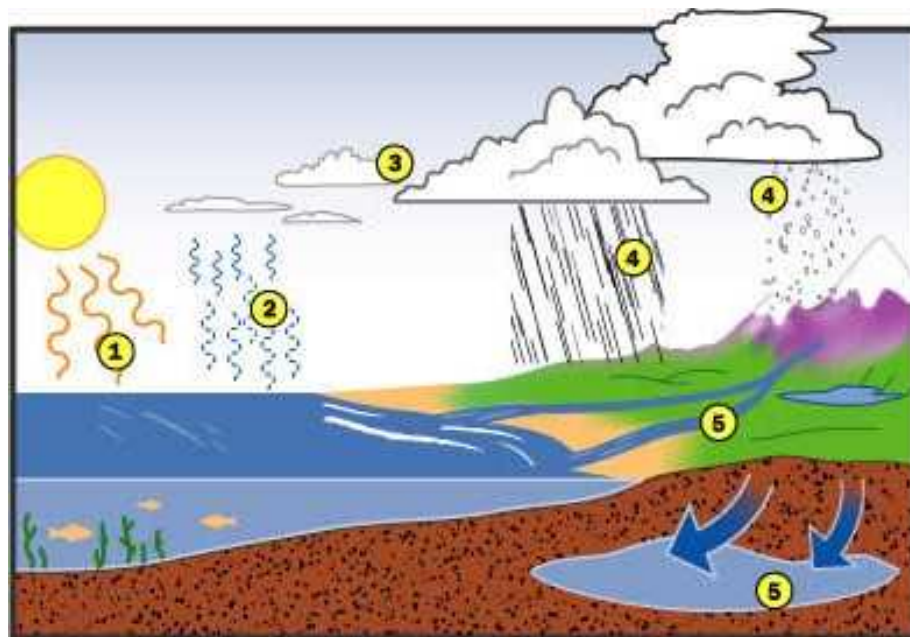


Figura 1 - Representação gráfica do ciclo hidrológico.

O fluxo da água sobre a superfície da terra é positivo (precipitação menos evapotranspiração), resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos. O fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação. O volume evaporado adicional se desloca para os continentes através do sistema de circulação da atmosfera e precipita, fechando o ciclo (TUCCI, 2001).

O ciclo hidrológico pode ser explicado iniciando-se pela incidência da energia solar sobre a superfície da terra (1), fazendo com que a água dos cursos d'água passe do estado líquido para o estado gasoso, processo chamado de evaporação (2). Além disso, os animais e a vegetação transpiram. A evaporação da água aliada à transpiração dos animais e vegetais é conhecida como evapotranspiração (SILVA, 2002).

Conforme Silva et al. (2006), a água evaporada tem sua temperatura diminuída à medida que atinge a atmosfera, e este fator provoca a formação de pequenas gotas de água, a chamada condensação. Com a ação dos ventos e das correntes atmosféricas, as gotas de água vão se unindo e formando as nuvens (3), até se tornarem pesadas demais e retornarem à superfície terrestre em forma de chuva, granizo ou neve (4). Ao retornar à superfície terrestre, a água atinge a vegetação, solo e cursos d'água, escoando para os lençóis subterrâneos, lagos, rios, mares e oceanos (5). A partir deste momento, a água é

exposta novamente à ação da radiação solar e, portanto, novamente ao processo de evapotranspiração (1).

No ciclo hidrológico, o escoamento pode se apresentar de três formas (PINTO et al., 1976):

- Escoamento superficial: corresponde à água que, após atingir o solo, acumula-se, e movimenta-se para áreas mais baixas, sendo este o tipo de escoamento a ser estudado neste trabalho;
- Escoamento subsuperficial: escoamento que ocorre na camada subsuperficial do solo, sendo difícil sua separação do escoamento superficial;
- Escoamento subterrâneo: representado pelo escoamento nos aquíferos, que, em épocas de estiagem, constituem a única forma de alimentação dos cursos d'água.

2.2. Processo de formação do escoamento superficial

O processo de ocorrência do escoamento superficial possui diversas fases, que ocorrem entre o início da precipitação e do escoamento. Com a ocorrência da precipitação, parte da água é interceptada pela vegetação, caso ela exista, parte cai diretamente sobre cursos d'água e parte cai sobre o solo, infiltrando-se (SILVA et al., 2006). Nesta etapa não há, portanto, contribuição para o escoamento superficial, pois a água que chega à vegetação é retida pela mesma e posteriormente evaporada e a água que chega ao solo infiltra.

A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, sendo que as taxas de infiltração e de escoamento superficial têm comportamentos inversos até se estabilizarem. Sob uma intensidade constante de chuva, à medida que a infiltração diminui, o escoamento aumenta, até que esse processo se estabilize (SPOHR et al., 2009).

Na segunda fase, como a capacidade de retenção da água pela vegetação já se encontra esgotada e a taxa de infiltração da água no solo está reduzida, a água que chega ao solo começa a se acumular nas depressões rasas do mesmo, o que ocorre a partir do momento em que a intensidade de precipitação excede à capacidade de infiltração. Se a precipitação continuar, a água acumulada forma uma lâmina sobre o solo, que começa a se mover, iniciando o escoamento superficial. Nesta fase, a água infiltrada move-se para a camada mais profunda do solo, alimentando os aquíferos subterrâneos, enquanto que a parcela que contribui para o escoamento move-se em direção aos talwegues,

alimentando os cursos d'água. Esse processo continua até que a precipitação cesse (SILVEIRA, 2001).

No início, o escoamento superficial apresenta-se como um filete de água que, com a continuidade da precipitação, vai se tornando mais espesso, até se juntar em cursos d'água. Segundo Pinto et al. (1976), a trajetória da água que escoar é determinada, principalmente, pelas linhas de maior declive do terreno e pelos obstáculos existentes.

2.3. Fatores que influenciam o escoamento superficial

O escoamento superficial pode ser influenciado por fatores agroclimáticos. Quanto maior for a duração e a intensidade da precipitação, maior é a tendência de ocorrência de escoamento superficial. Dentre os fatores agroclimáticos podem também ser citados a cobertura do solo e o tipo de uso do solo. A evapotranspiração também influencia este processo porque quanto maior for esta, menor será a umidade do solo no momento da precipitação, o que aumenta a capacidade de infiltração da água no solo (PRUSKI et al., 2004).

Fatores fisiográficos também alteram o comportamento do escoamento superficial, pois quanto maior a área e a declividade da bacia, maiores serão o volume e a velocidade do escoamento superficial, o que contribui para o aumento da capacidade de transporte das partículas pelo escoamento superficial e do próprio desprendimento das partículas do solo, pelo aumento da tensão cisalhante associada ao escoamento (COGO et al., 2003). A forma da bacia hidrográfica também interfere na vazão de escoamento superficial. Quanto mais circular for uma bacia, maior a tendência de concentração de água para contribuição ao escoamento superficial. Portanto, dentre os fatores fisiográficos destacam-se a área e a declividade da bacia hidrográfica, as características do solo, a topografia, a densidade de drenagem e a existência de obras hidráulicas para contenção do escoamento superficial (PRUSKI et al., 2004).

2.4. Consequências do escoamento superficial

No processo de escoamento superficial, a água escoada leva consigo partículas de solo e retira sua camada mais fértil, que contém maior quantidade de matéria orgânica. A presença de matéria orgânica constitui fator importante para as condições físicas, químicas e biológicas do solo, sendo um dos principais parâmetros de avaliação

da qualidade e fertilidade do mesmo (SOUZA et al., 2007). Montebeller (2009) cita que a perda da camada superficial do solo poderá ocasionar, nas próximas décadas, a insuficiente produção de alimentos para alimentar a população mundial.

Além da camada superficial do solo, o escoamento transporta também sementes, corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas, trazendo prejuízos financeiros para a área agrícola, podendo causar a contaminação de cursos d'água e restringir ou, até mesmo, impedir a utilização dos recursos hídricos. Segundo Oliveira et al. (2005), o escoamento superficial é considerado, atualmente, uma das principais formas de contaminação dos mananciais de água superficiais, devido, justamente, ao transporte de sedimentos e produtos químicos. Estes últimos podem ser responsáveis pela deteriorização imediata da qualidade da água dos rios, ao passo que o transporte de sedimentos traz impactos negativos, como o assoreamento de rios e reservatórios.

Segundo Oliveira et al. (2005), a chuva e o escoamento superficial são os agentes energéticos que acarretam a ocorrência da erosão do solo. A erosão hídrica consiste no desprendimento e transporte de partículas do solo, causados pela ação do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial. A erosão hídrica ocorre quando há ruptura do equilíbrio natural existente no solo, e as forças advindas de fatores climáticos, como a chuva e o vento, passam a ser suficientes para desequilibrar esse sistema (PEREIRA et al., 2003).

Conforme Reichert e Cabeda (1992), o processo de ocorrência da erosão hídrica é composto por três fases: desagregação, transporte e deposição. A primeira é causada pelo impacto das gotas de chuva sobre o solo, a segunda, pelo processo de escoamento superficial, e a terceira pela diminuição da velocidade da água escoada.

A ocorrência e intensidade da erosão hídrica dependem de um conjunto de fatores, como a duração e intensidade da chuva, a capacidade do solo de reter água, a declividade do terreno, os métodos de cultivo utilizados e a densidade da cobertura vegetal (OLIVEIRA et al., 2005). Também, a formação de crosta decorrente do impacto das gotas da chuva é um dos fatores que pode reduzir acentuadamente a infiltração e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial, contribuindo para a erosão do solo (BRANDÃO et al., 2007).

A erosão é a mais extensiva, prejudicial e preocupante forma de degradação do solo (VOLK, 2006), sendo responsável direto pela perda de nutrientes e redução da produtividade das culturas (MAMO; BUBENZER, 2001, citados por SILVA et al., 2009), além de causar destruição de habitats aquáticos e redução da capacidade de

armazenamento de reservatórios (RAUHOFER et al., 2001, citados por SILVA et al., 2009), devido ao transporte de agroquímicos e partículas de solo.

Segundo Pereira (2000), as perdas por erosão tendem a elevar os custos de produção, tendo em vista a necessidade de aumento do uso de corretivos e fertilizantes e a redução no rendimento operacional das máquinas agrícolas. O processo de erosão hídrica acarreta prejuízos agrícolas, uma vez que o solo se deteriora, podendo ficar impróprio para o cultivo ou precisando de um intenso trabalho mecânico para permitir a sua utilização na agricultura. Conforme Pereira et al. (2003), no Brasil, localizado em grande parte na região tropical, a erosão hídrica apresenta maior interesse por ser de ocorrência mais freqüente, processar-se com maior rapidez e causar grandes prejuízos não só ao setor agrícola, como também a diversas outras atividades econômicas e ao próprio meio ambiente.

2.5. Modelos para estimativa do ES

Existem várias razões para se estimar o escoamento superficial. Dentre elas podem ser citadas a falta de dados observados em bacias hidrográficas, como dados de vazão, e a importância de se conhecer esse processo para um maior controle de suas conseqüências. Há diversos métodos para se estimar o escoamento superficial, porém, com o decorrer do tempo, alguns deles se popularizaram entre os projetistas, como o método Racional e o método do Número da Curva, pela facilidade de utilização e de obtenção das informações requeridas.

Segundo Tassi et al. (2006), um dos parâmetros mais importantes no processo de controle do escoamento superficial diz respeito ao uso e cobertura do solo, que possui grande influência na determinação da precipitação efetiva. No caso de uso do Método Racional, o parâmetro relacionado com a caracterização do uso e ocupação do solo é o “Coeficiente de Escoamento”. No Método do Número da Curva, o parâmetro que caracteriza o uso e ocupação do solo é o CN (Curva-Número).

2.5.1. Método racional

O método Racional possui este nome pela coerência na análise dimensional das variáveis, sendo o mais simples e mais usual em pequenas áreas. É um modelo empírico cujo objetivo é aplicar um redutor na precipitação intensa, chamado Coeficiente de

Escoamento Superficial, significando um percentual do total precipitado que esco superficialmente. Este redutor é influenciado pela cobertura vegetal, classe de solos e declividade.

A vazão máxima de uma bacia pode ser determinada com base na observação da vazão em períodos longos na bacia ou na transformação de precipitação em vazão (TUCCI, 2001). A estimativa da vazão máxima escoada em uma bacia hidrográfica pode ser realizada pelo método Racional, que leva em consideração o coeficiente de escoamento superficial, a intensidade máxima média de precipitação e a área de drenagem da bacia. Este método é apropriado para estimativas em bacias urbanas, com proporções de áreas impermeáveis altas e que não excedam 500 ha, pois o método apresenta limitações para bacias maiores, por considerar, por exemplo, que a precipitação ocorre uniformemente em toda a área da bacia (SMEDEMA; RYCROFT, 1983, citados por SILVA et al., 2006). Se o método for utilizado para estimativas em áreas agrícolas, a recomendação é que a área da bacia não exceda 200 ha (PRUSKI et al., 2004).

Conforme Pruski et al. (2004), o método Racional está fundamentado nos seguintes princípios:

- a) as precipitações que geram o escoamento superficial a ser estimado devem ter duração curta e alta intensidade;
- b) a vazão máxima de escoamento superficial ocorrerá quando a duração da chuva for igual ao tempo de concentração. Vale ressaltar que esta situação somente ocorre quando a bacia é pequena e com formato aproximado ao circular, pois desta forma, toda a área da bacia contribui para a formação do escoamento superficial na seção de deságue;
- c) pelo reduzido tamanho da bacia, considera-se que a precipitação ocorre uniformemente em toda a sua extensão;
- d) durante um curto período de tempo com uma precipitação com alta intensidade, considera-se que a taxa de infiltração permanecerá constante, pois nesta situação o solo encontra-se saturado;
- e) deverá ser utilizado um único coeficiente de escoamento superficial, estimado com base nas características da bacia.

Por considerar tais princípios, o método Racional ignora a complexidade do processo de escoamento superficial, pois não avalia o armazenamento de água na superfície do solo em relação às variações da intensidade da precipitação e do

coeficiente de escoamento superficial. Também não permite que sejam calculados o volume do escoamento superficial e a distribuição temporal das vazões (PRUSKI et al., 2004).

O método apresenta, portanto, problemas com relação aos seus resultados, se não forem observadas as características das bacias cujos escoamentos superficiais almeja-se estimar. Porém, pela simplicidade de utilização do método, o mesmo tornou-se amplamente utilizado para tal fim (BRAGA, 2000).

2.5.2. Método do número da curva

Outro parâmetro que pode ser estimado para avaliação do escoamento superficial é a lâmina escoada. A lâmina escoada consiste no volume escoado de água por unidade de área da bacia hidrográfica e pode ser obtida através do método do Número da Curva, proposto pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. A equação do escoamento utilizada no método foi desenvolvida por Victor Mockus e outros por volta de 1947 (SERVIÇO DE CONSERVAÇÃO DE SOLOS – SCS, 2008).

O método Número da Curva é um modelo que relaciona dados de precipitação e da bacia hidrográfica e, por este motivo, exige o conhecimento prévio da precipitação e do complexo hidrológico solo-vegetação. Foi proposto a partir de estudos realizados em pequenas bacias experimentais com vários tipos e usos de solo e técnicas de plantio. Por ter sido testado com dados de chuvas diárias, o método apresenta melhores resultados para precipitações de curta duração, de 24 horas ou menos (TASSI et al., 2006).

Este método apresenta como vantagem ter fácil aplicação, pois utiliza como entrada informações relativas às condições do solo, da vegetação e de registros diários de precipitação, dados frequentemente disponíveis para a maioria das bacias hidrográficas. Entretanto, conforme Braga (2000), o método do número da curva apresenta limitações, pois o método não estabelece uma relação contínua entre as variações de umidade do solo e o número da curva, podendo resultar em valores irreais do escoamento superficial.

