



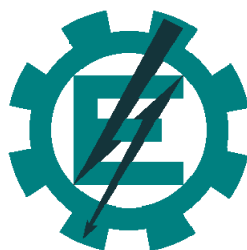
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Mestrado em Engenharia da Energia

***Análise numérica da translação de
ondas de cheia em canais naturais –
Um trecho do Rio Sapucaí/MG***

Artur José Soares Matos

**Itajubá – MG
2007**



***Análise numérica da translação de
ondas de cheia em canais naturais –
Um trecho do Rio Sapucaí/MG***

ARTUR JOSÉ SOARES MATOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

ORIENTADOR: Professor Alexandre Augusto Barbosa

**Itajubá – MG
2007**

À minha namorada Mariana e à
minha avó Nair Machado Mattos.

Agradeço primeiramente a DEUS, causa primária de todas as coisas.

Agradeço ao professor Alexandre Augusto Barbosa, meu orientador, pela confiança e amizade.

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá por mais uma oportunidade proporcionada.

Agradeço aos amigos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, muito obrigado !

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos".

Albert Einstein

ÍNDICE

Índice	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Siglas	vi
Lista de Símbolos	vii
Resumo	x
Abstract.....	xi
Capítulo I Aspectos Preliminares.....	1
I.1. Justificativa	1
I.2. Objetivos	4
Capítulo II Revisão bibliográfica	5
II.1. Estágio Atual.....	5
II.1.1. Trabalhos nacionais	5
II.1.2. Trabalhos internacionais	7
II.2. Propagação de Cheias	10
II.3. Método das Diferenças Finitas	11
II.4. Método das Características	12
II.5. Condições de contorno	15
II.5.1. Não-dinâmica:.....	15
i . Autônoma:	15
ii . Não-autônoma:.....	15
II.5.2. Dinâmica:	15
II.6. Condições de Estabilidade e Convergência	15
II.6.1. Erros de discretização	16
II.6.2. Convergência	16
II.6.3. Consistência	16
II.6.4. Estabilidade.....	16
Capítulo III Metodologia	18
III.1. Caracterização da área de estudo.....	18
III.2. Dados coletados.....	20
III.2.1. Níveis nas seções de controle	20

III.2.2. Topobatimetria	23
III.2.3. Declividade	24
III.2.4. Campo de velocidades nas seções	29
III.3. Construção das curvas-chave das seções de controle.....	29
III.4. Simulação da translação da onda de cheia.....	34
III.4.1. Cálculo da condição inicial nas seções de controle.....	34
III.4.2. Cálculo da propagação da onda de cheia	36
i . Método das Diferenças Finitas.....	36
a. Seção a montante (primeira etapa)	36
b. Seções intermediárias (segunda etapa)	37
c. Seção a jusante (terceira etapa)	38
ii . Método das Características.....	39
a. Seção a montante	39
b. Seções intermediárias.....	42
c. Seção a jusante	44
III.4.3. Condições de estabilidade.....	46
Capítulo IV Resultados.....	47
IV.1. Método das Diferenças Finitas.....	47
IV.2. Método das Características.....	55
Capítulo V Conclusões e Recomendações.....	57
Referências bibliográficas.....	61
Apêndice A: Dados da Topobatimetria	64
Apêndice B: Dados das Ondas de Cheia	66
Apêndice C: Método das Características	69
Apêndice D: Dados - DGPS.....	73
Apêndice E: Programa Translação de ondas de cheia – Método das Diferenças Finitas.....	74
Apêndice F: Programa Translação de ondas de cheia – Método das Características.....	89
Apêndice G: Programa gerador de curva chave	105

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1 Enchente de 2000 em Itajubá	2
Figura I-2 Enchente de 2007 em Itajubá	3
Figura I-3 Enchente de 2007 em Santa Rita do Sapucaí	3
Figura II-1 Simulação com o modelo IPH IV	5
Figura II-2 Simulação em canal artificial utilizando o método das características	7
Figura II-3 Comparação entre profundidade experimental e calculada em canais laboratoriais.....	8
Figura II-4 Simulação no Rio Loire.....	8
Figura II-5 Simulação no rio Tanshui utilizando o método das diferenças finitas implícito.....	10
Figura II-6 Condição do escoamento a montante	14
Figura II-7 Condição do escoamento no canal	14
Figura II-8 Representação do método das características.....	17
Figura III-1 Município de Itajubá.....	18
Figura III-2 Identificação do trecho de estudo	19
Figura III-3 Seção de controle a montante – Cantagalo.....	19
Figura III-4 Seção de controle a jusante – Captação-Copasa.....	20
Figura III-5 Níveis das seções do Cantagalo e da Captação-Copasa	21
Figura III-6 Onda de cheia 1	22
Figura III-7 Onda de cheia 2	22
Figura III-8 Onda de cheia 3	23
Figura III-9 Seção Cantagalo	23
Figura III-10 Seção Captação-Copasa.....	24
Figura III-11 Declividades do Rio Sapucaí em cheias e em nível de vazante.....	25
Figura III-12 Foto aérea do município de Itajubá	26
Figura III-13 DGPS base fixa na estação Captação-Copasa	27
Figura III-14 DGPS base móvel e estação total na ponte Santo Antônio.....	27

Figura III-15 Determinação do nível d'água	28
Figura III-16 Declividade do Rio Sapucaí entre a ponte Santo Antônio e a Ponte da Imbel	28
Figura III-17 Medição dos perfis de velocidades	29
Figura III-18 Tela inicial do programa Gerador de curva chave 3.0	30
Figura III-19 Curva do coeficiente de Manning na seção Cantagalo	31
Figura III-20 Curva do coeficiente de Manning na seção Captação-Copasa.....	31
Figura III-21 Curva-Chave da seção Captação-Copasa.....	33
Figura III-22 Curva-Chave da seção Cantagalo	33
Figura III-23 Método das características para a seção de controle.....	40
Figura III-24 Método das características para as seções intermediárias.....	42
Figura III-25 Método das Características para a seção distante	44
Figura IV-1 Resultado das simulações para a onda de Cheia 1.....	48
Figura IV-2 Resultado da simulação para a onda de cheia 1 na seção Captação-Copasa	49
Figura IV-3 Resultado das simulações para a onda de Cheia 2.....	50
Figura IV-4 Resultado da simulação para a onda de cheia 2 na seção Captação-Copasa	51
Figura IV-5 Resultado das simulações para a onda de Cheia 3.....	52
Figura IV-6 Resultado da simulação para a onda de cheia 3 na seção Captação-Copasa	53
Figura IV-7 Correlação de níveis para a onda de cheia 1	54
Figura IV-8 Correlação de níveis para a onda de cheia 2	54
Figura IV-9 Correlação de níveis para a onda de cheia 3	55
Figura IV-10 Simulação com o método das características para a onda de cheia 1	56
Figura V-1 Início da simulação para a onda de cheia 1.....	58
Figura V-2 Simulação das ondas de maior e menor magnitude	59

LISTA DE TABELAS

Tabela I-1 Datas das Enchentes	1
Tabela II-1 Resultado da simulação aplicando redes neurais.....	6
Tabela III-1 Medições de vazão nas seções de controle	29
Tabela III-2 Dados observados de níveis constantes nas seções de controle	32
Tabela A-1 Dados da topobatimetria das seções de controle.....	64
Tabela A-2 Dados das ondas de cheias utilizadas na simulação	66
Tabela A-3 Dados obtidos ao longo do trecho estudado	73

LISTA DE SIGLAS

Copasa – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

DGPS – Diferencial Global Position System

IEF – Instituto Estadual de Florestas

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área (m);

b – Largura do fundo do canal (m);

B – Largura de topo (m);

c – Celeridade da onda (m/s);

D – Profundidade Hidráulica (m);

F – Função;

g – Gravidade (m/s^2);

h – Nível (m)

H – Energia total (m);

K – Capacidade de transporte;

M – Fator M

n – Número de Manning;

Pm – Perímetro Molhado (m);

Q – Vazão (m^3/s);

R^2 – Fator de correlação;

Rh – Raio Hidráulico (m);

S_f ou I_f – Declividade da linha de energia;

S_0 ou I_0 – Declividade do fundo do canal;

T – Largura de topo (m);

t – Tempo (s);

V – Velocidade (m/s);

v – Velocidade (m/s);

y – Nível da água considerando o fundo do canal (m);

y_{Rn} – Cota altimétrica do nível da água (m);

Subscritos

d – Ponto a jusante;

f – Linha de energia;

i – Contador numérico;

j – Contador numérico,

k – Contador numérico;

o – Fundo do canal;

p – Ponto a ser calculado pelo método das características;

s – Seção;

u – Ponto a montante;

Sobrescritos

- Da característica negativa;
- + Da característica positiva;

Símbolos

α – Coeficiente de Coriolis, ou de energia cinética;

α – Fator de relaxação;

θ – Ponderação entre espaços;

Δh – Diferença de energia total

Δx – Incremento do espaço (m);

Δt – Incremento de tempo (s);

φ – Dado pela expressão (III-8)

Ω – Parte da equação característica;

RESUMO

No estudo da propagação de uma onda de cheia, vários aspectos devem ser analisados, tais como: a perda de carga, o efeito de armazenamento, os efeitos cinemáticos e a própria translação da onda. Nesse estudo, foram usados modelos hidráulicos, que utilizam as equações de Saint-Venant sem simplificações. Para a resolução destas equações parciais hiperbólicas, utilizou-se a técnica numérica do método das diferenças finitas explícito e o método das características. Estes métodos foram aplicados no estudo da translação de uma onda de cheia em um trecho do Rio Sapucaí, localizado no município de Itajubá-MG. O método das características se mostrou instável durante as simulações e os resultados não foram satisfatórios, o mesmo não ocorreu com o método das diferenças finitas, onde se obteve bons resultados e a sua eficácia foi verificada por meio de dados reais coletados em campo. A metodologia utilizada se mostrou eficiente e os dados obtidos na simulação ficaram próximos dos dados reais, logrando-se o objetivo proposto.