As estimativas da vazão máxima e da lâmina escoada permitem que seja avaliado o comportamento do escoamento superficial sobre uma determinada área, para que, então, sejam planejadas ações preventivas e para sua contenção.

3. METODOLOGIA

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um sistema que permita a estimativa da vazão máxima e da lâmina escoada utilizando os métodos Racional e Número da Curva, respectivamente. A implementação do sistema, denominado ESCOA, foi desenvolvida utilizando o ambiente de programação Delphi[®] 2006. Segundo Cantú (2000), este ambiente consiste em uma boa escolha pela facilidade de programação, baseada em formulários, por trabalhar com o paradigma orientado a objetos, por possuir suporte a banco de dados e por permitir a utilização de componentes.

3.1. Escopo do sistema ESCOA

O sistema desenvolvido consiste em um aplicativo destinado aos cálculos da vazão máxima e da lâmina escoada, utilizando, respectivamente, os métodos Racional e Número da Curva. Para tanto, o sistema ESCOA apresenta-se dividido em dois módulos: um destinado à estimativa da vazão máxima de escoamento superficial; e outro destinado a simulações contínuas durante um período de tempo, da lâmina de escoamento superficial, sendo que para este último módulo séries históricas de dados de precipitação devem ser importadas pelo sistema e utilizadas para o cálculo das lâminas escoadas para cada dia referente à série histórica analisada.

Na estimativa da vazão máxima, após o usuário fornecer os dados necessários para o cálculo, o sistema emite um relatório contendo todas as informações fornecidas

da bacia hidrográfica e o valor da vazão máxima escoada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. No cálculo da lâmina escoada, o usuário deverá importar, através do sistema, um arquivo em formato Access (.mdb), contendo a série histórica de dados de precipitação e, a partir deste arquivo, o sistema calcula a lâmina escoada para cada dia da série e dá a opção do usuário exportar um arquivo texto contendo, para cada dia, os respectivos valores de precipitação, CN e lâmina escoada.

3.2. Método racional

O método Racional é utilizado para estimar a vazão máxima de escoamento superficial a partir de dados da precipitação ocorrida em uma bacia hidrográfica, com área compreendida entre 50 a 500 ha (PRUSKI et al., 2004). A vazão máxima de escoamento é calculada pela equação:

$$Q_{max} = \frac{C i_m A}{360} \quad (1)$$

em que Q_{max} é a vazão máxima de escoamento superficial, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; C, coeficiente de escoamento superficial, adimensional; i_m , intensidade máxima média de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração (t_c) da bacia, mm h^{-1} ; e A, área de drenagem da bacia, ha.

A vazão é o volume que atravessa uma seção transversal por unidade de tempo, geralmente sendo expressa em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. A vazão máxima é utilizada no método Racional porque caracteriza a situação mais extrema em termos de volume d'água escoado por unidade de tempo.

A área drenada (A) consiste na área da bacia de contribuição, expressa em hectares (ha) e é uma variável que pode ser fornecida com boa precisão, com o auxílio de mapas ou fotografias aéreas.

A relação entre o volume escoado (ES) e o volume total precipitado (PT) caracteriza o coeficiente de escoamento superficial (C), conforme a equação:

$$C = \frac{ES}{PT} \quad (2)$$

Conforme Tucci (2000), o coeficiente de escoamento deve variar com a magnitude da precipitação, já que à medida que aumenta a quantidade precipitada as perdas iniciais e a capacidade de infiltração é atendida, desta forma a proporção do escoamento superficial aumenta, o que resulta em um maior coeficiente de escoamento. Portanto, os valores para C podem variar consideravelmente conforme a duração e a intensidade da precipitação, a quantidade de água interceptada, infiltrada e escoada, entretanto, estes aspectos não são normalmente contemplados quando da quantificação do coeficiente de escoamento superficial.

Uma das formas de quantificar o coeficiente de escoamento superficial é utilizando os valores propostos por vários autores, sendo alguns deles apresentados nos Quadros 1 a 4.

Quadro 1 - Valores de C recomendados por ASCE

Superfície		C	
		Intervalo	Valor Esperado
Pavimento	Asfalto	0,70 – 0,95	0,83
	Concreto	0,80 – 0,95	0,88
	Calçadas	0,75 – 0,85	0,80
	Telhado	0,75 – 0,95	0,85
Grama em solo arenoso	Plano (2%)	0,05 – 0,10	0,08
	Declividade média (2 a 7%)	0,10 – 0,15	0,13
	Declividade Alta (7%)	0,15 – 0,20	0,18
Grama em solo argiloso	Plano (2%)	0,13 – 0,17	0,15
	Declividade média (2 a 7%)	0,18 – 0,22	0,20
	Declividade Alta (7%)	0,25 – 0,35	0,30

Fonte: ASCE (1969, citado por TUCCI, 2001).

Quadro 2 - Valores de C, recomendados pelo Soil Conservation Service

Tipo de cobertura do solo	Declividade (%)	Textura do solo		
		Arenosa	Fraca	Argilosa
Florestas	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,15	0,35	0,55
	10 – 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,60	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80

Fonte: Soil Conservation Service – SCS (2008).

Quadro 3 - Valores de C, segundo adaptação do critério de Fruhling, adotados pela Prefeitura de São Paulo

Zonas	C
Edificações muito densas: áreas centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 – 0,95
Edificações não muito densas: área adjacente ao centro, de menor densidade de habitantes, porém com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 – 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: áreas residenciais com construções cerradas e ruas pavimentadas	0,50 – 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: áreas residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,25 – 0,50
Subúrbios com alguma edificação: áreas de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção	0,10 – 0,25
Matas, parques e campo de esportes: áreas rurais, verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados e campos de esporte sem pavimentação	0,05 – 0,20

Fonte: Wilken (1978, citado por PRUSKI et al., 2004).

Quadro 4 - Valores de C propostos pelo Colorado Highway Department

Características da bacia	C
Superfícies impermeáveis	0,90 – 0,95
Terreno estéril montanhoso	0,80 – 0,90
Terreno estéril ondulado	0,60 – 0,80
Terreno estéril plano	0,50 – 0,70
Prados, campinas, terreno ondulado	0,40 – 0,65
Matas decíduas, folhagem caduca	0,35 – 0,60
Matas coníferas, folhagem permanente	0,25 – 0,50
Pomares	0,15 – 0,40
Terrenos cultivados em zonas altas	0,15 – 0,40
Terrenos cultivados em vales	0,10 – 0,30

Fonte: Pruski et al. (2004).

A intensidade máxima média da precipitação (i_m) é calculada pela equação 3, que relaciona intensidade, duração e frequência de precipitação da região onde se situa a bacia hidrográfica.

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

em que T é o período de retorno, anos; t, duração da precipitação, min; e K, a, b, c, parâmetros de ajuste à estação pluviométrica utilizada como base, $\text{mm min}^c \text{ h anos}^a$, adimensional, min e adimensional, respectivamente.

O período de retorno é adotado, no método Racional, admitindo-se que o T associado à Q_{\max} seja igual ao da precipitação que a provoca, entretanto, a escolha do período de retorno dependerá também da obra que será construída.

O tempo de concentração consiste no menor tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua simultaneamente para o escoamento superficial. Esse tempo é adotado, no método racional, como sendo o tempo de duração da precipitação, e sofre a influência de diversos fatores, como a área da bacia, o comprimento e a declividade do canal mais longo (principal), forma da bacia, declividade média do terreno, declividade e comprimento dos efluentes, rugosidade do

canal, tipo de cobertura vegetal e características da precipitação (PRUSKI et al., 2004). Portanto, o tempo de concentração é variável, pois depende de diversos fatores e o seu valor pode ser calculado a partir de equações experimentais e que são utilizadas no cálculo do tempo de concentração.

3.2.1. Equação de Kirpich

A equação de Kirpich, conforme Porto et al. (2000, citados por PRUSKI et al., 2004), foi obtida a partir de estudos de sete pequenas bacias agrícolas do Tennessee, com áreas menores que 0,5 km² e declividade entre 3 e 10%, e é expressa por

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (4)$$

em que t_c é tempo de concentração, min; L , comprimento do talvegue, km; e H , diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue, m.

3.2.2. Equação SCS – método cinemático

A Equação SCS parte do princípio que o tempo de concentração de uma bacia pode ser calculado somando-se os tempos de deslocamento nos diversos trechos do talvegue e é expressa por

$$t_c = \frac{1000}{60} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i} \quad (5)$$

em que L_i é distância do trecho considerado, km; e V_i , velocidade média no trecho, m s⁻¹.

Nesta equação, o talvegue principal é dividido em n trechos e, para cada trecho, é estimada a velocidade de escoamento. Para os trechos situados na parte superior das bacias, em locais nos quais predominam o escoamento sobre o terreno e em canais mal definidos, a velocidade V_i pode ser definida por meio dos valores do Quadro 5 (PORTO et al., 2000).

Quadro 5 - Velocidades médias de escoamento superficial (m s⁻¹)

Descrição do escoamento		Declividade (%)			
		0 – 3	4 – 7	8 – 11	> 12
Sobre a superfície do terreno	Florestas	0 – 0,5	0,5 – 0,8	0,8 – 1,0	> 1,0
	Pastos	0 – 0,8	0,8 – 1,1	1,1 – 1,3	> 1,3
	Áreas cultivadas	0 – 0,9	0,9 – 1,4	1,4 – 1,7	> 1,7
	Pavimentos	0 – 2,6	2,6 – 4,0	4,0 – 5,2	> 5,2
Em canais	Mal definidos	0 – 0,6	0,6 – 1,2	1,2 – 2,1	> 2,1
	Bem definidos	Usar equação de Manning			

No caso de talvegues dispendo de calhas bem definidas ou de canalizações, adota-se a equação de Manning, que é dada por

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

em que v é velocidade média, m s⁻¹; n , coeficiente de rugosidade, adimensional; R , raio hidráulico, m; e s , declividade do fundo do canal, m km⁻¹.

Para a definição do coeficiente de rugosidade podem ser considerados os valores apresentados no Quadro 6.

Considerando os diferentes tipos de cobertura vegetal e declividade do solo, Matos et al. (2000) propõem as equações ajustadas para o cálculo da velocidade de escoamento, apresentadas no Quadro 7.

Quadro 6 - Coeficientes de rugosidade para diversas condições de superfície de canais de terra

Características do canal		Coeficiente de rugosidade (n)		
		Mínimo	Normal	Máximo
Canal de terra retilíneo e uniforme	Limpo, recentemente construído	0,016	0,018	0,020
	Limpo, mas já tendo sofrido intemperismo	0,018	0,022	0,025
	Escascalhado, seção uniforme, limpo	0,022	0,025	0,030
	Com grama, poucas ervas daninhas	0,022	0,027	0,033
Canal de terra sinuoso	Sem vegetação	0,023	0,025	0,030
	Grama, algumas ervas daninhas	0,025	0,030	0,033
	Ervas daninhas densas, plantas aquáticas em canas profundos	0,030	0,035	0,040
	Fundo em terra e lados escascalhados	0,028	0,030	0,035
	Fundo em cascalho e taludes com ervas daninhas	0,025	0,035	0,040

Quadro 7 - Velocidades de escoamento superficial ($m s^{-1}$) em função da declividade (I) e tipo de cobertura vegetal

Tipo de cobertura vegetal	Equações
Floresta com grande quantidade de resíduos sobre a superfície	$V = 0,0729 I^{0,5051}$
Solo com mínimo cultivo ou em pousio	$V = 0,1461 I^{0,4920}$
Pastagem de gramínea, gramados	$V = 0,2193 I^{0,4942}$
Solo semidescoberto (com pouca cobertura)	$V = 0,3073 I^{0,4985}$
Canais com vegetação	$V = 0,4528 I^{0,5011}$
Áreas pavimentadas, escoamento e calhas rasas	$V = 0,6078 I^{0,4976}$

3.2.3. Equação de Ven Te Chow

A equação de Ven Te Chow é recomendada para o cálculo do tempo de concentração para bacias de até 24,28 km², sendo os dados para o ajuste da equação obtidos em bacias de Illinois, EUA. Esta equação resulta no tempo de concentração em minutos, e é expressa por:

$$t_c = 52,64 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,64} \quad (7)$$

em que S_0 é a declividade média do talvegue, m km⁻¹.

3.2.4. Equação de Picking

A equação de Picking possibilita o cálculo do tempo de concentração pela equação:

$$t_c = 51,79 \left(\frac{L^2}{S_0} \right)^{1/3} \quad (8)$$

3.2.5. Equação de Giandotti

A equação de Giandotti calcula o tempo de concentração em função da área da bacia, do seu comprimento e diferença de nível, conforme a equação:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad (9)$$

3.2.6. Equação SCS Lag

A equação SCS Lag é adequada para o cálculo do t_c para bacias rurais com áreas de drenagem até 8 km². A equação apresenta resultados compatíveis com as demais equações para valores de CN próximos a 100 e valores de comprimento do talvegue inferiores a 10 km. Como o t_c é muito dependente do CN, a equação é aplicável

a situações em que o escoamento sobre a superfície do terreno é predominante, e é dada por:

$$t_c = 3,42 L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} S_0^{-0,5} \quad (10)$$

3.2.7. Equação de Dodge

A equação de Dodge foi determinada a partir de dados de 10 bacias rurais com áreas de 140 a 930 km² e, portanto, supõe-se que seus parâmetros reflitam melhor condições de escoamentos em canais.

$$t_c = 21,88A^{0,41} S_0^{-0,17} \quad (11)$$

Conforme as equações apresentadas para o cálculo do tempo de concentração, as características mais utilizadas são o comprimento e a declividade do curso d'água principal da bacia. É difícil dizer qual método é mais preciso em determinada bacia, pois todas foram obtidas para condições particulares, apresentadas no Quadro 8. Dentre estas, entretanto, a de uso mais freqüente é a proposta por Kirpich, apesar de a mesma ser conservadora e ter tendência a subestimar o valor de t_c e, por conseqüência, superestimar a intensidade de precipitação e a vazão (PRUSKI et al., 2004). Deve-se ressaltar que as características fisiográficas da bacia devem ser previamente estudadas e determinadas, com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas, de fotografias aéreas e visitas à área do projeto, com o objetivo de se conhecer a ocupação atual da bacia, as classes de solo predominantes e características gerais da cobertura vegetal. Este estudo preliminar é de suma importância para uma boa escolha de coeficientes do escoamento superficial e da equação adequada para o cálculo do tempo de concentração.