Palavras-chave: Propagação de cheias, Saint-Venant, Método das diferenças finitas, Método das Características, Rio Sapucaí.

ABSTRACT

In a routing of flood study, many points must be analyzed, such as: head lost, channel storage, kinematics effects and the proper wave routing. In this study, it has been used a hydraulic method, which is based in Saint-Venant equations without simplifications. For the resolution of these partial hyperbolic equations, it was used a numerical technique of the explicit finite-difference method and the characteristics method. These methods have been applied in a flood routing study in a Sapucaí River stretch located in the city of Itajubá-MG (Brazil). The method of characteristics has showed to be unstable during the simulations and the results have not been satisfactory. The same did not occur with the finite-difference method where it got good results and its effectiveness was verified with the collected real data in field. The methodology has showed to be efficient and the data gotten in the simulation has been close to the real data, getting the considered objective.

Keywords: Flood routing, Saint-Venant, Finite-difference Method, Method of Characteristics, Sapucaí River.



Capítulo I Aspectos Preliminares

I.1. Justificativa

Os municípios de Itajubá, Piranguinho e Santa Rita do Sapucaí, localizados no Sul de Minas Gerais, inseridos na sub-bacia do Alto Sapucaí, tendo como seu rio principal o rio Sapucaí, apresentam, atualmente, população aproximada de 150.000 habitantes, dos quais estima-se que 120.000 residam em áreas inseridas na planície de inundação do rio Sapucaí. Segundo PINHEIRO (2005), enchentes vem atingindo o município de Itajubá ao longo do tempo, como mostrado na tabela I-1.

Tabela I-1 Datas das Enchentes

Fonte: Adaptado de PINHEIRO (2005)

MÊS	ANO	PORTE
03	1874	Grande
01	1881	Grande
	1905	Grande
	1929	Grande
02	1945	Grande
01	1949	Grande
02	1956	Médio
01	1957	Grande
01	1981	Grande
01	1987	Grande
01	1991	Grande
01	2000	Grande
01	2007	Médio

A planície de inundação apresenta uma topografia favorável às ocupações pelas atividades antrópicas (apesar da proibição legal que consta na Lei Estadual 14309/2002 do IEF-MG), com seus terrenos planos, sendo uma das áreas passíveis de desenvolvimento, no domínio dos vales encaixados e estreitos da Serra da Mantiqueira. No caso do rio Sapucaí, fica notável a crescente ocupação a partir da foz do rio de Bicas, inicialmente com estabelecimentos rurais, culturas irrigadas e pastagens.

Chuvas acima de 30 mm/hora e com tempo de duração superior a 2 horas configuram-se como um grande potencial de geração de cheias da bacia do rio Sapucaí, evidenciando a vulnerabilidade da cidade de Itajubá (a cidade mais a



montante). Por outro lado, a ocorrência das enchentes está relacionada às chuvas frontais, que se apresentam com distribuição espacial generalizada em toda a bacia. Todos os eventos de cheias analisados foram decorrentes de chuvas com duração superior a 8 horas e distribuídas em toda a área da bacia. Chuvas convectivas, concentradas em pequenas áreas, ou temporais de curta duração, não possuem potencial para gerar enchentes na bacia do rio Sapucaí.

A ocorrência de chuvas frontais na bacia, atingindo simultaneamente as áreas de contribuição das cabeceiras do rio Sapucaí e de seus principais afluentes, rios de Bicas e Santo Antônio, produz uma combinação de hidrogramas de cheias no início do trecho fluvial em planície, compondo uma onda que se propaga eventualmente transbordando para a calha maior, nos eventos de maior magnitude.

Com base na dissertação de mestrado “Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá - PINHEIRO (2005)”, pode-se concluir que o período de retorno do transbordamento do rio Sapucaí na cidade de Itajubá é de 3,22 anos e das inundações que atingem a área urbana, de forma generalizada, é da ordem de 4,15 anos, o que resulta em uma probabilidade de ocorrência da ordem de 24,1% em um ano qualquer, correspondendo a uma vazão de 158 m³/s. Na cheia de janeiro de 2000 (Figura I-1), as vazões foram da ordem de 589 m³/s e na cheia recente de janeiro de 2007 (Figura I-2) a vazão foi da ordem de 270 m³/s. Trata-se de um risco elevado para uma zona urbana, caracterizando Itajubá como uma cidade bastante vulnerável às inundações.



Figura I-1 Enchente de 2000 em Itajubá

Fonte: PINHEIRO (2005)



Figura I-2 Enchente de 2007 em Itajubá

Outra cidade atingida pelas enchentes é a cidade de Santa Rita do Sapucaí como mostra a figura I-3



Figura I-3 Enchente de 2007 em Santa Rita do Sapucaí



O estudo de translação de ondas de cheias, ao longo do rio Sapucaí, torna-se imprescindível para estudos de previsão de cheias na bacia do Alto Sapucaí. A proposta de uma previsão de cheias é factível e viável em função da necessidade de se trabalhar com medidas não só estruturais para o controle de cheias no Brasil.

I.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

1. Desenvolver um programa computacional baseado nas equações de Saint-Venant para analisar a propagação de ondas de cheia na calha principal de um canal natural, estudando, como caso base, o rio Sapucaí localizado no Sul de Minas Gerais;
2. Comparar a técnica das diferenças finitas com o método das características e;
3. Oferecer subsídios para o estudo da previsão de eventos de cheias na sub-bacia do Alto Sapucaí.

Capítulo II Revisão bibliográfica

II.1. Estágio Atual

Vários trabalhos nacionais e internacionais estudam a previsão de vazão/nível em canais naturais. Alguns utilizam modelos chuva-vazão, outros, os modelos vazão-vazão e outros, ainda, utilizam os dois modelos concomitantemente.

II.1.1. Trabalhos nacionais

O modelo Hidrológico-Hidrodinâmico IPH IV, que na sua simulação hidrodinâmica baseia-se nas equações de Saint Venant resolvidas por um esquema de diferenças finitas implícito, é utilizado por CAMPANA & TUCCI (1999), em Porto Alegre, para estudar a previsão de vazão em macrobacias. O resultado de uma simulação é mostrado na figura II-1.

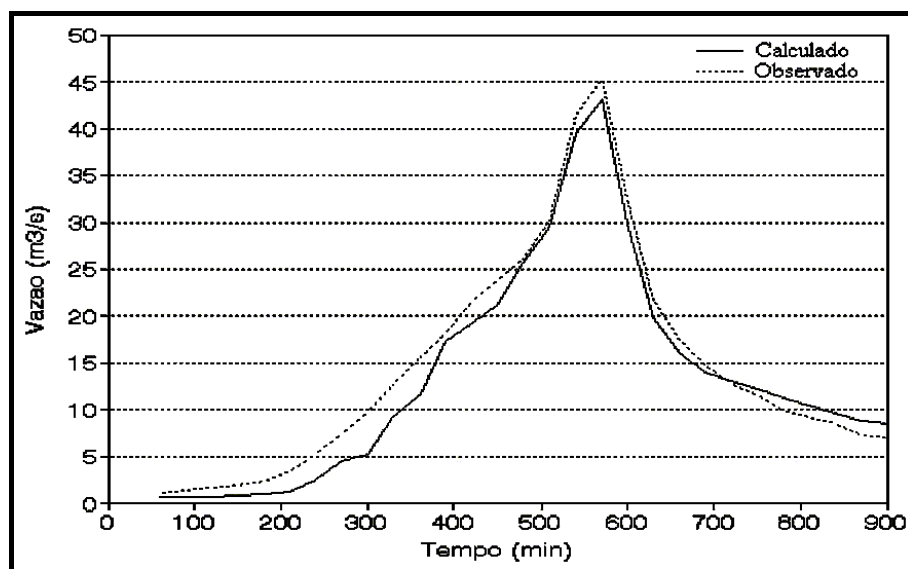


Figura II-1 Simulação com o modelo IPH IV

Fonte: CAMPANA & TUCCI (1999)

No trabalho de VIANNA (2000), foi utilizado o modelo HEC-RAS, em regime permanente, para simular os picos das cheias de janeiro de 1991 e janeiro de 2000

em Itajubá/MG. Os resultados das simulações foram utilizados para elaborar uma carta de enchentes em Itajubá, com os respectivos tempos de retorno. Esse modelo trabalha com os conceitos de escoamentos gradualmente variados.

No trabalho de MÜLLER & FILL (2003) é estudada a aplicação de redes neurais em problemas de propagação de vazões, utilizando o trecho do rio Iguaçu/PR entre Fluviópolis e União da Vitória. A análise comparativa mostrou um erro médio de 3 a 8% nos resultados obtidos. Os resultados são apresentados na tabela II-1.

Tabela II-1 Resultado da simulação aplicando redes neurais

Fonte: MÜLLER & FILL (2003)

		Vazão máxima calculada (m ³ /s)	Vazão máxima Observada (m ³ /s)	Diferença entre picos	
				Vazão (m ³ /s)	Percentual (%)
Calibração	1982				
	RN	2197,39	2210	12,61	-0,57
	1983				
	RN	5301,1	5386,67	85,57	-1,58
	1987				
RN	2279,7	2376,67	96,97	-4,08	
Verificação	1990				
	RN	2214	2210	-4	0,18
	1992				
	RN	4000	3800	-200	5,26
	1993				
	RN	2965,22	2820	-145,22	5,15
	1995				
RN	2566,87	2450	-116,87	4,77	

TRINDADE (2003) estuda a propagação de ondas em canais utilizando o método dos elementos de contorno. Este estudo foi simulado em laboratório e a simulação numérica utilizada foi a formulação mista Eurliana-Lagrangeana.