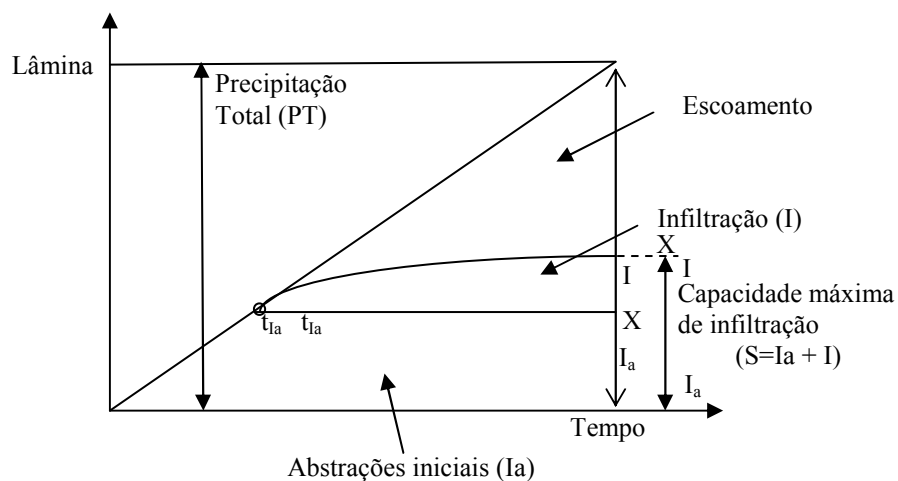
Quadro 8 - Características das bacias-base das equações para o cálculo do tempo de concentração

Equação	Local	N.º de bacias	Área (km ²)	Declividade (%)	Comprimento do Talvegue (L)	Tipo
Kirpich	EUA	6 a 7	< 0,45	3 a 10	< 1,2	Rural
SCS Método Cinemático	EUA	-	-	-	-	Urbana Rural
Ven Te Chow	EUA	20	1,1/19	-	-	Rural
Picking	-	-	-	-	-	Rural
Giandotti	Itália	-	-	-	-	Rural
SCS Lag	EUA	-	< 8,1	-	-	Rural
Dodge	Irlanda	10	140/930	-	-	Rural

Fonte: Silveira (2005).

3.3. Método do número da curva

O Método do Número da Curva foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solo dos Estados Unidos (SCS, 2008) e permite que seja estimada a lâmina de escoamento superficial a partir de dados da bacia e da precipitação da região. Os componentes associados ao método estão representados na Figura 2.



Fonte: SCS (2008).

Figura 2 - Componentes associados do Método do Número da Curva.

Pode-se observar na Figura 2 que a precipitação cresce a uma taxa constante com o tempo. O tempo t_{ia} marca o momento em que as abstrações iniciais, ou seja, toda precipitação que antecede o escoamento superficial, envolvendo interceptação pela cobertura vegetal, o armazenamento superficial e a infiltração ocorrida durante a ocorrência destes processos, são preenchidas.

A partir de estudos feitos pelo SCS (2008), a equação obtida para a estimativa do escoamento superficial é:

$$ES = \frac{(PT-0,2S)^2}{(PT+0,8S)} \quad (12)$$

em que S é a infiltração potencial, mm.

Na equação 12, quando o valor de $PT-0,2S$ é igual ou inferior a zero, o escoamento superficial também é assumido como zero.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

Para que este método seja utilizado, dados da precipitação da área estudada devem ser conhecidos, além do valor do número da curva (CN), obtido pelos Quadros 9 e 10. Conforme Mata-Lima et al. (2007), o parâmetro CN procura definir em um valor numérico a influência das condições da área estudada no comportamento do escoamento superficial. A atribuição do CN está associada à constituição geológica da área e ao tipo de ocupação e uso do solo. O valor do número da curva deve variar entre 1 e 100 e é influenciado pelo uso e manejo do solo, pelo tipo de solo, pelas condições hidrológicas e pelas condições iniciais de umidade do mesmo.

Os tipos de solo citados nos Quadros 9 e 10 possuem as seguintes características (SCS, 2008):

- Solo A: geralmente arenoso, com alta taxa de infiltração quando completamente úmido, baixo potencial de escoamento e perfil profundo;
- Solo B: moderada profundidade e taxa de infiltração quando totalmente úmido;
- Solo C: solo argiloso, com uma camada de impedimento à infiltração e baixa taxa de infiltração quando completamente úmido;
- Solo D: perfil raso, com camada impermeável, baixa taxa de infiltração e elevado potencial de escoamento.

O valor de C selecionado nos Quadros 9 e 10 refere-se a solos Classe AMC II, ou seja, aqueles que receberam de 35 a 52,5 mm de chuva ocorrida nos últimos cinco dias. No Quadro 11 estão apresentadas as outras classes de umidade do solo.

Quadro 9 - Valores de CN para bacias com ocupação agrícola para condições de umidade antecedente AMC II

Uso do solo	Tratamento	Condição hidrológica	Tipo de solo			
			A	B	C	D
Sem cultivo	Fileiras retas		77	86	91	94
		Má	72	81	88	91
Cultivo em fileiras	Fileiras retas	Boa	67	78	85	89
		Má	70	79	84	88
	Com curvas de nível	Boa	65	75	82	86
		Má	66	74	80	82
	Com curvas de nível e terraços	Boa	62	71	78	81
		Má	65	76	84	88
Cultivo em fileiras estreitas	Fileiras retas	Boa	63	75	83	87
		Má	63	74	82	85
	Com curvas de nível	Boa	61	73	81	84
		Má	61	72	79	82
	Com curvas de nível e terraços	Boa	59	70	78	81
		Má	66	77	85	89
Leguminosas em fileiras estreitas	Fileiras retas	Boa	58	72	81	85
		Má	64	75	83	85
	Com curvas de nível	Boa	55	69	78	83
		Má	63	73	80	83
	Com curvas de nível e terraços	Boa	51	67	76	80
		Má	68	79	86	89
Pastagens para pastoreio	Fileiras retas	Regular	49	69	79	84
		Boa	39	61	74	80
		Má	47	67	81	88
	Com curvas de nível	Regular	25	59	75	83
		Boa	6	35	70	79
		Má	45	66	77	83
Floresta	Fileiras retas	Regular	36	60	73	79
		Boa	25	55	70	77
		Má	45	66	77	83

Fonte: Mockus (1972, citado por PRUSKI et al., 2004).

Quadro 10 - Valores de CN para bacias com ocupação urbana para condições de umidade antecedente AMC II

Utilização ou cobertura		Tipo de solo			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Terrenos baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Florestas com cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe e cemitérios, todos e, boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva em 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes (m ²)	% de área impermeável				
< 500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltos com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	Com paralelepípedo	76	85	89	91
	De terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (2001).

Quadro 11 - Classes de umidade antecedente do solo conforme a chuva ocorrida nos cinco dias anteriores à chuva crítica, no período de crescimento da cultura

Classes	Chuva ocorrida nos cinco dias anteriores à chuva crítica (mm)
AMC I	0 – 35
AMC II	35 – 52,5
AMC III	> 52,5

Fonte: Tucci (2001).

Quando o solo não se apresentar na classe AMCII, o valor de C deverá ser corrigido conforme indicado no Quadro 12.

Quadro 12 - Correção do CN para condições iniciais de umidade diferentes da média (AMC II)

Valores médios correspondentes a AMC II	Valores corrigidos para AMC I	Valores corrigidos para AMC III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13

Fonte: Tucci (2001).

O cálculo do escoamento superficial utilizando-se os métodos citados torna-se dispendioso, pois envolve muitas variáveis e requer uma atenção especial na escolha dos valores a serem adotados nas equações. A existência de um sistema computacional para realizar tais estimativas agiliza a obtenção das estimativas de escoamento superficial e torna este processo mais preciso.

3.4. Representação das atividades executadas no Sistema ESCOA

Para melhor compreensão do sistema desenvolvido neste trabalho e do fluxo de informações no mesmo, desenvolveram-se diagramas de atividades, que apresentam a sequência de atividades que o usuário deverá executar para utilizar o sistema. Na Figura 3 encontra-se o diagrama de atividades que representa as opções do usuário ao acessar o sistema, que são estimar a vazão máxima ou a lâmina escoada. Ao escolher a opção *Vazão Máxima* (A), o usuário realizará as atividades apresentadas na seção 3.4.1, e ao escolher a opção *Lâmina Escoada* (B), as representadas na seção 3.4.2.

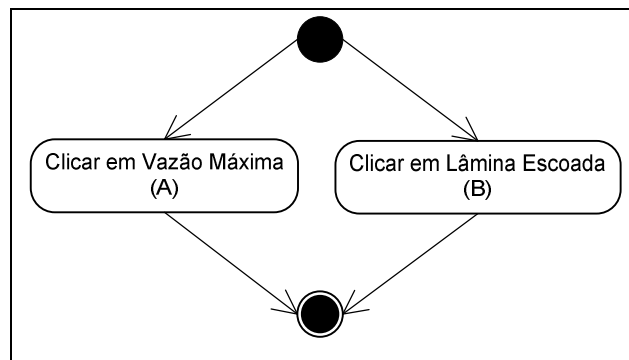


Figura 3 - Diagrama de atividades para a escolha da grandeza a ser estimada.

3.4.1. Diagramas de atividade para a estimativa da vazão máxima

O primeiro diagrama de atividades desenvolvido é o apresentado na Figura 4, que representa a sequência geral das atividades que devem ser realizadas no sistema para que a vazão máxima seja estimada, através do método Racional.

Na Figura 4 pode ser observado que o usuário deverá, após clicar em *Vazão Máxima*, o usuário deverá informar os valores para a área da bacia, informar ou selecionar o valor do coeficiente de escoamento Superficial (C), informar os dados de precipitação (D) e o período de retorno e, por fim, informar os dados necessários para o cálculo da intensidade máxima média de precipitação (E).

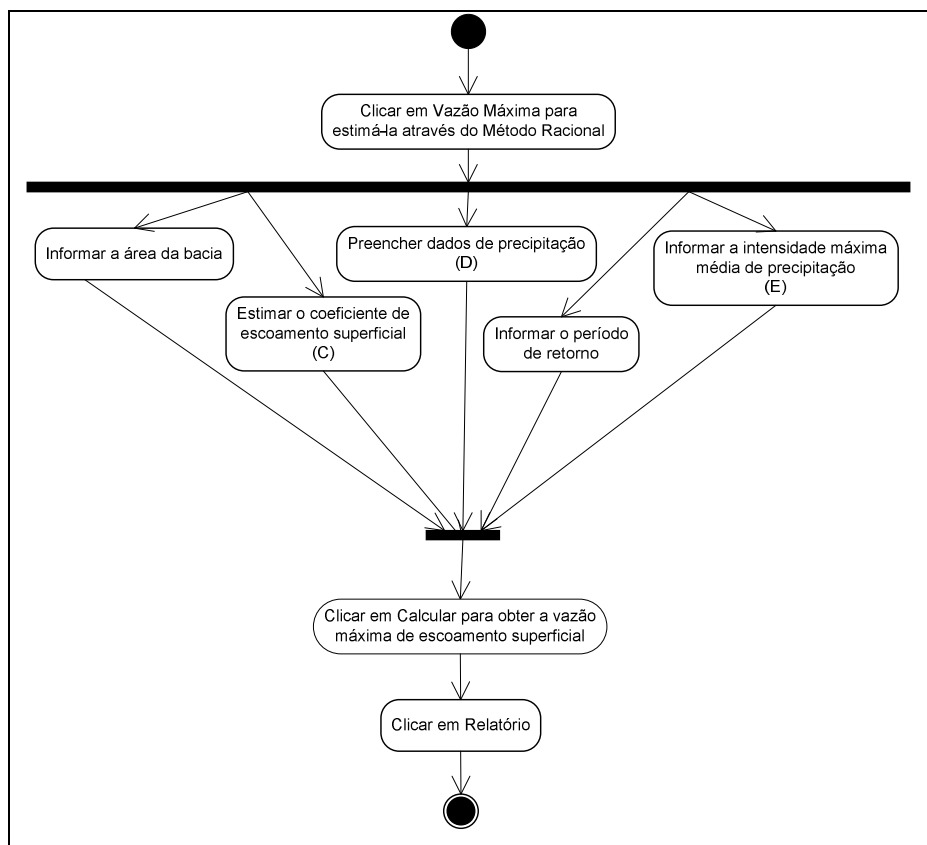


Figura 4 - Diagrama de atividades da estimativa da vazão máxima.

Para a definição do coeficiente de escoamento superficial, o usuário deverá executar as atividades apresentadas na Figura 5, que correspondem ao fluxo C da Figura 4.

Na Figura 5 pode ser observado que o usuário pode informar diretamente o valor de *C* no campo apropriado ou clicar em *Estimar C* para selecionar o método de estimativa disponível no sistema, selecionar as características da bacia hidrográfica, conforme o método escolhido, e clicar em *Selecionar*, para que o valor de *C* resultante seja preenchido no campo adequado.

Para a definição dos dados da precipitação, o usuário executar as atividades apresentadas na Figura 6, que correspondem ao fluxo D da Figura 4 e referem-se às atividades executadas no Sistema Plúvio 2.1, que foi adicionado como um componente neste trabalho.

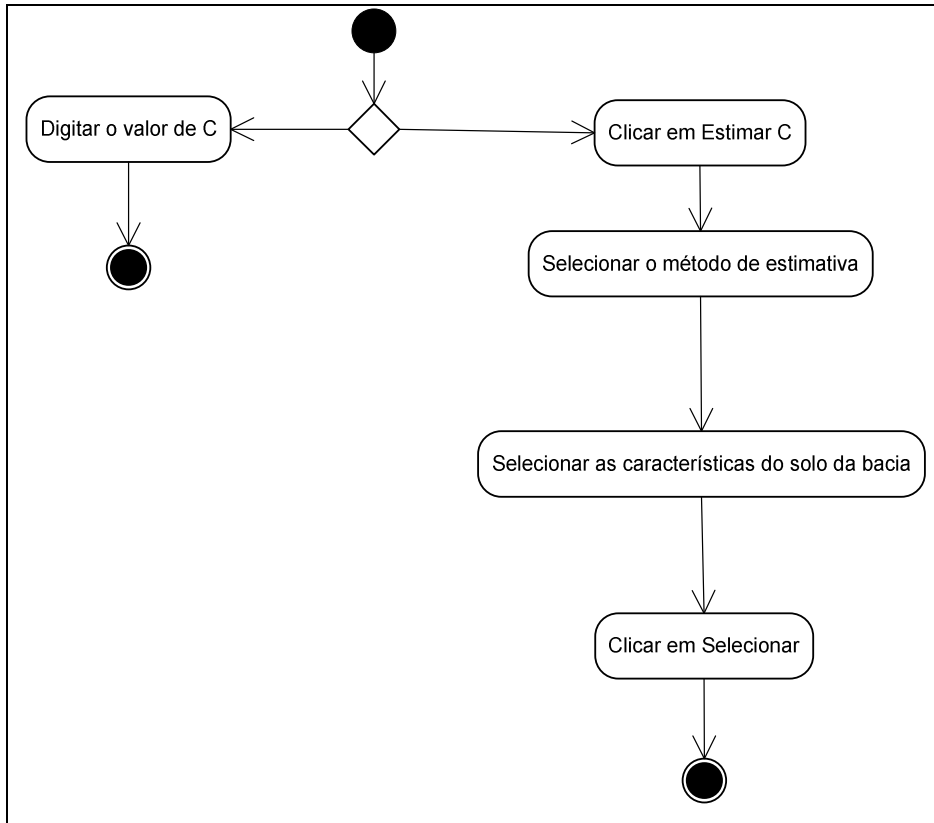


Figura 5 - Diagrama de atividades para estimar o coeficiente de escoamento superficial C.