No trabalho de BARBOSA & MATOS (2004), é apresentado o estudo de propagação de ondas de cheias em canais artificiais utilizando o método das características. Os resultados da simulação são mostrados na figura II-2.

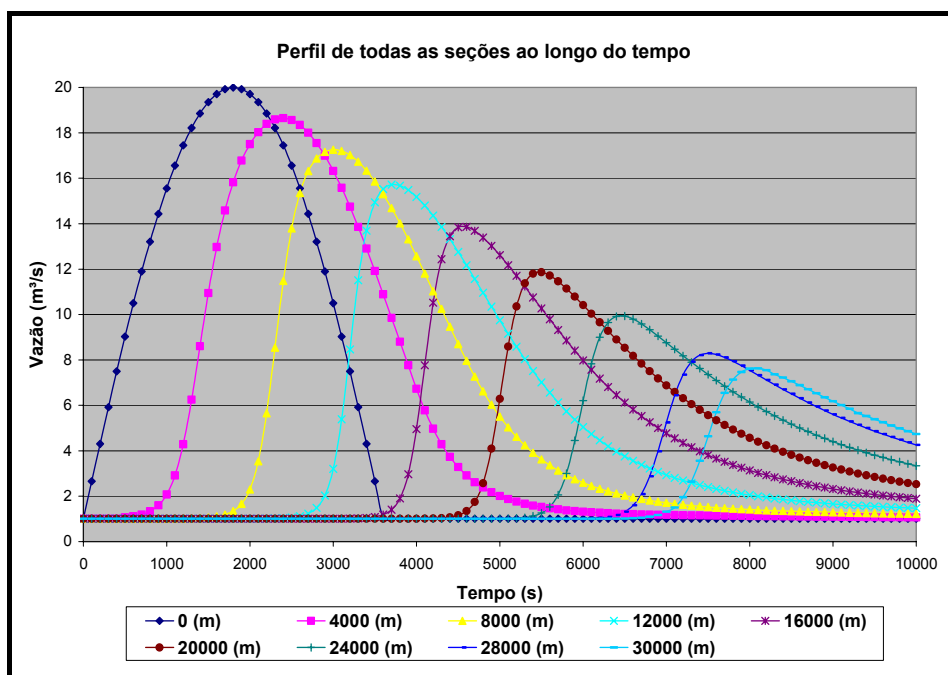


Figura II-2 Simulação em canal artificial utilizando o método das características

Fonte: BARBOSA & MATOS (2004)

Simulações hidrológicas utilizando modelos chuva-vazão são também comumente apresentadas, como é o caso de FERREIRA (2004) que utiliza o modelo Topmodel em bacias rurais, e o caso de MOREIRA (2005) que utiliza o modelo IPH II.

II.1.2. Trabalhos internacionais

RASHID & CHAUDHRY (1995) estudaram as propagações de ondas de cheia em canais laboratoriais nos Estados Unidos. As equações de Saint-Venant foram simuladas pelo método das diferenças finitas. Os resultados mostraram-se satisfatórios. O resultado de um dos testes é mostrado na figura II-3.

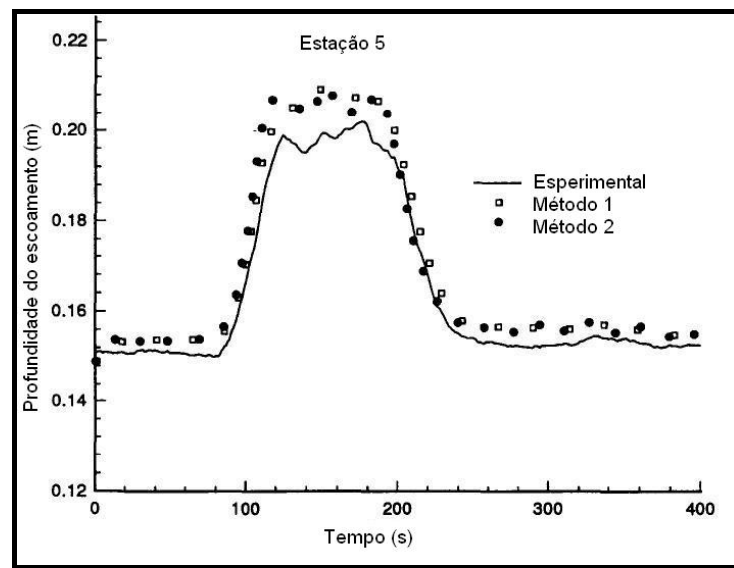


Figura II-3 Comparação entre profundidade experimental e calculada em canais laboratoriais

Fonte: RASHID & CHAUDHRY (1995)

MOUSSA, et al. (1996) exploram as equações de Saint-Venant, na sua forma difusiva, com balanço entre forças de inércia e atrito. Houve, nesse trabalho, a discussão sobre as instabilidades numéricas da onda difusiva em regime permanente. A simulação foi utilizada para a propagação de cheias ao longo do Rio Loire (França) e uma dessas simulações é mostrada na figura II-4.

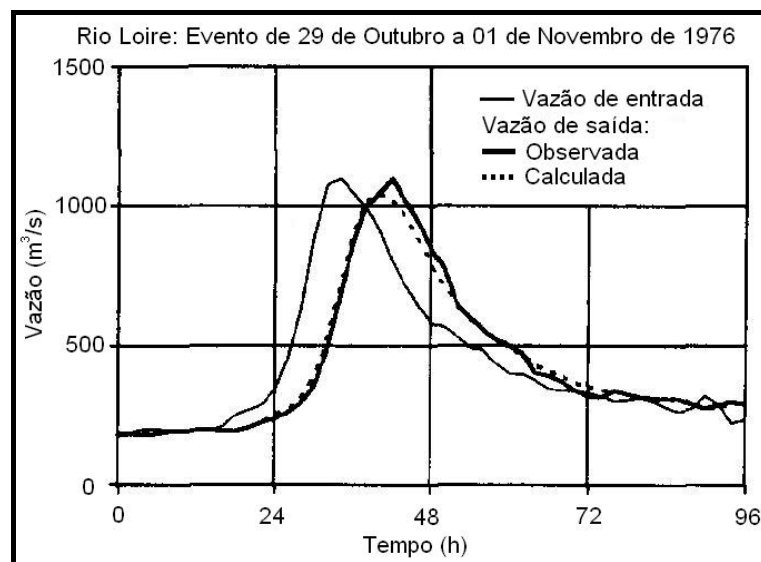


Figura II-4 Simulação no Rio Loire

Fonte: MOUSSA & BOUQUION (1996)



No trabalho de BATES & DE ROO (2000), foram feitas simulações de ondas de cheias (cinemática para o canal e difusiva para a planície de inundação) para o Rio Meuse (Holanda), com base no evento crítico de Janeiro de 1995. Foram comparados os resultados das simulações com aqueles gerados por modelos digitais de terreno (MDT).

No trabalho de KIM & BARROS (2001), utilizou-se modelos chuva-vazão para estimar vazões nos rios da Pensilvânia (EUA). Os dados dos eventos meteorológicos foram trabalhados com redes neurais.

No trabalho de YEN & TSAI (2001), foram comparados os modelos de propagação de cheias: o de onda não-inercial e o de onda difusiva. Os autores afirmaram que o caso não-inercial é uma simplificação da onda difusiva.

No trabalho de HERRITT & BATES (2002), foram estudados modelos unidimensionais de propagação de cheias – HEC-RAS e LISFLOOD – e o modelo bidimensional – TELEMAC2D. Ao longo do Rio Severn (Inglaterra), os modelos HEC-RAS e TELEMAC2D apresentaram bons resultados com dados de campo. Contudo, o modelo LISFLOOD precisou de várias calibrações para apresentar bons resultados.

No trabalho de HSU, et al. (2003), foram utilizadas as equações de Saint-Venant, em regime não-permanente, para simulação de propagação de ondas de cheia no Rio Tanshui (Taiwan). O modelo foi calibrado com os eventos críticos originados por quatro tufões (que comumente atingem a ilha). Os níveis observados em tempo real do rio são especificados como as condições de contorno internas para o modelo da rotina, a fim de corrigir os níveis e de ajustar a vazão calculada em tempo real. Neste modelo foi utilizado o método das diferenças finitas implícito. Na figura II-5 são mostrados os resultados com a correção interna do nível, resultados sem a correção interna e os níveis reais observados.

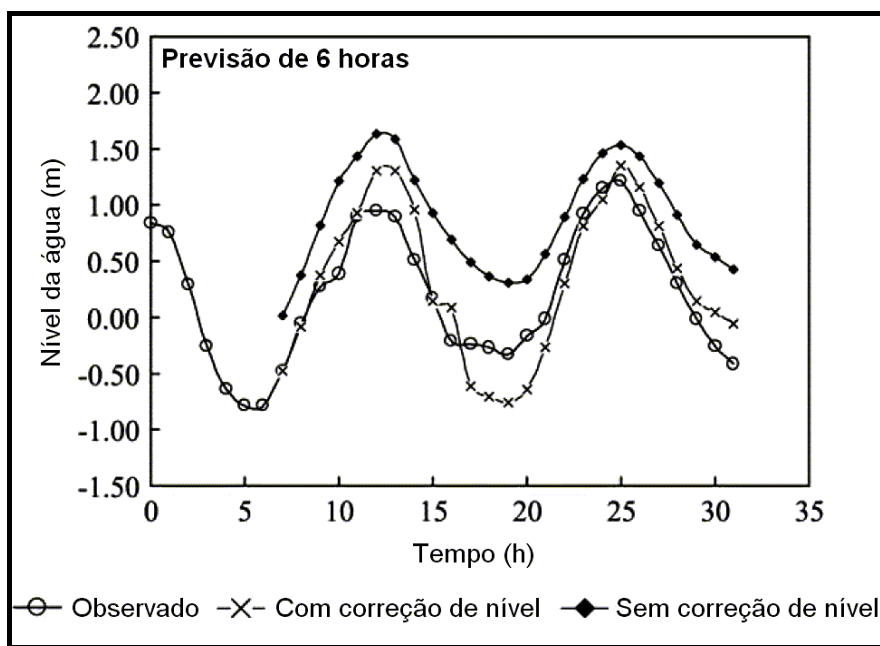


Figura II-5 Simulação no rio Tanshui utilizando o método das diferenças finitas implícito
Fonte: HSU (2003)

II.2. Propagação de Cheias

“O movimento da cheia pode ser tratado simplesmente como um escoamento uniforme progressivo se o canal é regular, a resistência é baixa e a onda permanece inalterada. Se, entretanto, o canal é irregular e a resistência é alta, a configuração da onda será apreciavelmente modificada com a sua movimentação através do canal. A determinação desta modificação do escoamento é chamada de *propagação de cheias*” (CHOW, 1959).

“Na engenharia hidráulica, a propagação de cheias é uma importante técnica para a completa solução do problema de controle de cheias e para a satisfatória operação do serviço de previsão de cheias. Para alguns propósitos, o cálculo da propagação de cheias é conhecido como um procedimento requerido a fim de determinar o hidrograma em um ponto do rio oriundo de um hidrograma conhecido em um ponto a montante” CHOW (1959).

“O método hidráulico para propagação de cheias é diferente do método hidrológico pelo fato do método hidráulico ser baseado na solução de equações



diferenciais básicas para escoamento não-permanente em canais abertos, ao passo que o método hidrológico não faz o uso direto dessas equações, mas aproximações para suas soluções. O método hidrológico é em geral mais simples, mas falha em dar um conjunto satisfatório de resultados em outros problemas, do que aquele que determina o progresso da cheia ao longo do rio. Por exemplo, quando a cheia vem através de uma confluência, é produzido geralmente um remanso. Quando a cheia é regulada por uma barragem, ondas são geralmente envolvidas. O efeito de remanso e o efeito das ondas nesses problemas podem ser exatamente avaliados somente pelas equações básicas da hidráulica trabalhadas em um método hidráulico, mas não por um método hidrológico” CHOW (1959).

Segundo PORTO (2003), o estudo em um curso d’água natural é um processo muito mais complexo, devido à variação espacial da geometria da calha, da declividade e do coeficiente de rugosidade, o que exige um grande esforço matemático e o levantamento de dados em campo.

II.3. Método das Diferenças Finitas

“O processo numérico de resolução de equações diferenciais, ordinárias ou parciais, consiste em substituir os termos que contenham derivadas por aproximações de diferenças finitas e resolver as equações algébricas resultantes” (PORTO, 2003).

As seguintes equações para escoamento não-permanente podem ser escritas:

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq. II-1})$$

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial V}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \quad (\text{Eq. II-2})$$

$\partial y / \partial x$ é a declividade da superfície da água;

$\partial y / \partial t$ é a variação da profundidade com o tempo;

$\partial V / \partial x$ é a variação da velocidade com a distância;

$\partial V / \partial t$ a variação da velocidade com o tempo;



S_o é a declividade do canal;

S_f é a declividade da linha de energia;

dy é a variação da profundidade do canal e

dV é a variação da velocidade do canal.

Segundo PORTO (2003), as equações II-1 e II-2 foram estabelecidas pela primeira vez por *Saint-Venant* em 1870 e constituem um sistema de duas equações, em derivadas parciais, em x e t , que descrevem, sob as hipóteses fixadas, os escoamentos não permanentes em canais. A integração exata das equações de Saint Venant é muito complicada e sua solução analítica só é possível em casos muito especiais.

II.4. Método das Características

(Baseado em CHOW, 1959)

Muitos métodos de solução para as equações de Saint Venant tem como princípio geral o *Método das características*, que é baseado na solução de um conjunto de equações características para escoamento não-permanente.

“Neste método as equações diferenciais parciais são inicialmente convertidas em equações diferenciais ordinárias, que são resolvidas por uma técnica explícita de diferenças finitas. Cada condição de contorno é analisada separadamente com as equações de diferenças do sistema, o que facilita a aplicação do método para sistemas complexos. Outras vantagens são: condições de contornos facilmente programáveis, melhor precisão que qualquer método de diferenças finitas, facilidade de depuração de programas” BORDÓN (1992).

Por esse método as seguintes equações para escoamento não-permanente podem ser escritas:



$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = S_0 - S_f \quad (\text{Eq. II-3})$$

$$D \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq. II-4})$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial t} dt = dy \quad (\text{Eq. II-5})$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial t} dt = dV \quad (\text{Eq. II-6})$$

As equações características, como demonstrado no apêndice C, podem ser escritas:

$$\frac{dx}{dt} = V + c \quad (\text{Eq. II-7})$$

$$d(V + 2c) = g(S_0 - S_f) dt \quad (\text{Eq. II-8})$$

$$\frac{dx}{dt} = V - c \quad (\text{Eq. II-9})$$

$$d(V - 2c) = g(S_0 - S_f) dt \quad (\text{Eq. II-10})$$

Pode ser visto que as Eqs. (II-7) e (II-9) expressam a velocidade da onda de propagação. Essas equações podem ser representadas graficamente no plano xt , como mostrado nas figuras II-6 e II-7. Para um incremento finito de tempo Δt , o ponto p representa a posição da seção do canal sob consideração no tempo $t + \Delta t$, e os pontos u e d representam, respectivamente, as posições de certas seções a montante e a jusante no tempo t . A velocidade da onda de propagação pode ser representada pela declividade das linhas construídas no plano xt . Quando o escoamento é subcrítico, como na maioria dos rios, isto é, quando $V < c$, a declividade da linha $u-p$, torna-se positiva, representando $V + c$ da Eq. (II-7) e a declividade da linha $d-p$, torna-se negativa, representando $V - c$ da Eq. (II-9). Essas linhas $u-p$ e $d-p$ são chamadas de *características*.

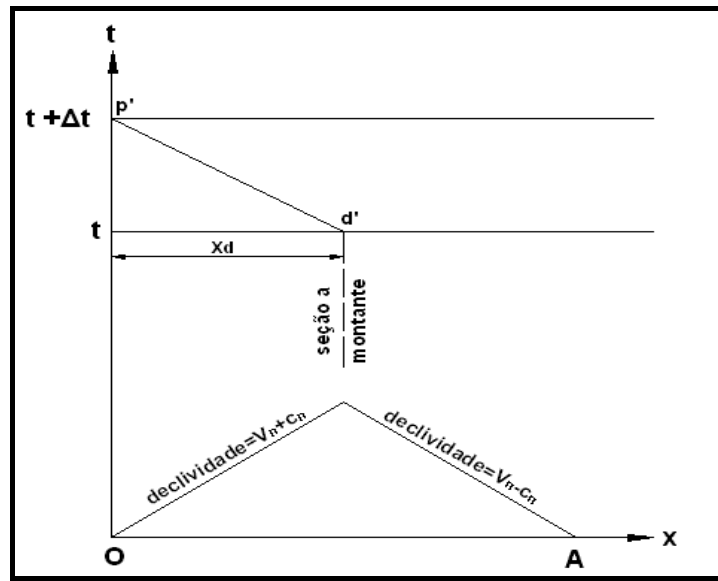


Figura II-6 Condição do escoamento a montante

Fonte: CHOW (1959)

O ponto u representa a posição da seção a montante, da qual se originará uma onda infinitesimal, que chegará na seção p depois do intervalo de tempo Δt . Similarmente, o ponto d representa a posição da seção a jussante da onda infinitesimal, que chegará na seção p depois do intervalo de tempo Δt . Como podemos ver na figura:

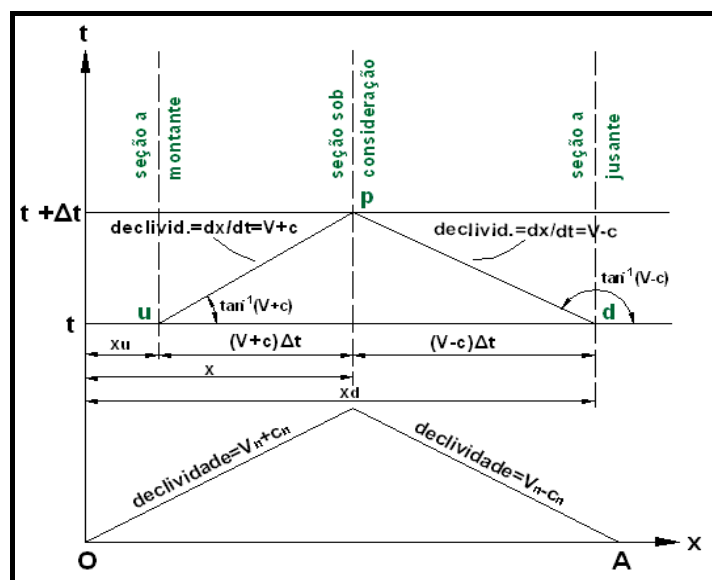


Figura II-7 Condição do escoamento no canal

Fonte: CHOW (1959)



II.5. Condições de contorno

Temos dois tipos de condições de contorno, de acordo com BORDÓN (1992) apud EVANGELIST (1969), as chamadas não-dinâmicas e as dinâmicas:

II.5.1. Não-dinâmica:

A condição de contorno é dita não-dinâmica se é representada por equação algébrica do tipo:

$$F[y(t), Q(t), t] = 0$$

E se dividem em dois tipos, autônoma e não-autônoma:

i . Autônoma:

Se não contiver explicitamente a variável t:

$$F[y(t), Q(t)] = 0$$

ii . Não-autônoma:

Se contiver explicitamente a variável t:

$$F[y(t), Q(t), t] = 0$$

II.5.2. Dinâmica:

A condição é dita dinâmica se a relação entre y e Q depende da evolução da onda de cheia, não podendo ser previamente fixada.