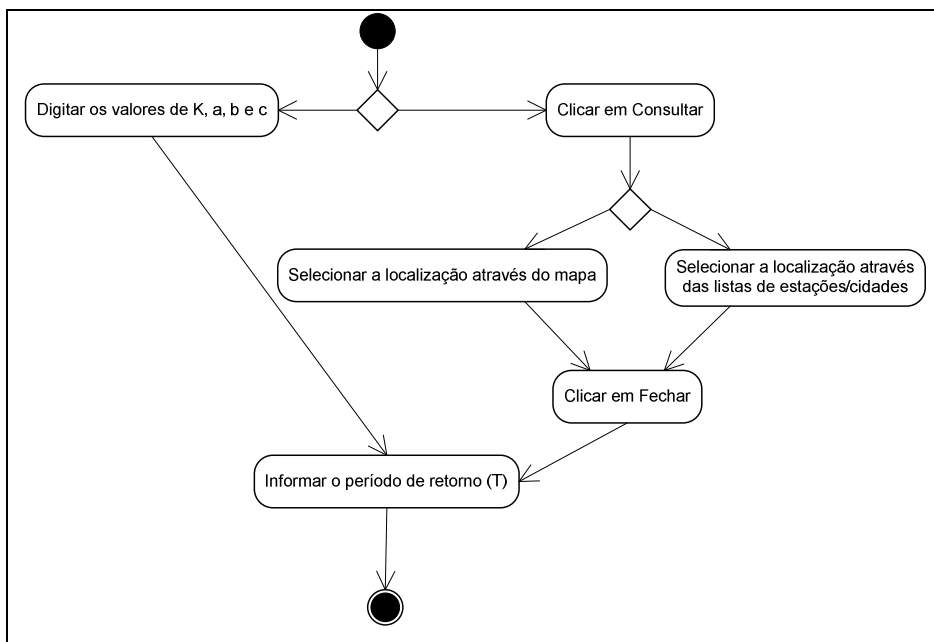


Figura 6 - Diagrama de atividades para preenchimento automático dos coeficientes.

O usuário pode escolher digitar diretamente nos campos adequados os valores de K, a, b e c, correspondentes aos dados de precipitação e clima da bacia hidrográfica ou clicar em *Consultar* para executar o Plúvio 2.1. Ao escolher a segunda opção, o usuário deverá selecionar a localização da bacia no mapa ou através das listas contendo os estados, estações e localidades do Brasil para que os dados de K, a, b e c sejam fornecidos pelo Plúvio 2.1. Então, basta o usuário clicar em *Fechar* para que os dados sejam selecionados, e informar o período de retorno, em anos.

Para informar a intensidade máxima média de precipitação, o usuário deve inserir informações da bacia, para o cálculo do tempo de concentração. Para tanto, o sistema disponibiliza a opção do cálculo por sete equações diferentes. Os diagramas de atividades de cada equação são apresentados nas Figuras 7 a 13.

Caso o usuário escolha a equação de Kirpich, ele deverá informar o comprimento do talvegue e a diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságüe, conforme pode ser observado na Figura 7.

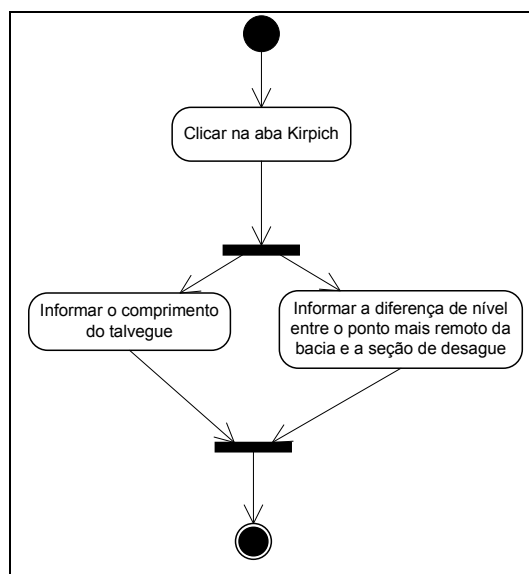


Figura 7 - Diagrama de atividades da equação de Kirpich.

Se o usuário escolher a equação SCS – Método Cinemático, ele poderá informar cada distância dos diversos trechos da bacia e a sua respectiva velocidade médias, e clicar em *Inserir* para cada trecho informado.

Para a estimativa da velocidade média, o usuário poderá clicar no botão *Velocidades*, através do qual o usuário poderá escolher entre duas metodologias, informar as características do solo e da cobertura do mesmo, e clicar em *Selecionar* para que a velocidade média seja preenchida no campo adequado. Ao escolher a metodologia proposta por Porto et al. (2000), em caso de canais bem definidos, o usuário poderá clicar em *Canais bem definidos* para estimar a velocidade conforme a equação de Manning. Para tanto, o usuário também deverá inserir informações do solo e das condições de cobertura, clicar em *Calcular* para obtenção do valor da velocidade média, e clicar em *Selecionar* para que este valor seja preenchido no campo adequado. Este fluxo de atividade pode ser observado na Figura 8.

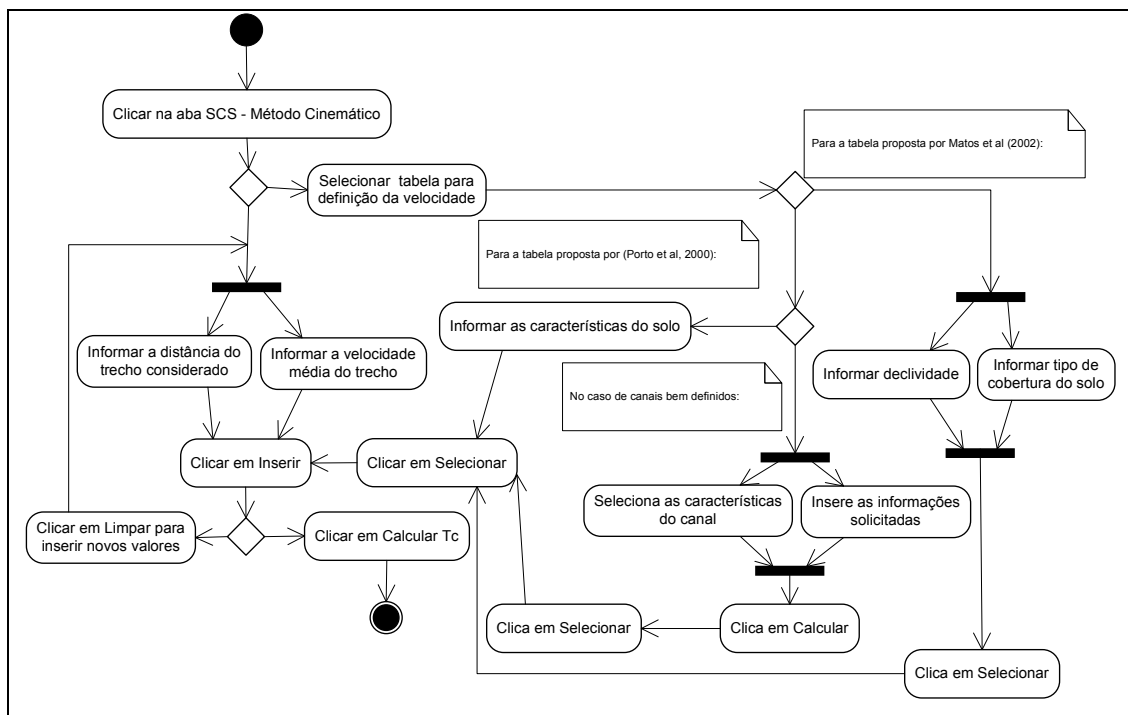


Figura 8 - Diagrama de atividades do método cinemático.

Caso o usuário escolha a equação de Ven Te Chow ou a de Picking, ele deverá informar o comprimento do talvegue e a declividade média do mesmo, conforme pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

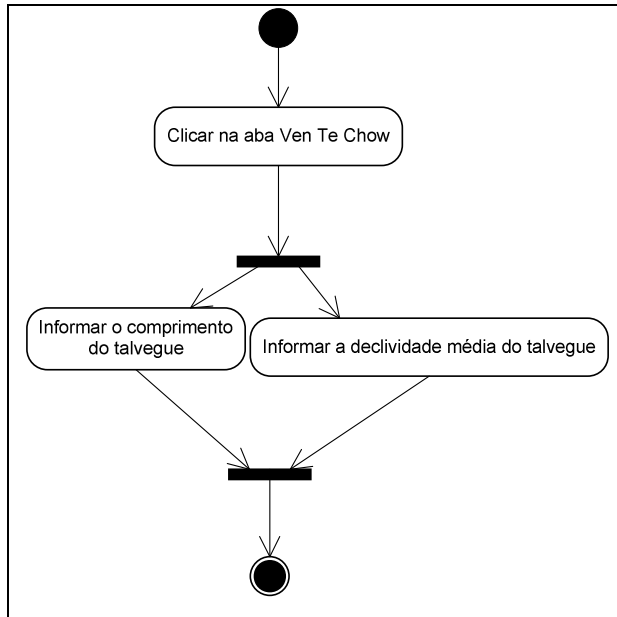


Figura 9 - Diagrama de atividades do método Ven Te Chow.

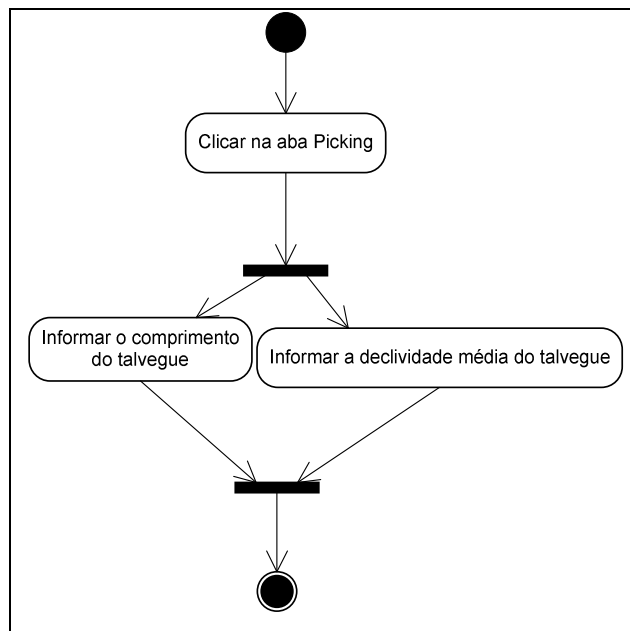


Figura 10 - Diagrama de atividades da equação Picking.

Se o usuário escolher a equação de Giandotti, ele deverá informar o comprimento do talvegue e a diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságüe, conforme pode ser observado na Figura 11.

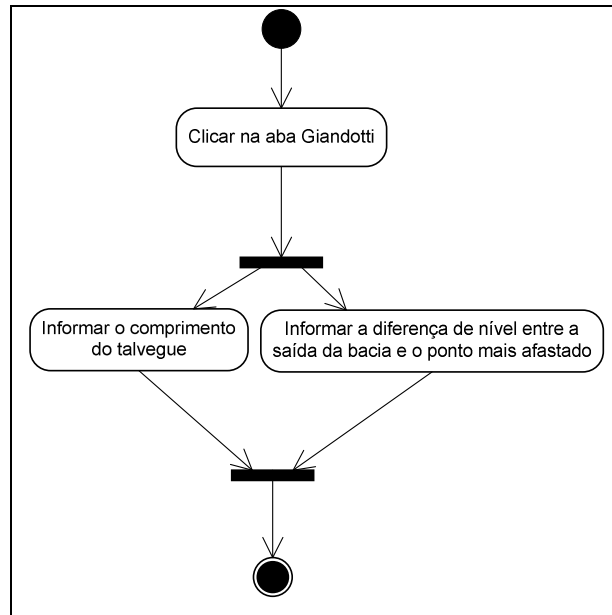


Figura 11 - Diagrama de atividades da equação Giandotti.

Ao escolher a equação SCS Lag, o usuário deverá informar o comprimento e a declividade média do talvegue e o valor de CN correspondente a bacia hidrográfica. O valor de CN pode ser digitado diretamente no campo apropriado ou selecionado, clicando-se em *Estimar CN*. Neste caso, serão disponibilizadas duas tabelas que trazem valores de CN para bacias urbanas e rurais. Após a seleção do tipo de bacia e das características da mesma, o usuário ainda pode corrigir o valor de CN a partir da umidade antecedente do solo e clicar em *Selecionar*, para que o valor de CN seja preenchido no campo apropriado. Este fluxo pode ser observado na Figura 12.

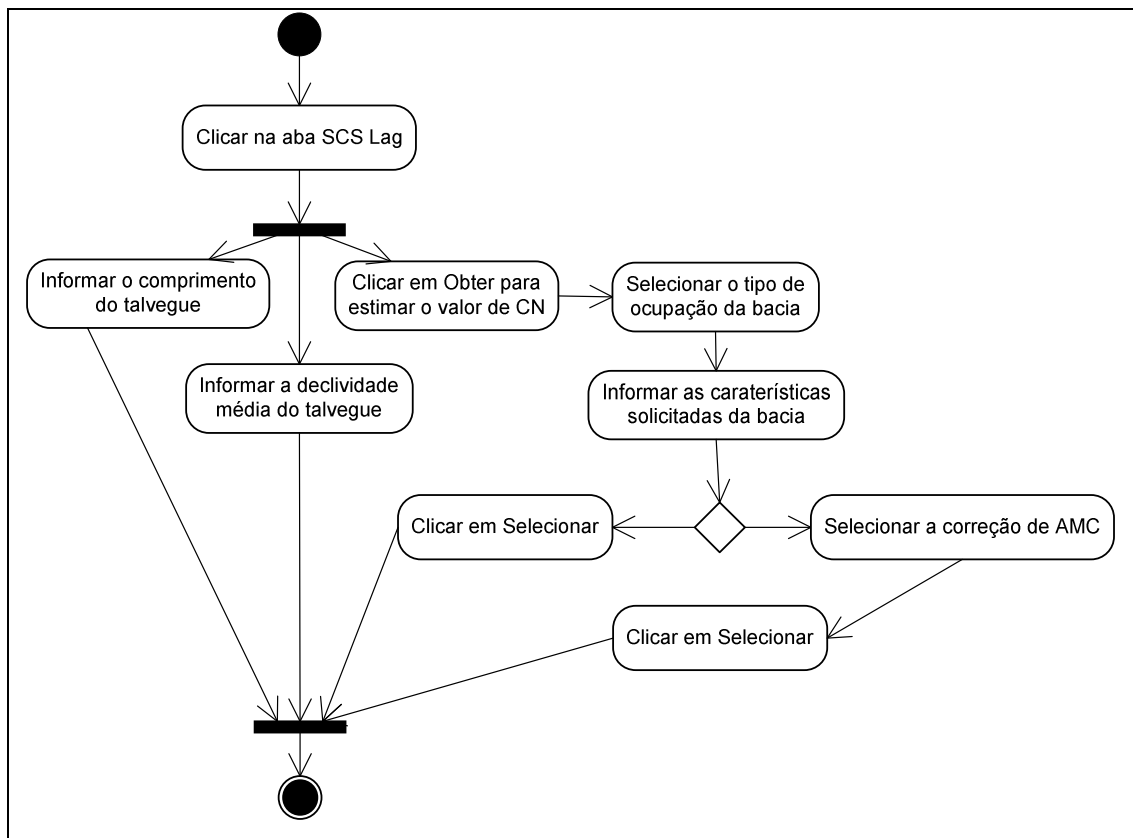


Figura 12 - Diagrama de atividades da equação SCS Lag.

Por fim, ao escolher a equação de Dodge, o usuário deverá informar e declividade do talvegue, conforme mostrado na Figura 13.

Após a seleção da equação para o cálculo do tempo de concentração e da inserção de todas as informações necessárias, o usuário deverá clicar sobre *Calcular*, para obter o valor da vazão máxima, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Se desejar, o usuário pode gerar um relatório contendo as informações digitadas e o resultado do valor da vazão máxima, bastando clicar no botão *Relatório*, conforme pode ser observado na parte inferior da Figura 4.

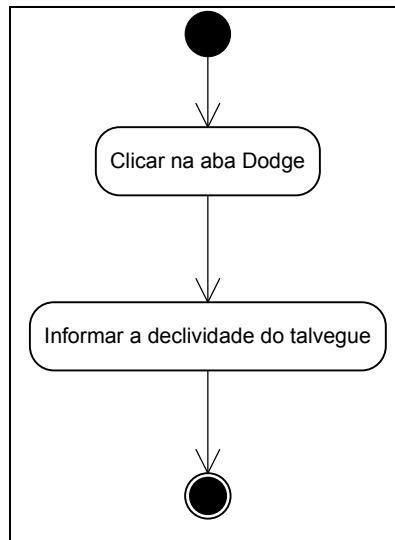


Figura 13 - Diagrama de atividades da equação Dodge.