II.6. Condições de Estabilidade e Convergência

Segundo BORDÓN (1992) apud CHAUDRY (1982), para se obter uma solução numérica razoavelmente precisa de uma equação diferencial parcial, as aproximações por diferenças finitas devem satisfazer a condição de convergência e estabilidade. Embora inter-relacionadas estas diferem entre si.



II.6.1. Erros de discretização

Admitindo-se que $V(x,t)$ é uma solução exata da equação diferencial parcial tendo x e t como variáveis independentes e que $v(x,t)$ é uma solução exata da equação de diferenças finitas que aproxima a equação diferencial parcial. A diferença $(V-v)$ é designada como erro de discretização e sua magnitude depende da malha $(\Delta x, \Delta t)$ e das aproximações feitas para as derivadas. Com a diminuição da malha diminui o erro de discretização.

II.6.2. Convergência

Um esquema de diferenças finitas é dito convergente se v tende a V à medida que Δx e Δt tendem à zero. É difícil desenvolver diretamente as condições de convergência, entretanto, têm sido desenvolvidos procedimentos para investigar a convergência das equações hiperbólicas lineares por meio de condições de estabilidade e consistência. Um esquema de diferenças finitas é dito convergente se ele é consistente com a equação diferencial e se satisfaz a condição de estabilidade.

II.6.3. Consistência

Seja $F_{i,j}(v) = 0$ a representação de diferenças finitas no ponto (i, j) da rede. Substituindo a solução exata da equação diferencial parcial, V , na equação de diferenças finitas, $F_{i,j}(V) = \delta_i$ é chamado de erro de truncamento local no ponto (i, j) da rede. Se esse erro tende a zero, à medida que Δx e Δt tendem à zero, então a equação é dita consistente com a equação diferencial.

II.6.4. Estabilidade

Ao se resolver equações de diferenças finitas, uma solução exata $v(x,t)$ somente será obtida se os cálculos forem feitos até um número infinito de casas decimais. No entanto, como os cálculos são feitos com um número finito de casas decimais, erros de arredondamento, R , são introduzidos a cada passo. Portanto, a solução numérica N , que se obtém é diferente da solução exata, v . Daí surge o erro de arredondamento global, $R = (v-N)$. Se o erro de arredondamento não cresce em limites ao avançar-se o cálculo, então o esquema de diferenças finitas é estável.

O método só é estável se:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq c \quad (\text{Eq. II-11})$$

A equação II-11 é conhecida como condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy. No método das características, geometricamente, esta condição exige que as linhas características que passam por p interceptem a linha $u-d$ entre $u-s$ e $d-s$, como podemos observar na figura II-8.

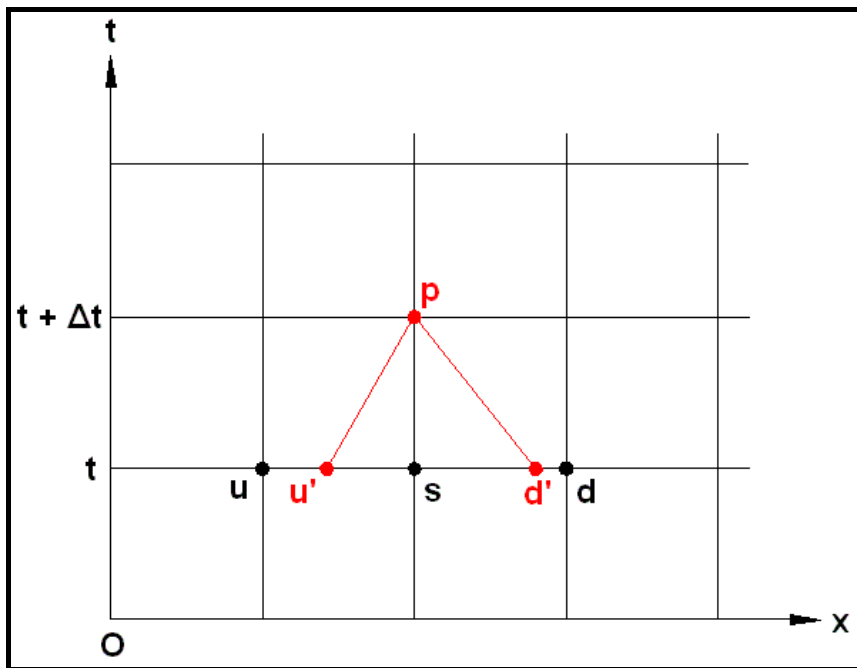


Figura II-8 Representação do método das características

Fonte: BARBOSA & MATOS (2004)

Capítulo III Metodologia

III.1. Caracterização da área de estudo

Foi estudado um trecho do rio Sapucaí, na bacia do Alto Sapucaí, localizado no município de Itajubá (figura III-1).



Figura III-1 Município de Itajubá

Fonte: Prefeitura Municipal de Itajubá

O trecho do rio Sapucaí estudado é mostrado na figura III-2 onde são identificadas as duas seções de controle: seção do Cantagalo (seção a montante) e a seção da Captação-Copasa (seção a jusante). Nas figuras III-3 e III-4 são mostradas as seções de controle.

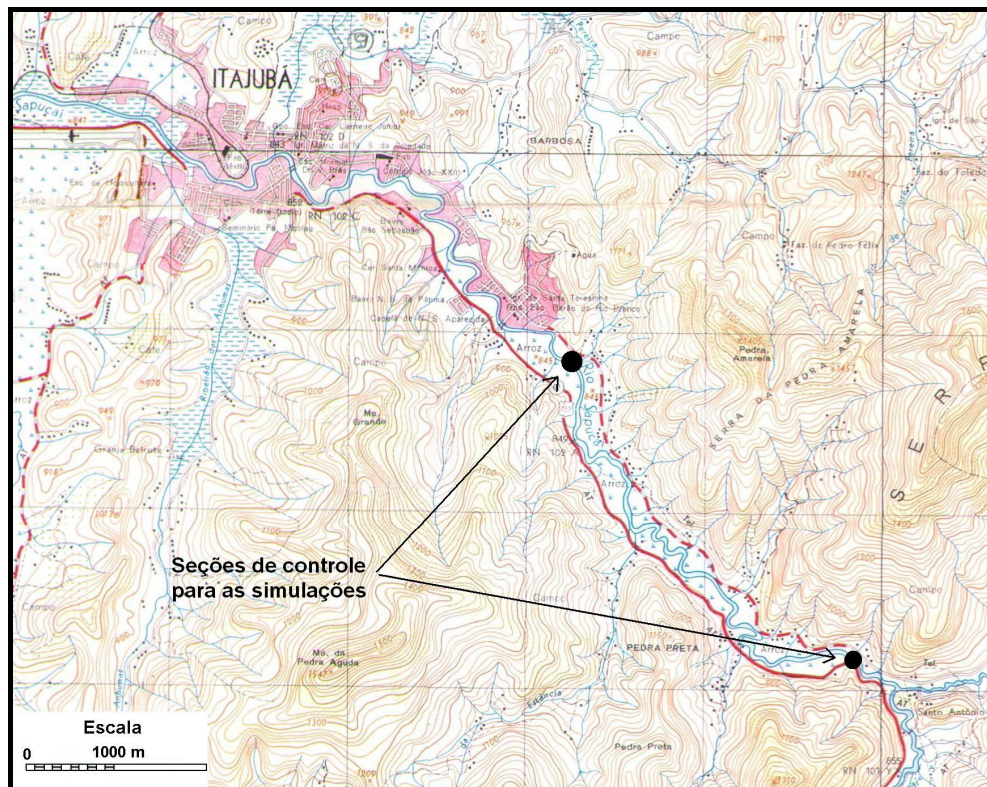


Figura III-2 Identificação do trecho de estudo

Fonte: IBGE



Figura III-3 Seção de controle a montante – Cantagalo



Figura III-4 Seção de controle a jusante – Captação-Copasa

III.2. Dados coletados

Os dados coletados em campo foram:

1. Níveis nas seções de controle;
2. Topobatimetria das seções;
3. Declividade do trecho entre as seções e
4. Campo de velocidades nas seções.

III.2.1. Níveis nas seções de controle

Os dados na seção Cantagalo foram obtidos por meio de uma estação de monitoramento, composta de um sensor de nível ultra-sônico e um sistema de transmissão de dados via telefonia celular. O intervalo de leitura dos níveis da água ao longo do tempo foi de 1 (uma) hora.



Na seção Captação-Copasa os dados foram obtidos por meio da leitura de uma régua graduada por um observador. O intervalo de leitura dos dados foi de 3 (três) horas.