3.4.2. Diagramas de atividade para a estimativa da lâmina escoada

Para a estimativa da lâmina escoada através do método Número da Curva, o usuário deve executar as atividades apresentadas no diagrama de atividade da Figura 14. Após clicar em *Lâmina Escoada*, o usuário deverá clicar em *Importar Arquivo* e selecionar o arquivo contendo a série histórica de dados de precipitação da bacia hidrográfica em estudo. Então, para os cinco primeiros dias da série, o usuário deverá informar a umidade antecedente do solo. Na sequência, se desejar, deverá informar períodos dentro da série e seus respectivos valores de CN. O usuário poderá também informar um único valor de CN para toda a série histórica. Os valores de CN podem ser digitados diretamente nos campos apropriados ou selecionados, bastando o usuário clicar em *Estimar CN*, informar o tipo e as características da bacia hidrográfica e clicar em *Selecionar* para que os valores de CN sejam preenchidos nos campos apropriados. Então, o usuário deverá clicar em *Calcular*, para que os valores de CN sejam preenchidos conforme as seleções do usuário e as umidades antecedentes, e os valores da lâmina escoada para cada dia sejam calculados. Se o usuário desejar, poderá exportar o arquivo final contendo os valores das lâminas escoadas, salvando o arquivo em um diretório a escolher.

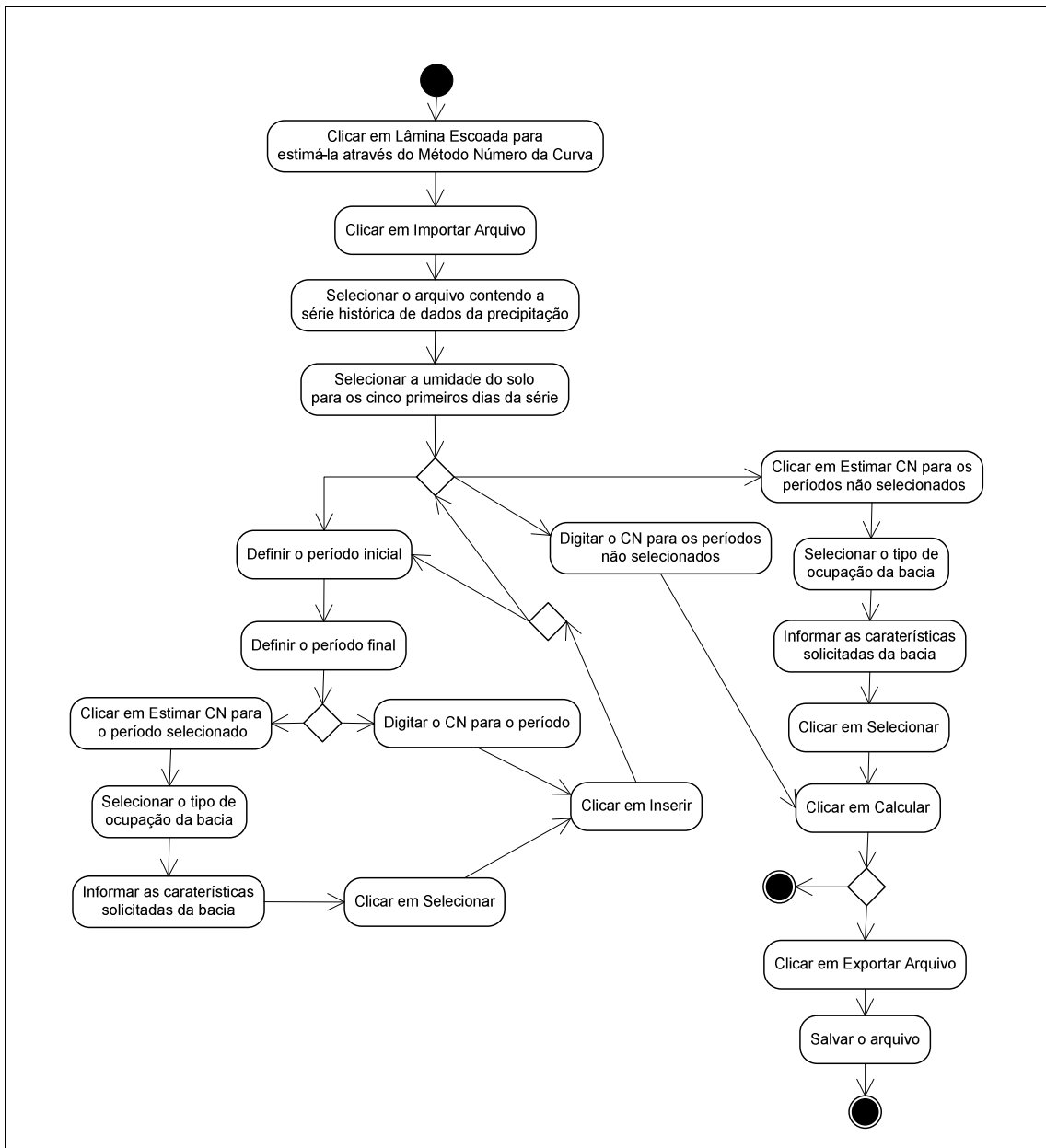


Figura 14 - Diagrama de atividades da estimativa da lâmina escoada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao executar o Sistema Computacional ESCOA, desenvolvido neste trabalho, a tela inicial é apresentada, conforme pode ser visto na Figura 15.



Figura 15 - Tela inicial do sistema ESCOA.

Nesta tela, são disponibilizadas as seguintes opções para o usuário:

- Menu *Estimar ES*: ao clicar neste menu, o usuário tem a possibilidade de escolher qual estimativa deseja realizar, da vazão máxima ou da lâmina escoada, bem como tem a opção de sair do sistema;
- Menu *Ajuda*: este menu permite que o sistema abra um arquivo no formato .pdf (*Portable Document Format*) que contém um manual de utilização das funcionalidades do sistema;
- Botões *Vazão Máxima e Lâmina Escoada*: por meio destes botões, o usuário também pode escolher qual estimativa deseja realizar;
- Botões *CEULP, UFV, DEA e GPRH*: ao serem acionados, estes botões carregam no navegador padrão do computador as páginas do Centro Universitário Luterano de Palmas, da Universidade Federal de Viçosa, do Departamento de Engenharia Agrícola e do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da UFV, respectivamente;
- Botão *Sair*: permite que o usuário feche o sistema.

Para melhor compreensão do sistema, esta seção está dividida em duas subseções, uma para a apresentação do primeiro módulo do sistema, destinado ao cálculo da vazão máxima, e o outro para a apresentação do módulo destinado a estimativa da lâmina escoada.

4.1. Módulo de estimativa da vazão máxima

A título de exemplificação, será utilizado o seguinte conjunto de valores, obtido em Pruski et. al. (2004), com exceção da localização da bacia:

- Área da bacia: 100 ha;
- Localização da estação pluviográfica: Palmas – TO;
- Período de Retorno: 10 anos;
- Comprimento do talvegue: 2 km;
- Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue: 35 m;
- Declividade média da área da bacia: 10 m km⁻¹;
- Tipo da bacia: agrícola;
- Cobertura: cultivo em fileiras retas;
- Condição hidrológica: boa;
- Tipo de solo: C (argiloso);

- O perfil do talvegue foi dividido segundo os trechos descritos no Quadro 13.

Quadro 13 - Subdivisões pertinentes ao caminho percorrido pelo escoamento superficial

Trecho	Cota (m)		Comprimento (km)	Declividade (%)
	Superior	Inferior		
0 – 1	35	25	0,15	6,7
1 – 2	25	20	0,09	5,6
2 – 3	20	15	0,16	3,1
3 – 4	15	10	0,14	3,6
4 – 5	10	5	0,56	0,9
5 - 6	5	0	0,90	0,6

Primeiramente o usuário, ao abrir o sistema, deve escolher estimar a vazão máxima, ou pelo menu *Estimar ES / Vazão Máxima*, ou pelo botão *Vazão Máxima*, apresentados na Figura 15. Então, é apresentada a tela da Figura 16, posicionada dentro da tela da Figura 15.

Nesta tela o usuário deve inserir os dados da bacia hidrográfica para a qual é estimada a vazão máxima. As informações sobre a área da bacia, o coeficiente de escoamento superficial, o local da bacia, o período de retorno e a intensidade máxima média de precipitação podem ser informados em qualquer ordem, nos campos adequados. No sistema, todos os campos aceitam valores digitados pelo próprio usuário, porém, alguns deles podem ser preenchidos a partir de dados pré-determinados, como é o caso do coeficiente de escoamento superficial e do CN.

Método Racional

Área da bacia ha

Coeficiente de escoamento superficial

Dados de Precipitação

K b

a c

T - período de retorno (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação de Kirpich

L - Comprimento do talvegue (km)

H (m) Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	6 a 7	<0,45	3 a 10	<1,2	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Vazão Máxima: **0.0** (m³s⁻¹)

Figura 16 - Tela inicial para estimativa da vazão máxima.

4.1.1. Informando a área da bacia e coeficiente de escoamento superficial

Primeiramente, o usuário deverá inserir a área da bacia, em hectares, conforme pode ser observado na tela da Figura 17, na qual foi inserido o valor 100 ha, como exemplo. Após, fornecer o coeficiente de escoamento superficial, o usuário pode digitar o valor no campo correspondente ou clicar sobre o botão *Estimar C*.

Ao clicar no botão *Estimar C*, a tela da Figura 18 é apresentada, na qual o usuário deve selecionar o valor de C nas tabelas propostas por ASCE, SCS, Fruhling e CHD (Figuras 18, 19, 20 e 21, respectivamente). Nesta tela o usuário deve selecionar a tabela desejada, selecionar as características da bacia e clicar no botão *Selecionar* para que o valor de C seja preenchido na tela da Figura 17. Na tela 19 é mostrado o exemplo do valor de C preenchido a partir da seleção das características da bacia.

Método Racional

Método Racional

Área da bacia ha

Coefficiente de escoamento superficial

Dados de Precipitação

K b

a c

T - período de retorno (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação de Kirpich

L - Comprimento do talvegue (km)

H (m) Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	6 a 7	<0,45	3 a 10	<1,2	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Vazão Máxima: **0.0** (m³s⁻¹)

Figura 17 - Tela para estimativa da vazão máxima com o valor da área da bacia preenchido.

Coeficiente de escoamento superficial

Método

Williams ASCE (TUCCI, 2001)
 Critério de Fruhling (Wilken, 1978)

Soil Conservation Service - USDA
 Colorado Highway Department

Valores de C recomendados por Williams

Superfície	C		
	Intervalo	Valor Esperado	
Pavimento	<input type="radio"/> Asfalto	0,70 - 0,95	0,83
	<input type="radio"/> Concreto	0,80 - 0,95	0,88
	<input type="radio"/> Calçadas	0,75 - 0,85	0,80
	<input type="radio"/> Telhado	0,75 - 0,95	0,85
Grama em Solo Arenoso	<input type="radio"/> Plano (2%)	0,05 - 0,10	0,08
	<input type="radio"/> Declividade média (2 a 7%)	0,10 - 0,15	0,13
	<input type="radio"/> Declividade Alta (7%)	0,15 - 0,20	0,18
Grama em Solo Argiloso	<input type="radio"/> Plano (2%)	0,13 - 0,17	0,15
	<input type="radio"/> Declividade média (2 a 7%)	0,18 - 0,22	0,20
	<input type="radio"/> Declividade Alta (7%)	0,25 - 0,35	0,30

TUCCI, C. E. M. (org) **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2ª ed. 1ª reimp. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001. 943 p.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477 p.

Fonte: Tucci (2000).

Figura 18 - Valores de C propostos por ASCE.

Método Racional

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coefficiente de escoamento superficial 0,70

Dados de Precipitação

K b

a c

T - período de retorno (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação de Kirpich

L - Comprimento do talvegue (km)

H (m) Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	6 a 7	<0,45	3 a 10	<1,2	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Vazão Máxima: 0,0 (m³s⁻¹)

Figura 19 - Valores de C propostos pelo Soil Conservation Service – USDA.

Coeficiente de escoamento superficial

Método

Williams ASCE (TUCCI, 2001)
 Critério de Fruhling (Wilken, 1978)
 Soil Conservation Service - USDA
 Colorado Highway Department

Valores de C, adaptação do critério de Fruhling, adotados pela Pref. de São Paulo (Wilken, 1978)

Edificações com muitas superfícies livres:

Zonas	C
<input type="radio"/> Edificações muito densas: áreas centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 - 0,95
<input type="radio"/> Edificações não muito densas: área adjacente ao centro, de menor densidade de habitantes, porém com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 - 0,70
<input type="radio"/> Edificações com poucas superfícies livres: áreas residenciais com construções cerradas e ruas pavimentadas.	0,50 - 0,60
<input type="radio"/> Subúrbios com alguma edificação: áreas residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,25 - 0,50
<input type="radio"/> Matas, parques e campo de esportes: áreas rurais, verdes, superfícies	0,05 - 0,20

TUCCI, C. E. M. (org) **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2ª ed. 1ª reimp. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001. 943 p.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477 p.

Fonte: Wilken (1978).

Figura 20 - Valores de C conforme o critério de Fruhling.

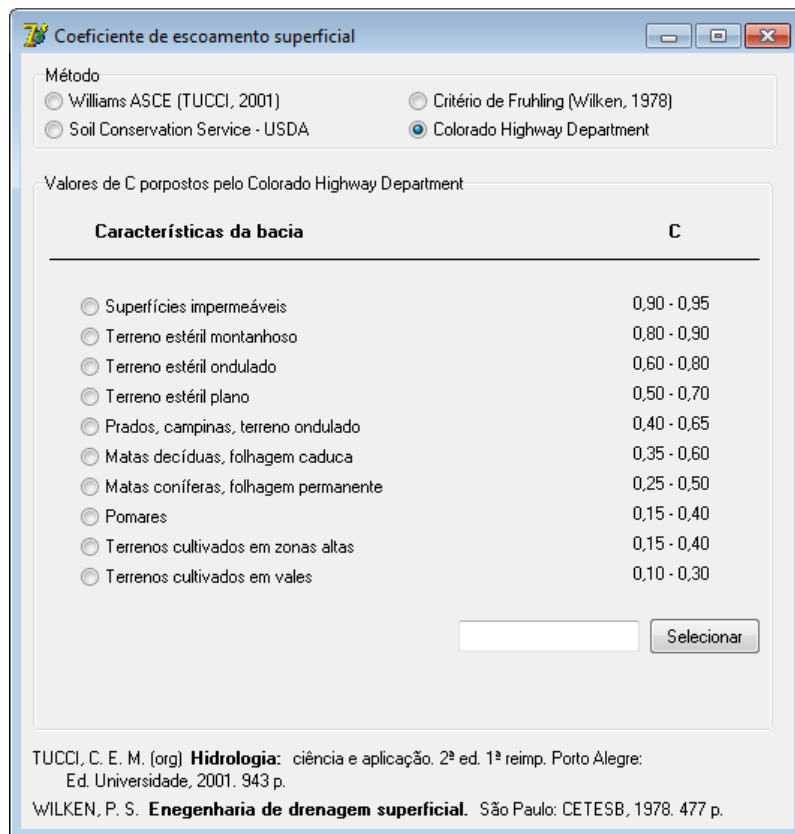


Figura 21 - Valores de C conforme o Colorado Highway Department.