As leituras dos dados mostrados na figura III-5 ocorreram entre os dias 01/01/2005 e 28/02/2005 totalizando 1414 horas observadas. Neste tempo ocorreram algumas falhas nas leituras dos dados de algumas horas, falhas essas ocorridas tanto por parte do observador, como por parte do equipamento. As falhas por parte do equipamento ocorreram por vários motivos, por exemplo: problemas com a recarga da bateria, superaquecimento do sensor devido ao sol quente e a proteção utilizada ser de material metálico, problemas com o servidor de email utilizado para receber os dados, problemas com a mudança de tecnologia da operadora de celular etc.

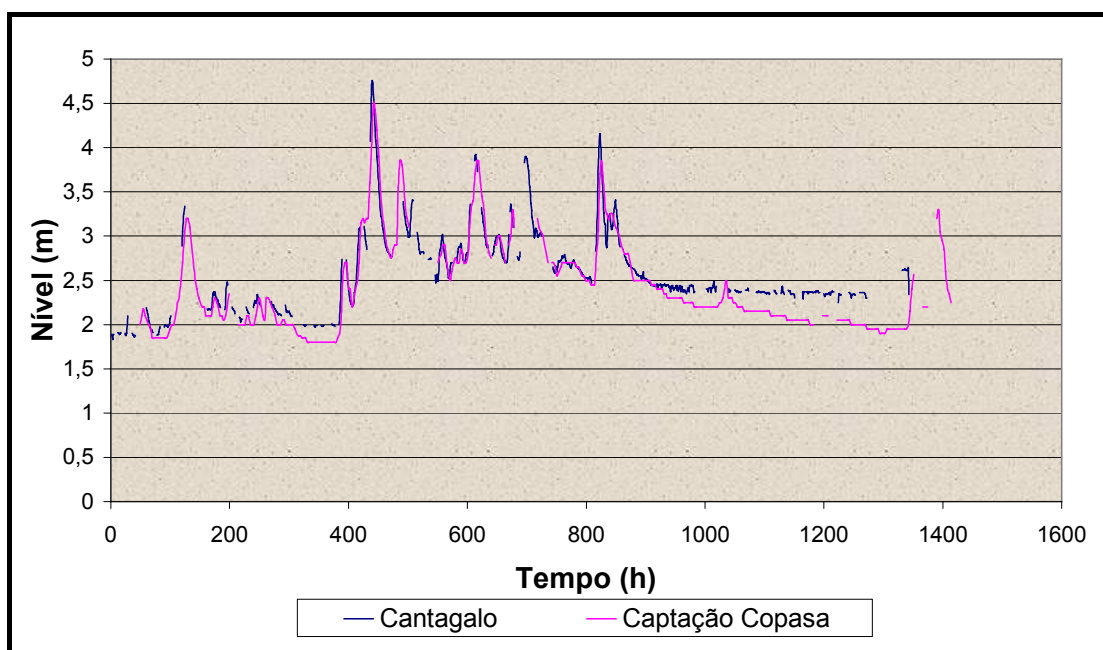


Figura III-5 Níveis das seções do Cantagalo e da Captação-Copasa
Período de observação: de 01/01/2005 à 28/02/2005.

Com base nestes dados foram escolhidas três ondas de cheia para estudo. As ondas são mostradas nas figuras III-6, III-7 e III-8 e os dados no apêndice B.

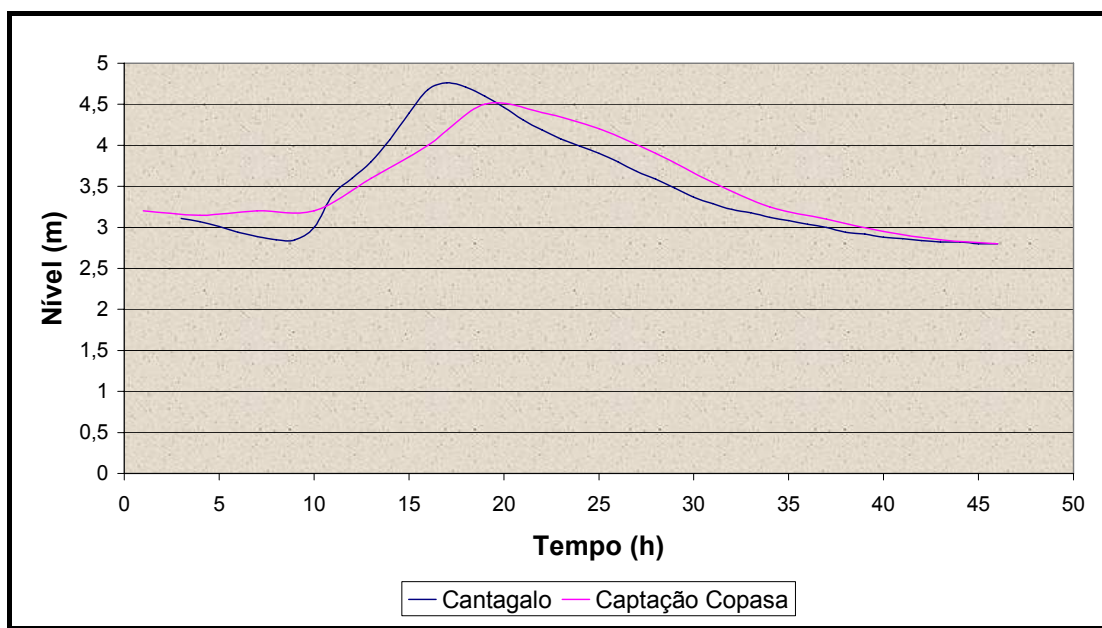


Figura III-6 Onda de cheia 1

Período de observação: do dia 18/01/05 às 15:00h ao dia 20/01/05 às 12:00h

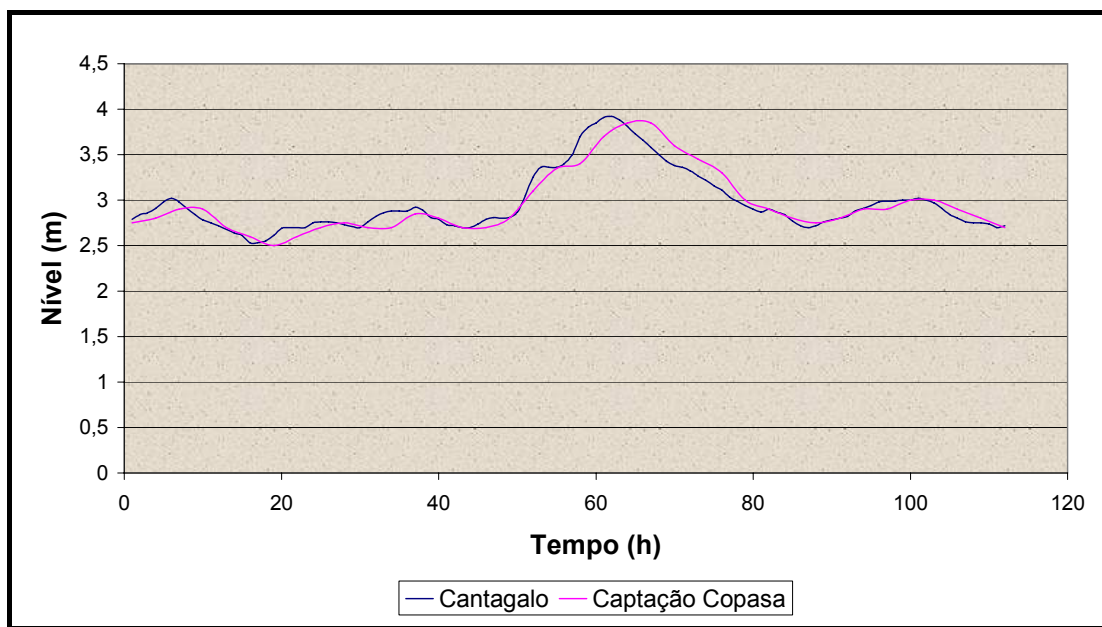


Figura III-7 Onda de cheia 2

Período de observação: Do dia 24/01/05 às 00:00h ao dia 28/01/05 às 15:00h

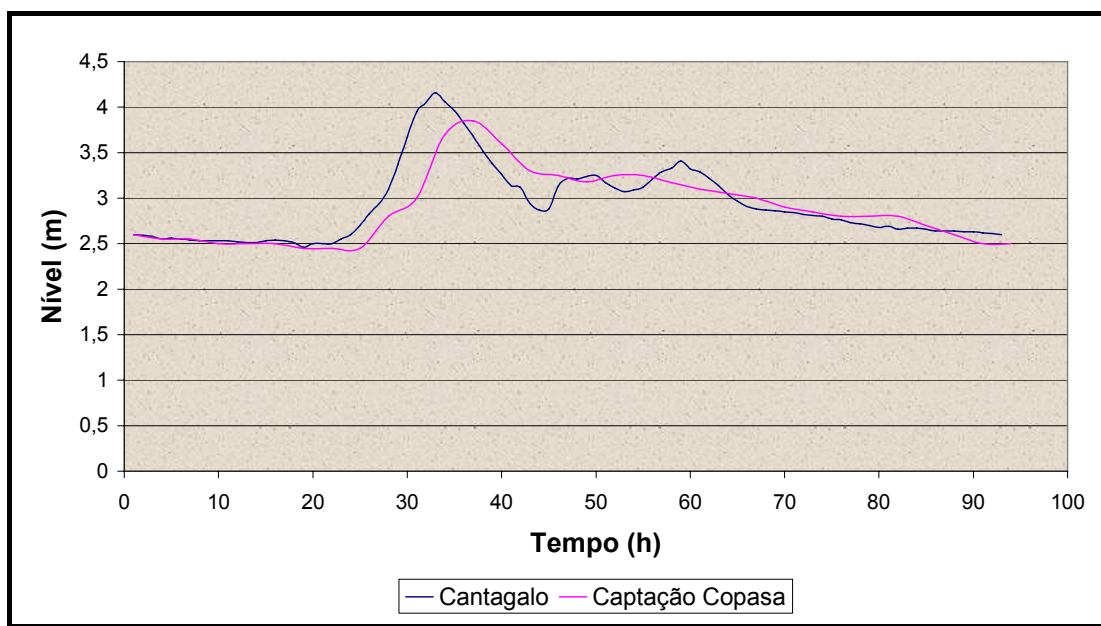


Figura III-8 Onda de cheia 3

Período de observação: Do dia 01/02/05 às 06:00h ao dia 06/02/05 às 18:00h

III.2.2. Topobatimetria

A topobatimetria das duas seções foi feita por meio de uma estação total e os resultados são mostrados nas figuras III-9 e III-10 e na tabela A-1 (apêndice A).

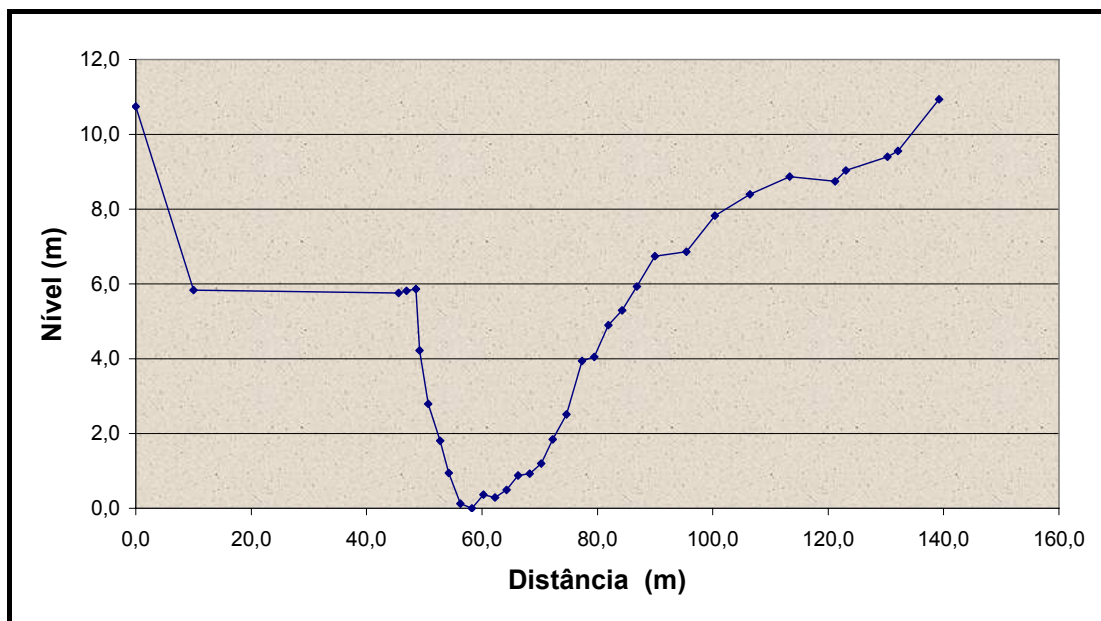


Figura III-9 Seção Cantagalo

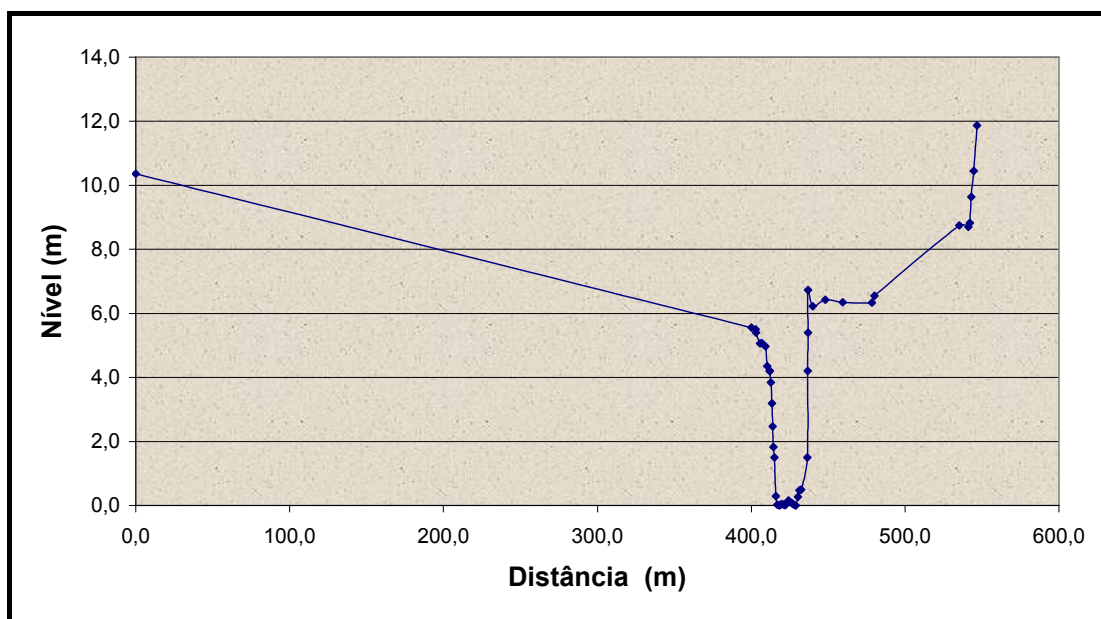


Figura III-10 Seção Captação-Copasa

III.2.3. Declividade

Os equipamentos utilizados para esta medição foram:

- DGPS modelo ASTECH PROMARK 2;
- Estação total modelo ELTA 45 ZEISS

O DGPS foi utilizado com a configuração *static* tanto na estação base como na estação móvel. A duração das medições com a estação móvel obedeceu a seguinte metodologia: 15 (quinze) minutos para medições com distâncias menores que 3 (três) quilômetros da base e para medições maiores que 3 (três) quilômetros foram acrescidos 5 minutos para cada quilômetro adicionado.

As medições foram feitas no sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) e o Datum geodésico utilizado foi o de Córrego Alegre. Para o estabelecimento das coordenadas da base foi utilizada uma cota localizada no Campus da UNIFEI que foi transportada de uma cota estabelecida pelo IBGE no

município de Itajubá. Os dados de cotas, níveis e distâncias obtidos são mostrados no apêndice D.

Para o cálculo da declividade, do trecho estudado, o escoamento foi considerado uniforme sem perturbação de cheias, onde a declividade da linha d'água é igual à declividade da linha da energia e igual também à linha do fundo.

PINHEIRO (2005) comprova que a declividade do canal natural, no caso estudado o Rio Sapucaí, não varia significativamente comparando os picos das ondas de cheia, com a declividade do nível de vazante e a declividade das margens do canal, como mostrado na figura III-11.

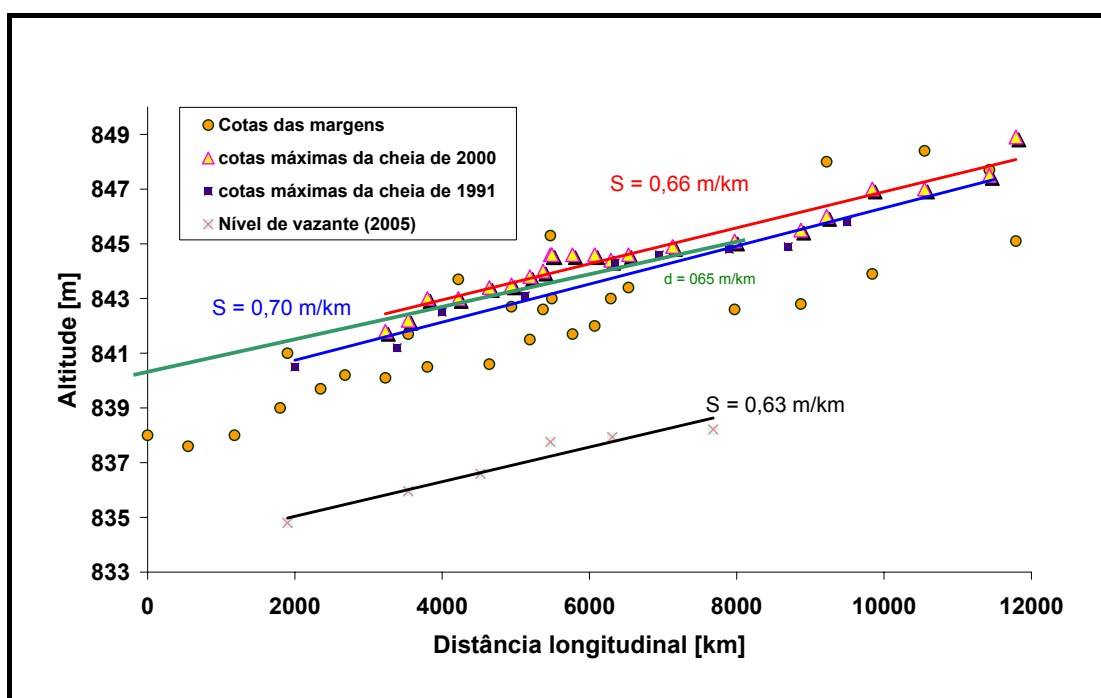


Figura III-11 Declividades do Rio Sapucaí em cheias e em nível de vazante

Fonte: PINHEIRO (2005)

Na determinação da declividade optou-se pela declividade da linha d'água. Para tal, foi utilizada uma foto aérea geo-referenciada (figura III-12) para definir a extensão do trecho, e o DGPS e a estação total para fixar as cotas altimétricas e coordenadas de cada ponto medido.