4.1.2. Utilizando o Plúvio 2.1

Novamente na tela da Figura 17, o usuário pode digitar os valores de K, a, b e c nos campos correspondentes, ou clicar no botão *Consulta*, para preenchimento dos referidos campos, que executa o Plúvio 2.1 automaticamente, sistema desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da UFV, apresentado na Figura 22. Neste sistema disponibilizam-se campos para que o local da bacia ou a estação pluviográfica sejam selecionados. Após a seleção do local ou da estação, o usuário deverá clicar no botão *Fechar* para que os valores de K, a, b e c sejam preenchidos na tela da Figura 17. Para localidades nas quais não existam estações pluviográficas, há a opção do usuário clicar em *Interpolação* para obter os dados desejados. No exemplo, o local selecionado foi Palmas, no estado do Tocantins.

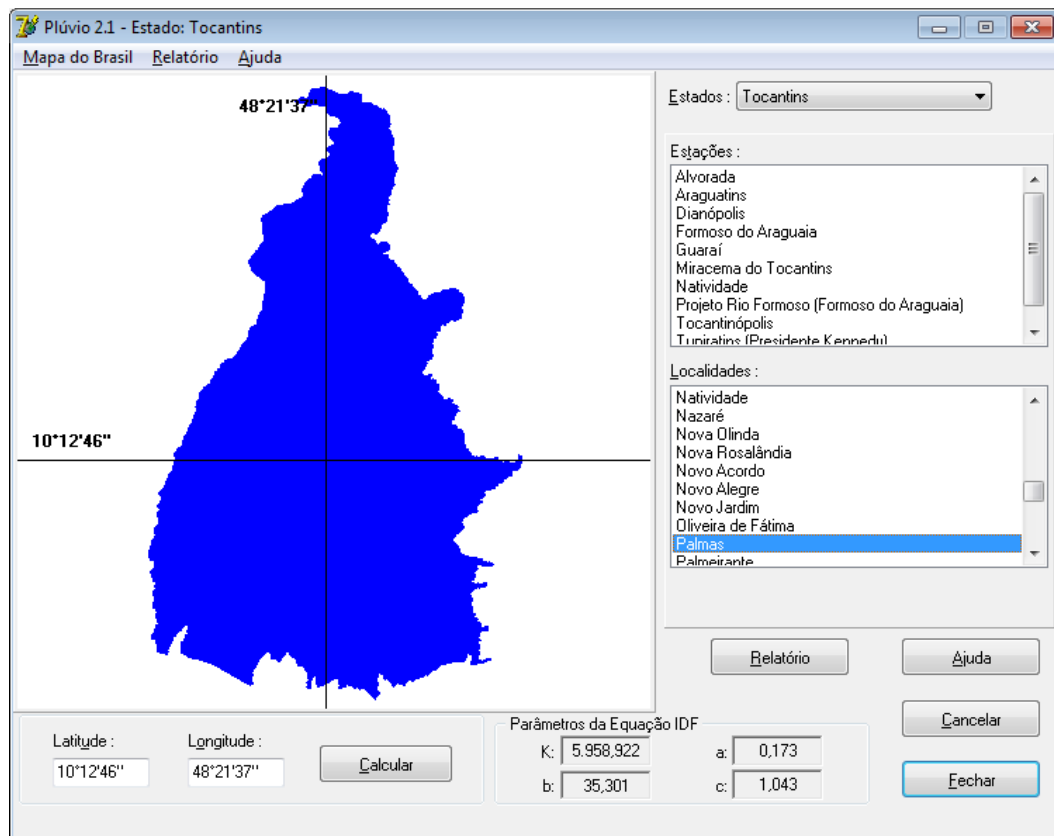


Figura 22 - Tela do Plúvio 2.1 com a localização Palmas – Tocantins selecionada.

Na Figura 23 pode ser observada a tela da Figura 17, agora com os valores de C e de K, a, b e c devidamente preenchidos. Na sequência, o tempo de retorno deve ser fornecido pelo usuário, em anos, conforme é mostrado na Figura 23.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coeficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação de Kirpich

L - Comprimento do talvegue (km)

H (m) Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	6 a 7	<0,45	3 a 10	<1,2	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 0.0 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 23 - Tela para estimativa da vazão máxima com os valores da área da bacia, do coeficiente de escoamento superficial, dos dados de precipitação e do período de retorno preenchidos.

4.1.3. Calculando o tempo de concentração e a vazão máxima

Parte-se, então, para o cálculo do tempo de concentração, necessário para a obtenção da intensidade máxima média de precipitação. Neste sistema são disponibilizadas sete equações para o cálculo do tempo de concentração, estando as mesmas dispostas em abas a fim de facilitar a navegação entre elas. Em cada aba estão apresentados os campos dos dados a serem preenchidos pelo usuário, bem como as condições para as quais as equações foram baseadas, a fim de orientar a escolha do usuário entre as equações.

4.1.3.1. Equação de Kirpich

Ao escolher a equação de Kirpich, o usuário deve, após clicar na aba correspondente, informar o comprimento do talvegue, em km, e a diferença de nível do ponto mais remoto da bacia até a seção de deságue, em metros, conforme podem ser visualizados na tela da Figura 24. No exemplo utilizado como ilustração, foram digitados os valores de 2 km para o comprimento do talvegue e 35 m de diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue. Após a inserção dos dados, clicou-se em Calcular para que a vazão máxima fosse calculada, obtendo-se o valor de $21,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coefficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301
a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação de Kirpich

L - Comprimento do talvegue 2 (km)
H 35 (m) Diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue.

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	6 a 7	<0,45	3 a 10	<1,2	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 21,30 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 24 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação de Kirpich para a estimativa do t_c .

4.1.3.2. Equação SCS – método cinemático

Caso a equação SCS – Método Cinemático seja selecionada, o usuário deve informar a distância e a velocidade média dos diversos trechos da bacia, utilizando os campos apropriados, e clicar em *Inserir*, até que não haja mais trechos e velocidades a serem inseridos. A tela inicial deste método encontra-se na Figura 25. Como exemplos, foram digitados os valores apresentados no Quadro 12. Após a inserção, o botão *Calcular t_c* foi selecionado, obtendo-se o valor de 20,61 para o t_c , e o botão *Calcular* foi selecionado, obtendo-se o valor de 25,96 m³ s⁻¹ para a vazão máxima.

Método Racional

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coefficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

Equação SCS - método cinemático

Li - distância do trecho 0,9 (km)

Vi - velocidade média 1,15 (m s⁻¹) Velocidades...

Intervalo	Li	Vi
1	0,15	1,15
2	0,09	1,15

Limpar Inserir

Limpar Calcular T_c : 20,61

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA					Rural/Urbanda

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 25,96 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 25 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se o método cinemático para a estimativa do t_c .

Nesta tela, o usuário pode clicar no botão *Velocidades* para escolher, conforme as características da bacia, a velocidade do trecho especificado. Ao clicar no botão *Velocidades* a tela apresentada na Figura 26 é disponibilizada, para que o usuário, primeiramente, escolha uma das tabelas para estimativa da velocidade, propostas por Porto et al. (2000) e Matos et al. (2000). Então, o usuário deve selecionar as características da bacia e clicar no botão *Selecionar* para que o valor da velocidade seja preenchido no campo correspondente ao da tela apresentada na Figura 25.

Fonte: Porto et al. (2000).

Figura 26 - Valores de velocidade conforme Porto et al.

No exemplo utilizado, foram selecionados vários valores de declividade para a bacia, contendo áreas cultivadas, conforme informações do Quadro 12.

Caso os canais da bacia sejam bem definidos, a velocidade é estimada pela equação de Manning, e o usuário deve selecionar e preencher as informações solicitadas na tela apresentada na Figura 27. Após, o usuário deve clicar no botão *Calcular* para a obtenção da velocidade, e clicar no botão *Selecionar*, para que o valor da velocidade seja preenchido na tela da Figura 26.

Equação de Manning

Canal de terra retilíneo e uniforme	Mínimo	Normal	Máximo
<input checked="" 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"/> Encascalhado, seção uniforme, limpo	0,022	0,025	0,030
<input type="radio"/> Com grama, poucas ervas daninhas	0,022	0,027	0,033

Canal de terra sinuoso	Mínimo	Normal	Máximo
<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

Seção Transversal do escoamento: A: (m)

Coefficiente de rugosidade: n: ----

Raio Hidráulico: R: (m)

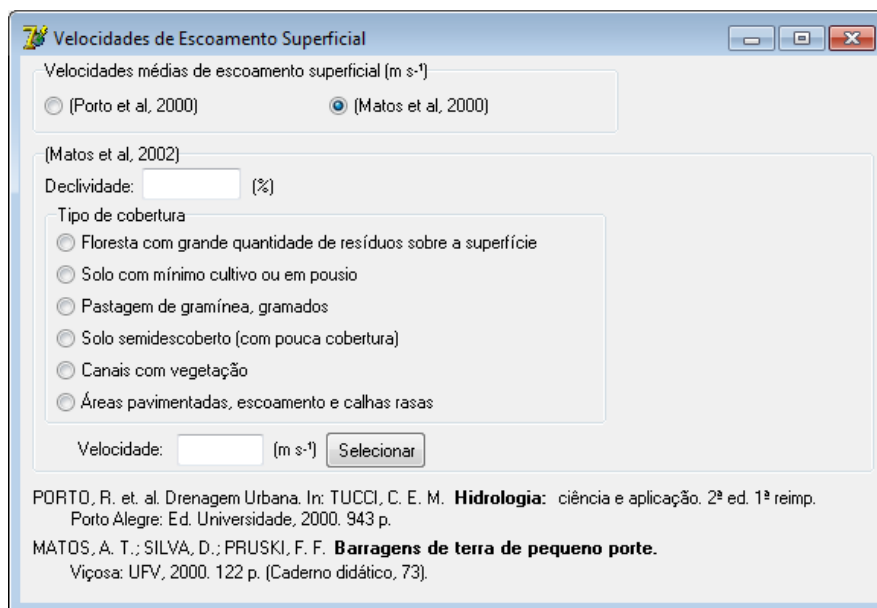
Declividade do fundo do canal: s: (m km⁻¹)

Velocidade: (m s⁻¹)

Figura 27 - Valores da velocidade para canais bem definidos (equação de Manning).

Se a tabela escolhida na tela da Figura 26 fosse a proposta por Matos et al. (2000), então seriam solicitadas as informações sobre a declividade do trecho e o tipo de cobertura. O usuário, após inserir tais informações, deve clicar em *Selecionar* para que o valor da velocidade seja preenchido no campo adequado da Figura 25, conforme pode ser observado na Figura 28.

Após a seleção da velocidade, o usuário deve clicar no botão *Inserir*, da tela da Figura 25 para que os valores do comprimento do trecho e sua respectiva velocidade sejam confirmados para o cálculo do tempo de concentração. Então, depois de selecionados todos os trechos da bacia, com suas respectivas velocidades, o usuário deve clicar em *Calcular t_c* , para obtenção do tempo de concentração conforme o método Cinemático.



Fonte: Matos et al. (2000).

Figura 28 - Valores da velocidade conforme Matos et al.

4.1.3.3. Equação Ven Te Chow

Caso a equação escolhida seja a proposta por Ven Te Chow, o usuário deve informar o comprimento do talvegue e a declividade do mesmo, conforme podem ser vistos na tela da Figura 29.

No exemplo apresentado desta figura foram utilizados os valores de 2 km para o comprimento do talvegue e 10 m km^{-1} para a declividade média, obtendo-se a vazão máxima de $19,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ao clicar no botão *Calcular*.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coeficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

L - 2 comprimento do talvegue (km)

So - 10 declividade média do talvegue (m km⁻¹)

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	20	1,1/19	-	-	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 19,23 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 29 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se o método Ven Te Chow para a estimativa do t_c .

4.1.3.4. Equação de Picking

Se a equação escolhida for a proposta por Picking, o usuário também deve informar o comprimento do talvegue, em km, e a declividade média do mesmo, em m km^{-1} , conforme pode ser observado na tela da Figura 30.

No exemplo utilizado foram inseridos os valores de 2 km para o comprimento do talvegue e 10 m km^{-1} para a declividade média, obtendo-se a vazão máxima de $19,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ao clicar no botão *Calcular*.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coeficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

L 2 comprimento do talvegue (km)

So 10 declividade média do talvegue (m km⁻¹)

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
-	-	-	-	-	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 19.53 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 30 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação Picking para a estimativa do t_c .

4.1.3.5. Equação de Giandotti

Ao escolher a equação de Giandotti para o cálculo do tempo de concentração, o usuário deve informar o comprimento do talvegue, em km, e a diferença de nível entre a saída da bacia e o ponto mais afastado da mesma, em metros. A tela do sistema correspondente ao método está apresentada na Figura 31.

No exemplo utilizado, foram inseridos os valores de 2 km para o comprimento do talvegue e 35 m para a diferença de nível entre a saída da bacia e o ponto mais afastado, obtendo-se o valor da vazão máxima de $2,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ao clicar no botão *Calcular*.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coeficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking **Giandotti** SCS Lag Dodge

L - 2 comprimento do talvegue (km)

H - 35 diferença de nível entre a saída da bacia e o ponto mais afastado (m)

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
Itália	-	-	-	-	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar **Calcular** Vazão Máxima: 2,26 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 31 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação Giandotti para a estimativa do t_c .

4.1.3.6. Equação SCS Lag

Se o usuário escolher a equação SCS Lag para o cálculo do tempo de concentração, o mesmo deve inserir as informações do comprimento do talvegue, em km, e a sua declividade média, em metros. Então, ele deve definir o valor de CN para a área para a qual se deseja estimar a vazão máxima. A tela com a equação SCS Lag selecionada está apresentada na Figura 32.

Como exemplo, foram inseridos os valores 2 km para o comprimento do talvegue, 10 m km⁻¹ para a declividade média do talvegue e 85 como valor do CN. Após clicar em *Calcular*, o usuário obtém o valor 37,66 m³ s⁻¹ para a vazão máxima do escoamento superficial.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coeficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

L - 2 comprimento do talvegue (km)

So - 10 declividade média do talvegue (m k⁻¹)

CN - 85 Estimar CN

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km ²)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
EUA	.	<8,1	.	.	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 37,66 (m³s⁻¹) Relatório

Figura 32 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se a equação SCS Lag para a estimativa do t_c .

Para estimar o valor de CN, após clicar no botão correspondente, apresentado na tela da Figura 32, são disponibilizadas as telas apresentadas nas Figuras 33 e 34, que trazem características de bacias com ocupação agrícola e urbana, respectivamente.

Por meio destas tabelas, o usuário faz a seleção das características da bacia e, se necessário, faz a correção do valor de CN conforme a umidade do solo. Então, deve clicar no botão *Selecionar* para que o valor de CN seja preenchido no local correspondente ao da tela apresentada na Figura 32.

Valor de CN

Bacias com ocupação agrícola | Bacias com ocupação urbana

Valores de CN para bacias com ocupação agrícola para condições de umidade antecedente AMCII (MOCKUS, 1972 apud PRUSKI, 2004)

Uso do Solo

- Sem cultivo
- Cultivo em fileiras
- Cultivo em fileiras estreitas
- Leguminosas em fileiras estreitas
- Pastagem para pastoreio
- Floresta

Tratamento

- Fileiras retas
- Com curvas de nível
- Com curvas de nível e terraço
-

Correção

Classes	Chuva ocorrida nos cinco dias anteriores à chuva crítica (mm)
AMC I	0 - 35
AMC II	35 - 52,5
AMC III	>52,5

Correção para AMC I ou AMC II

- AMC I
- AMC II

Corrigir

Valor CN AMC II: 85 Selecionar

Valor CN corrigido: Selecionar

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. 2ª Ed. Viçosa: UFV, 2004. 87 p.

Figura 33 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação agrícola.

Valor de CN

Bacias com ocupação agrícola | Bacias com ocupação urbana

Valores de CN para bacias com ocupação urbana para condições de umidade antecedente AMC II ASCE (TUCCI, 2001)

Utilização:

Cobertura

- Sem conservação do solo
- Com conservação do solo
- Com relva em mais de 75% da área
- Com relva em 50 a 75% da área
- 65% de área impermeável
- 38% de área impermeável
- 30% de área impermeável
- 25% de área impermeável
- 20% de área impermeável
- Asfaltos e com drenagem de águas pluviais
- Com paralelepípedo
- De terra

Tipo de Solo

- A
- B
- C
- D

Correção

Classes	Chuva ocorrida nos cinco dias anteriores à chuva crítica (mm)
AMC I	0 - 35
AMC II	35 - 52,5
AMC III	>52,5

Correção para AMC I ou AMC III

- AMC I
- AMC III

Corrigir

Valor CN AMC II: Selecionar

Valor CN corrigido: Selecionar

TUCCI, C. E. M. (org) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed. 1ª reimp. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001. 943 p.

Figura 34 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação urbana.

4.1.3.7. Equação de Dodge

Ao utilizar a equação de Dodge para obter o tempo de concentração, o usuário deve clicar na aba *Dodge* e informar a declividade do talvegue, em m m^{-1} . A tela correspondente desta equação está apresentada na Figura 35. Como exemplo, utilizou-se o valor $0,1 \text{ m m}^{-1}$ de declividade e obteve-se o valor $0,12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de vazão máxima.

Método Racional

Área da bacia 100 ha

Coefficiente de escoamento superficial 0,70 Estimar C

Dados de Precipitação

K 5958,922 b 35,301

a 0,173 c 1,043 Consulta

T - período de retorno 10 (Anos)

Tempo de concentração

Equações:

Kirpich SCS - Método Cinemático Ven Te Chow Picking Giandotti SCS Lag Dodge

So - 0,1 declividade do talvegue (m m^{-1})

Características da bacia - base

Local	Nº de Bacias	Área (km^2)	Decliv. (%)	L (km)	Tipo
Irlanda	10	140/930	-	-	Rural

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, Vol. 10, n. 1, p. 5-23, Jan./Mar., 2005.

Limpar Calcular Vazão Máxima: 0,12 ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) Relatório

Figura 35 - Cálculo da vazão máxima utilizando-se equação Dodge para a estimativa do t_c .

4.1.3.8. Gerando o relatório do método racional

Após o usuário ter fornecido todas as informações sobre a bacia hidrográfica, incluindo a seleção da equação para o cálculo do tempo de concentração e as informações para tal equação, e ter clicado no botão *Calcular* na tela apresentada na Figura 17, o valor da vazão máxima aparece ao lado deste botão, em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. Se o usuário

desejar, pode clicar no botão *Relatório*, para que o sistema gere um documento contendo todas as informações inseridas pelo usuário e o valor da vazão máxima calculada, conforme visualizado na Figura 36.

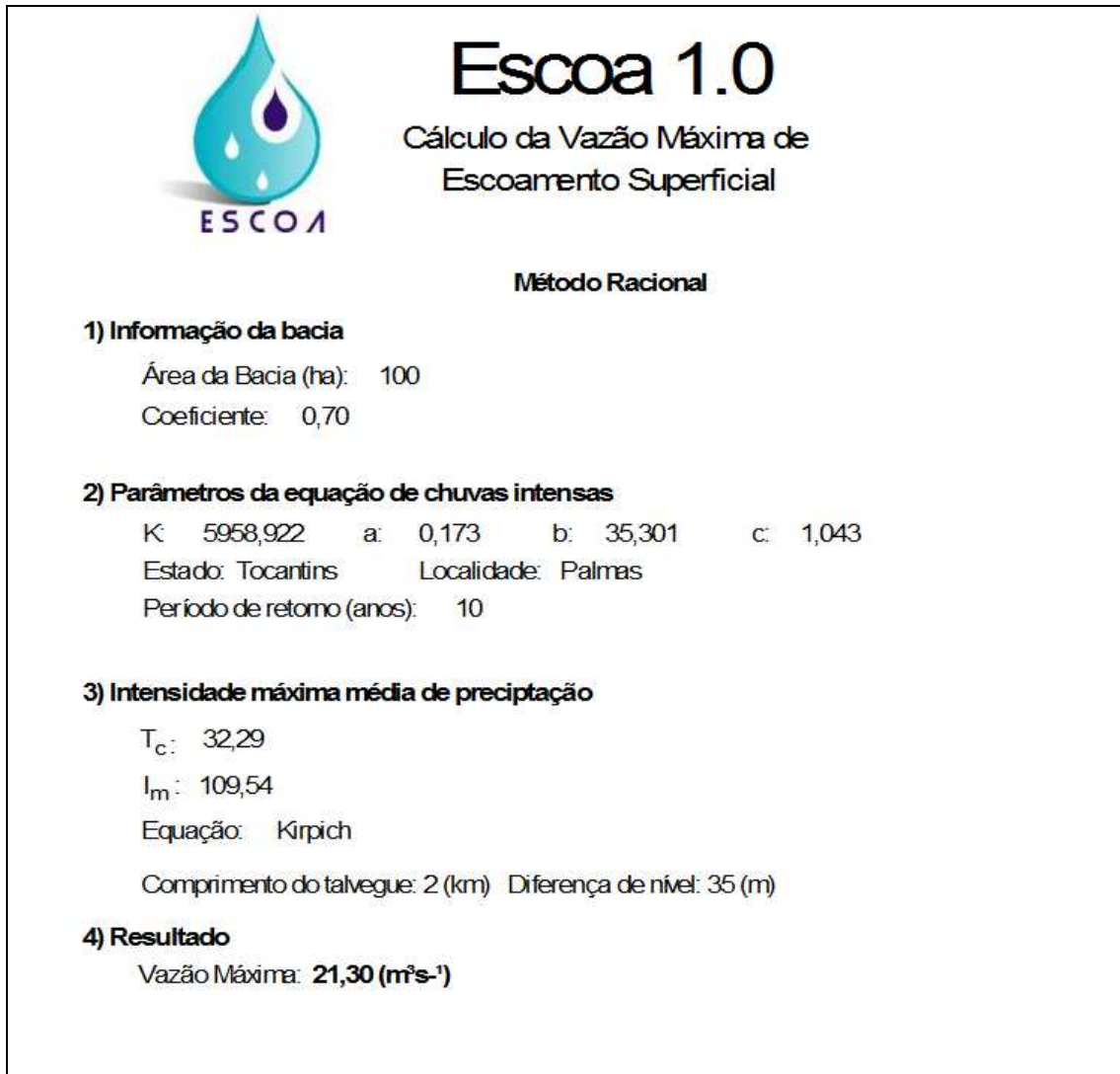


Figura 36 - Exemplo de relatório gerado pelo sistema para o cálculo da vazão máxima.

Como exemplo, foi gerado o relatório contendo os dados inseridos nas seções 4.1.1 e 4.1.2 e tendo a equação de Kirpich como equação para o cálculo do tempo de concentração.

O relatório gerado pelo sistema pode ser impresso para utilização posterior. Para que outros relatórios sejam gerados, basta clicar na opção *Close* disposta logo

acima do relatório. Desta forma, a tela para o cálculo da vazão máxima é disponibilizada para que os dados inseridos anteriormente sejam utilizados novamente para um novo cálculo da vazão máxima ou para que novos dados sejam inseridos.

4.2. Módulo de estimativa da lâmina escoada

Para a estimativa da lâmina escoada, o usuário deve, ao abrir o sistema, clicar no botão *Lâmina Escoada* ou escolher esta opção dentro do menu *Estimar ES*, conforme pode ser visualizado na Figura 15, na qual é apresentada a tela inicial do sistema.

4.2.1. Importando o arquivo de dados de precipitação

Após escolher a opção *Lâmina Escoada*, o usuário deve importar um arquivo com extensão *.mdb* (Microsoft Access) contendo uma série histórica de dados de precipitação. Para a importação do arquivo, o usuário deve clicar no botão apropriado que é disponibilizado na parte superior da tela, conforme observado na Figura 37.

Data	Prec. Total	CN	Lâmina Escoada
------	-------------	----	----------------

Definição da unidade do solo para os cinco primeiros dias da série

AMC I AMC II AMC III

Definição de CN por períodos específicos

Data inicial: 18/06/2010 Data final: 18/06/2010

CN: Estimar CN

Limpar Inserir

Data inicial	Data final	CN
--------------	------------	----

Valor de CN por períodos não selecionados

CN: Estimar CN Calcular Exportar arquivo

Figura 37 - Tela inicial da estimativa da lâmina escoada.

A série histórica deve conter todos os dados para cada dia da série. Em séries incompletas, o usuário deve, primeiramente, aplicar técnicas de preenchimento de falhas na mesma, para que o arquivo importado contenha todos os dados necessários para o cálculo das lâminas escoadas diárias. Caso o usuário tente importar um arquivo contendo falhas, o sistema acusa o erro com uma mensagem, conforme visualizado na Figura 38.

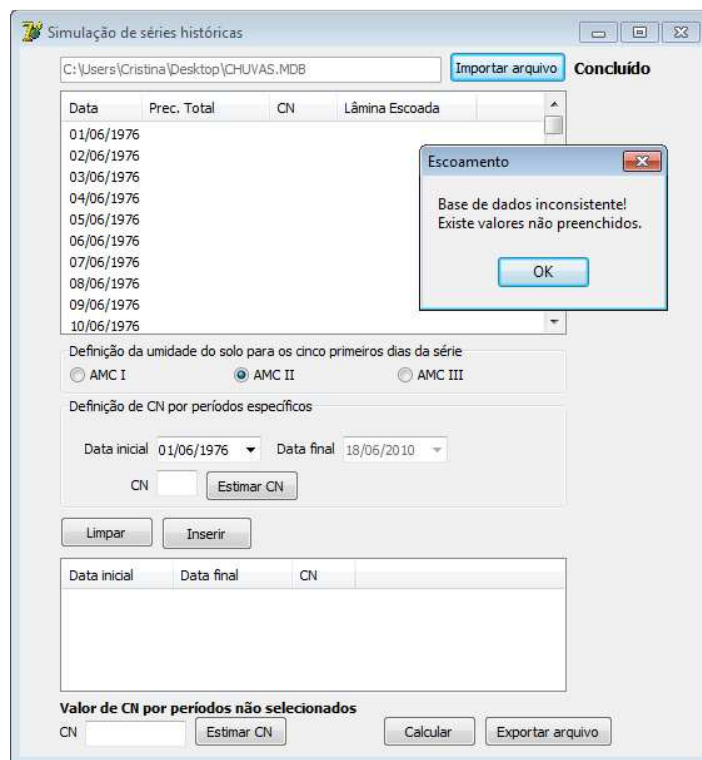


Figura 38 - Tela com mensagem de erro ao importar um arquivo com falhas.

4.2.2. Informando o AMC para os cinco primeiros dias da série

Após escolher um arquivo contendo uma série histórica completa, como pode ser observado na Figura 39, o sistema apresenta uma tabela contendo os dias registrados na série e suas respectivas precipitações. O sistema não possui formas de calcular automaticamente a umidade do solo (AMC) para os cinco primeiros dias da série, porque este cálculo baseia-se na soma das chuvas ocorridas nos cinco dias antecedentes ao dia analisado. Portanto, o usuário deve, para os primeiros cinco dias da série,

informar a condição do solo em relação à umidade, selecionando se o mesmo encontra-se com umidade AMC I, II ou III. Na Figura 39 está apresentada a tela de estimativa da lâmina escoada com o arquivo CHUVAS06.mdb importado e o AMC I selecionado para os cinco primeiros dias da série.

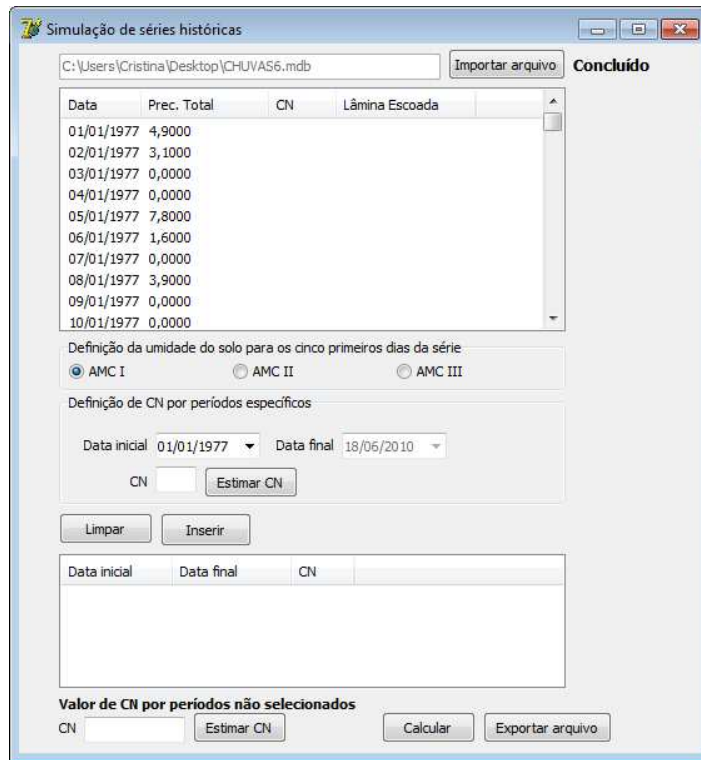


Figura 39 - Tela de estimativa da lâmina escoada com o arquivo carregado e com a umidade antecedente dos cinco primeiros dias selecionada.

4.2.3. Definindo valores de CN para diversos períodos da série

Na sequência, caso o usuário deseje estipular valores diferentes de CN para diferentes períodos da série, ele deve informar a data inicial e final do período e informar o CN no campo apropriado. Se quiser, também pode clicar no botão *Estimar CN* para estipular as características da bacia para tal período, utilizando as tabelas para bacias com ocupação agrícola e urbana, apresentadas nas Figuras 40 e 41, respectivamente. Após a seleção de CN através das tabelas, o usuário deve clicar em *Selecionar*, para que valor de CN seja preenchido no campo apropriado na tela da Figura 39. Então, é necessário que o usuário clique em *Inserir* para que o período

selecionado e seu respectivo valor de CN sejam confirmados. O processo de definição de períodos e seleção de CN pode se repetir quantas vezes o usuário achar necessário, até que todos os períodos desejados sejam caracterizados adequadamente. Um exemplo de vários períodos selecionados com diferentes valores de CN pode ser observado na tela da Figura 42.

7 CN - número da curva

Numero da Curva

Bacias com ocupação agrícola Bacias com ocupação urbana

Valores de CN para bacias com ocupação agrícola para condições de unidade antecedente AMCII (MOCKUS, 1972 apud PUSKI, 2004)

Uso do Solo

Sem cultivo

Cultivo em fileiras

Cultivo em fileiras estreitas

Leguminosas em fileiras estreitas

Pastagem para pastoreio

Floresta

Tratamento

Fileiras retas

Com curvas de nível

Com curvas de nível e terraço

.....

Condição Hidrológica

Má Boa Regular

Tipo de Solo

A B C D

Valor CN

73 Selecionar

Figura 40 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação agrícola.

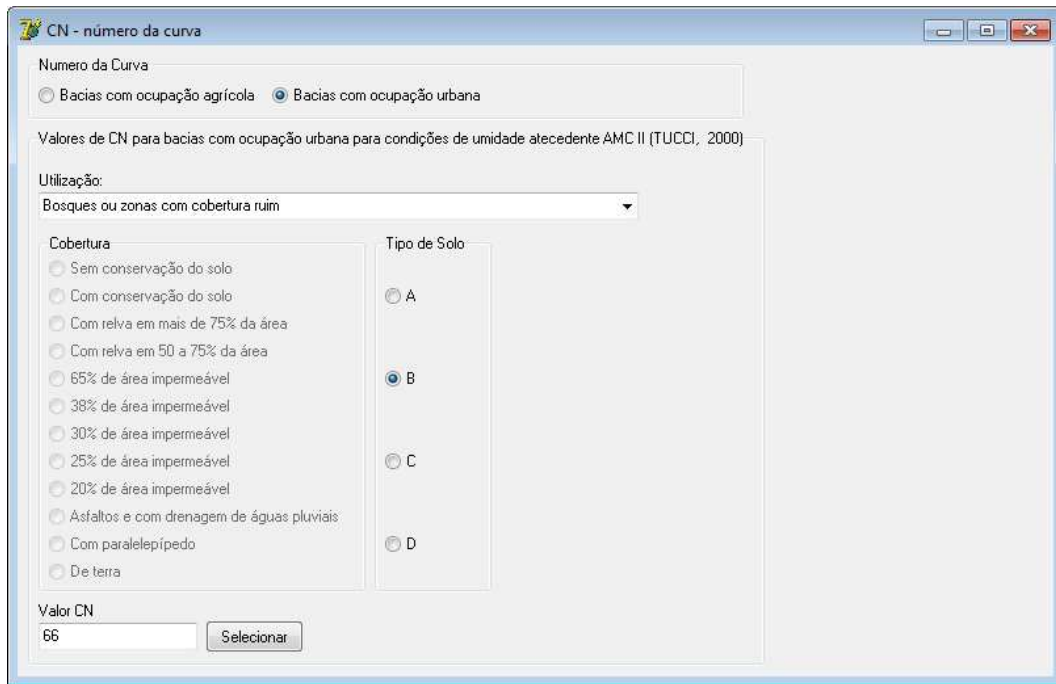


Figura 41 - Tabela para a obtenção de CN para bacias com ocupação urbana.

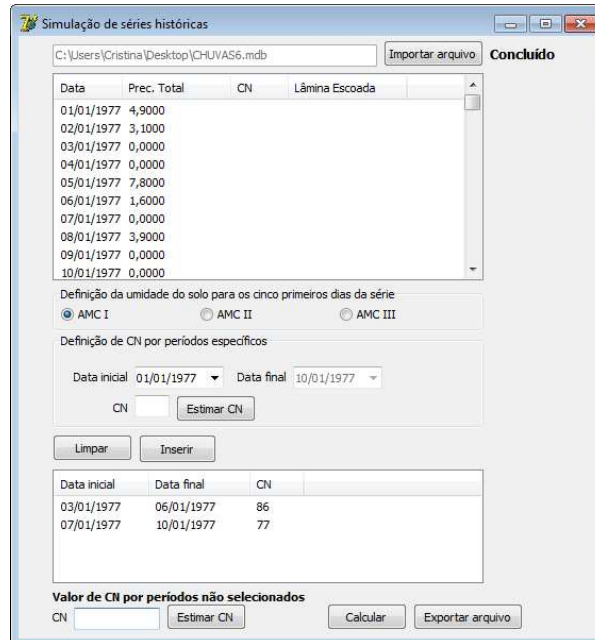


Figura 42 - Vários períodos selecionados.

4.2.4. Definindo valor de CN para períodos não especificados

Na sequência, o usuário deve, obrigatoriamente, selecionar o CN para todos os períodos não definidos, digitando o valor de CN no campo apropriado ou clicando em Estimar CN e selecionando nas tabelas das bacias com ocupação agrícola ou urbana, conforme as telas apresentadas nas Figuras 40 e 41, respectivamente. Na Figura 43 está apresentada a tela contendo o valor de CN para os períodos não selecionados.

Data	Prec. Total	CN	Lâmina Escuada
01/01/1977	4,9000		
02/01/1977	3,1000		
03/01/1977	0,0000		
04/01/1977	0,0000		
05/01/1977	7,8000		
06/01/1977	1,6000		
07/01/1977	0,0000		
08/01/1977	3,9000		
09/01/1977	0,0000		
10/01/1977	0,0000		

Data inicial	Data final	CN
03/01/1977	06/01/1977	86
07/01/1977	10/01/1977	77

Figura 43 - Valor de CN para períodos não selecionados.

4.2.5. Calculando a lâmina escoada

Após o preenchimento de todas as informações, o usuário deve clicar no botão *Calcular*, na tela da Figura 43. Então, o sistema ajusta, quando necessário, os valores de CN de cada dia da série, conforme o valor acumulado da precipitação dos cinco dias antecedentes ao dia analisado. Por fim, com os valores de CN devidamente calculados, o sistema completa a tabela dos dias e precipitações com os valores do CN e da lâmina escoada para cada dia, conforme visualizados na Figura 44.

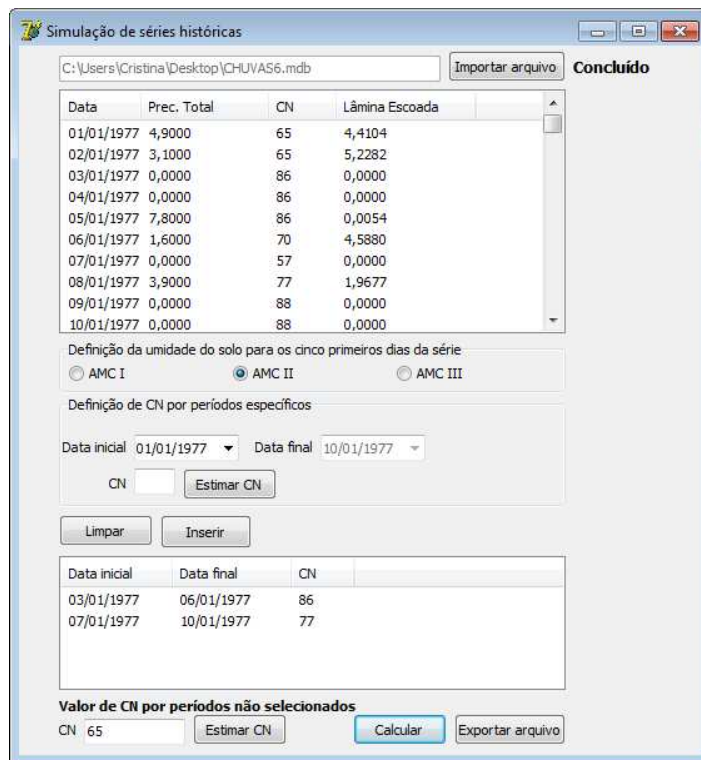


Figura 44 - Tabela completa, contendo os valores de CN e lâmina escoada para cada data.

4.2.6. Exportando o arquivo de dados

Se o usuário quiser, pode ainda exportar os dados da tabela completa em um arquivo texto, para futura impressão e análise. Para tanto, ele deve clicar no botão correspondente e escolher o nome do arquivo e local para salvá-lo. O sistema emite uma mensagem de confirmação, e salva o arquivo texto no local indicado, tal como se observa nas Figuras 45 e 46, respectivamente.

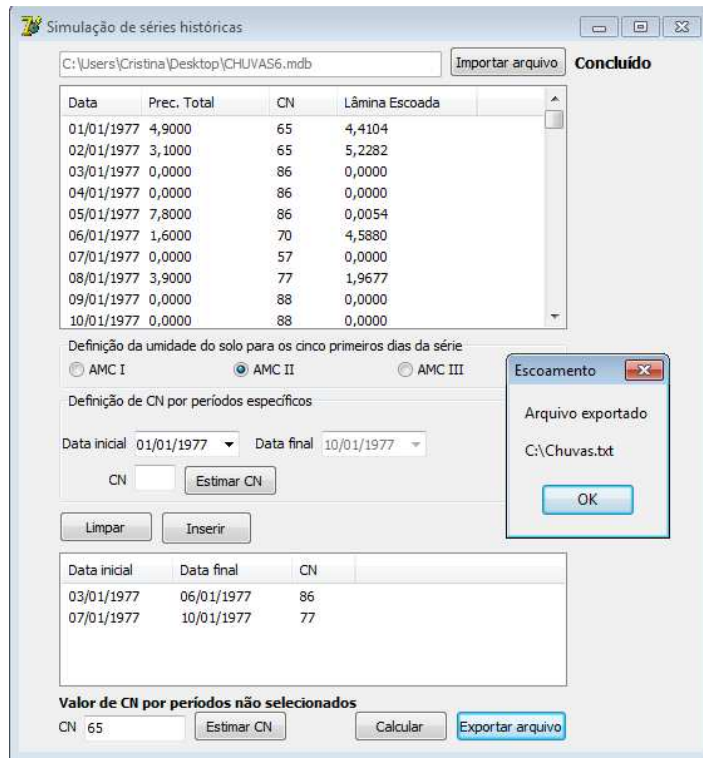


Figura 45 - Mensagem de confirmação de exportação de arquivo.

Chuvvas - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

"Data	Prec. Total	CN	Lâmina Escoadada"
01/01/1977	4,9000	65	4,4104
02/01/1977	3,1000	65	5,2282
03/01/1977	0,0000	86	0,0000
04/01/1977	0,0000	86	0,0000
05/01/1977	7,8000	86	0,0054
06/01/1977	1,6000	70	4,5880
07/01/1977	0,0000	57	0,0000
08/01/1977	3,9000	77	1,9677
09/01/1977	0,0000	88	0,0000
10/01/1977	0,0000	88	0,0000
11/01/1977	0,0000	82	0,0000
12/01/1977	6,4000	82	0,4426
13/01/1977	0,0000	82	0,0000
14/01/1977	15,8000	82	0,3578
15/01/1977	0,0000	82	0,0000
16/01/1977	0,0000	82	0,0000
17/01/1977	0,0000	82	0,0000
18/01/1977	19,8000	82	1,1614
19/01/1977	2,7000	82	1,5098
20/01/1977	23,6000	82	2,2722
21/01/1977	6,4000	82	0,4426
22/01/1977	30,0000	82	4,7621
23/01/1977	6,8000	82	0,3683
24/01/1977	0,2000	82	2,6767
25/01/1977	12,6000	82	0,0367
26/01/1977	13,0000	82	0,0593
27/01/1977	0,0000	82	0,0000
28/01/1977	10,0000	82	0,0243
29/01/1977	2,5000	82	1,5889
30/01/1977	8,6000	82	0,1223
31/01/1977	0,0000	82	0,0000
01/02/1977	12,0000	82	0,0127
02/02/1977	81,8000	82	39,4862
03/02/1977	39,4000	82	9,4994
04/02/1977	12,0000	82	0,0127
05/02/1977	11,6000	82	0,0036
06/02/1977	0,0000	82	0,0000
07/02/1977	4,7000	82	0,8441

Figura 46 - Arquivo exportado.

5. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido neste trabalho traz benefícios para os pesquisadores, profissionais e estudantes da área, pois automatiza cálculos que envolvem muitas equações e variáveis, garantindo maior rapidez na obtenção dos valores e confiabilidade dos mesmos. Na utilização do módulo de obtenção da vazão máxima pelo método Racional o usuário poderá visualizar as características das bacias para as quais cada equação foi estabelecida e o mesmo poderá decidir por uma equação que tenha sido baseada em características semelhantes às da bacia em estudo, resultado em valores de vazão máxima mais próximos dos valores reais. Além disso, o usuário poderá comparar vários resultados de vazão máxima obtidos por diferentes equações para o cálculo do tempo de concentração, pois o sistema permite a navegação pelas diferentes equações, após a inserção das características da bacia.

No módulo para estimativa da lâmina escoada pelo método do Número da Curva o usuário poderá obter uma grande quantidade de valores de lâmina escoada de forma rápida e confiável, eliminando erros humanos nos cálculos e possibilitando a utilização destas informações para análise e avaliação do comportamento desta bacia no que diz respeito a esta grandeza. A utilização do sistema possibilita que o comportamento do escoamento superficial seja mais profundamente conhecido e que profissionais da área o utilizem como fonte de informações para projetos de obras hidráulicas. Tais projetos poderão ser mais bem planejados e executados com maior eficiência, com o intuito diminuir o escoamento superficial, evitando ou amenizando suas consequências. Contudo, o sistema desenvolvido apresenta limitações, tais como a

impossibilidade de utilização de séries históricas de precipitação contendo falhas e a falta de recursos para melhor visualização dos resultados das lâminas escoadas. Ainda, no módulo do cálculo de vazão máxima, faltam algumas equações para o cálculo do tempo de concentração, como a de Izzard.

Sugerem-se, como trabalhos futuros, que este sistema englobe mais equações para a obtenção do tempo de concentração e que, no módulo do Número da Curva, possibilite ao usuário diversas formas de visualização das lâminas escoadas, como relatórios anuais e gráficos, além da sua integração a sistemas que realizem automaticamente o preenchimento de falhas em séries históricas. Este sistema também poderá, futuramente, ser integrado a outros sistemas, para que suas informações sejam utilizadas na avaliação e planejamento de obras de contenção e condução do escoamento superficial.

REFERÊNCIAS

BRAGA, J. C. **Modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para obtenção do hidrograma de escoamento superficial**. 2000. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BRANDÃO, V. S. et al. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 129-138, 2007.

CANTÚ, M. **Dominando o Delphi 5: a bíblia**. São Paulo: Makron, 2000. 860 p.

COGO, N. P. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 743-753, 2003.

MATA-LIMA, H. et al. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, p. 525-536, 2007.

MATOS, A. T.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Barragens de terra de pequeno porte**. Viçosa: UFV, 2000. 122 p. (Caderno didático, 73).

MEDEIROS, D. B. et al. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Riacho Refrigerante em Amaraji-PE. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO. 9, 2009, Recife. **Anais...** Recife, 2009.

MONTEBELLER, C. A. **Influência dos perfis de precipitação nas perdas de solo e água**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, L. F. C. et al. Rotina computacional para a determinação da velocidade de sedimentação das partículas do solo em suspensão no escoamento superficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 126-136, 2005.

PEREIRA, S. B. **Desprendimento e arraste do solo em decorrência do escoamento superficial**. 2000. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREIRA, S. B. et al. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 423-429, 2003.

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgar Blücher, 1976.

PORTO, R. et al. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000. 943 p.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2004. 87 p.

REICHERT, J.M.; CABEDA, M.S. Salpico de partículas e escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, n. 3, p. 390-396, 1992.

SERVIÇO DE CONSERVAÇÃO DE SOLO – SCS. **Manual nacional de engenharia**. Washington: USDA, 2008.

SILVA, J. M. A. et al. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais – parte 1: desenvolvimento e avaliação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 695-703, 2006.

SILVA, J. M. A. et al. Modelo para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas - parte 2: Avaliação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 192-197, 2009.

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas**: desenvolvimento e aplicação. 2002. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001. p. 36-52.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SOUZA, E. S. et al. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 1, p. 69-74, 2007.

SPOHR, R. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 74-81, 2009.

TASSI, R. et al. Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio dilúvio – Porto Alegre-RS. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 1, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2006.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001. 943 p.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

VOLK, L. B. S. **Condições físicas da camada superficial do solo resultantes do seu manejo e indicadores de qualidade para redução da erosão hídrica e do escoamento superficial**. 2006. 149 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477 p.