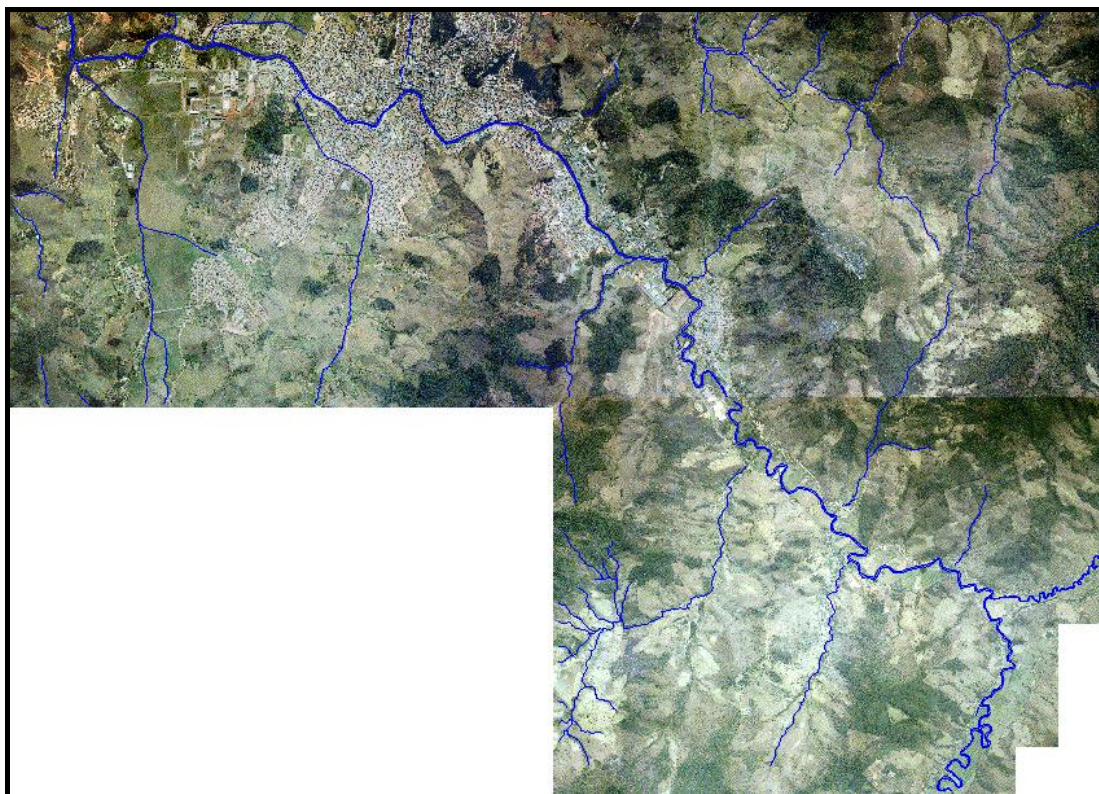


Figura III-12 Foto aérea do município de Itajubá
Fonte: Prefeitura Municipal de Itajubá (2000)

Inicialmente, com a foto aérea (cedida pela Prefeitura Municipal de Itajubá) determinou-se a extensão do trecho com auxílio do software Auto Cad® e estabeleceu-se, preferencialmente, os locais de medição das coordenadas.

Em campo, posteriormente, foram coletadas as coordenadas dos pontos ao longo do trecho. Um DGPS foi estabelecido como base na estação da Captação-Copasa (figura III-13). Com o outro DGPS (móvel), foram coletadas as coordenadas geográficas de cada ponto e com a Estação Total (figura III-14), para cada medição, determinou-se a diferença de nível entre o DGPS (móvel) e o nível da água (figura III-15).



Figura III-13 DGPS base fixa na estação Captação-Copasa



Figura III-14 DGPS base móvel e estação total na ponte Santo Antônio



Figura III-15 Determinação do nível d'água

Para a determinação da distância total foi utilizado o software Auto Cad® e para a determinação da declividade do trecho foi ajustada uma linha de tendência linear no software Microsoft Excel®, como mostrado na figura III-16, onde a declividade é a tangente da inclinação da curva ajustada.

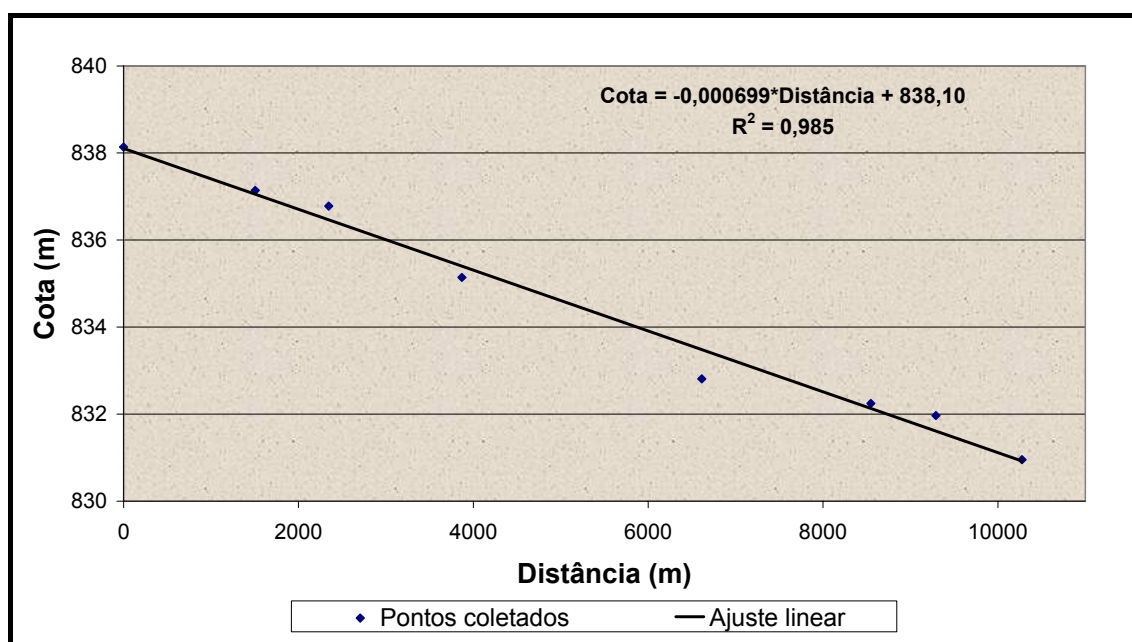


Figura III-16 Declividade do Rio Sapucaí entre a ponte Santo Antônio e a Ponte da Imbel

A declividade calculada foi de 0,0007m/m ou 70 cm/km, e a extensão do trecho estudado foi de 7784m (entre a estação Cantagalo e a estação Captação-Copasa).

III.2.4. Campo de velocidades nas seções

Foram feitas algumas medições de vazão nas duas seções para se construir, posteriormente, as curvas-chave correspondentes. Com o auxílio de um Molinete Hidromec e uma Estação Total foram medidas as velocidades em diferentes verticais da seção e também em diferentes alturas, como mostra a figura III-17.

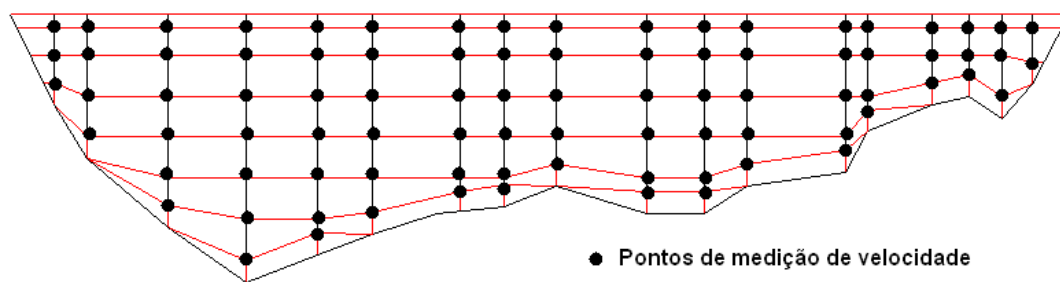


Figura III-17 Medição dos perfis de velocidades

Os resultados das medições nas duas seções são mostrados na tabela III-1.

Tabela III-1 Medições de vazão nas seções de controle

Seção Cantagalo			Seção Captação-Copasa		
Profundidade (m)	Vazão (m ³ /s)	Data da medição	Profundidade (m)	Vazão (m ³ /s)	Data da medição
1,93	21,25	23/05/05	2,03	17	29/04/04
			2,04	17,17	23/05/05
			1,68	12,42	03/08/03
			1,56	13,15	15/08/04
			1,51	10,85	01/07/03
			1,49	11,2	10/07/03

III.3. Construção das curvas-chave das seções de controle

Para se construir as curvas-chave, foi adaptado um programa desenvolvido no trabalho de iniciação científica intitulado “Protótipo de Monitoramento de Cheias em Tempo Real para a Sub-bacia do Alto Sapucaí” BARBOSA & MATOS(2002), programa computacional este, desenvolvido em ambiente Visual Basic do Microsoft Excel®. A tela inicial do programa Gerador de Curva Chave 3.0 é mostrada na figura III-18.

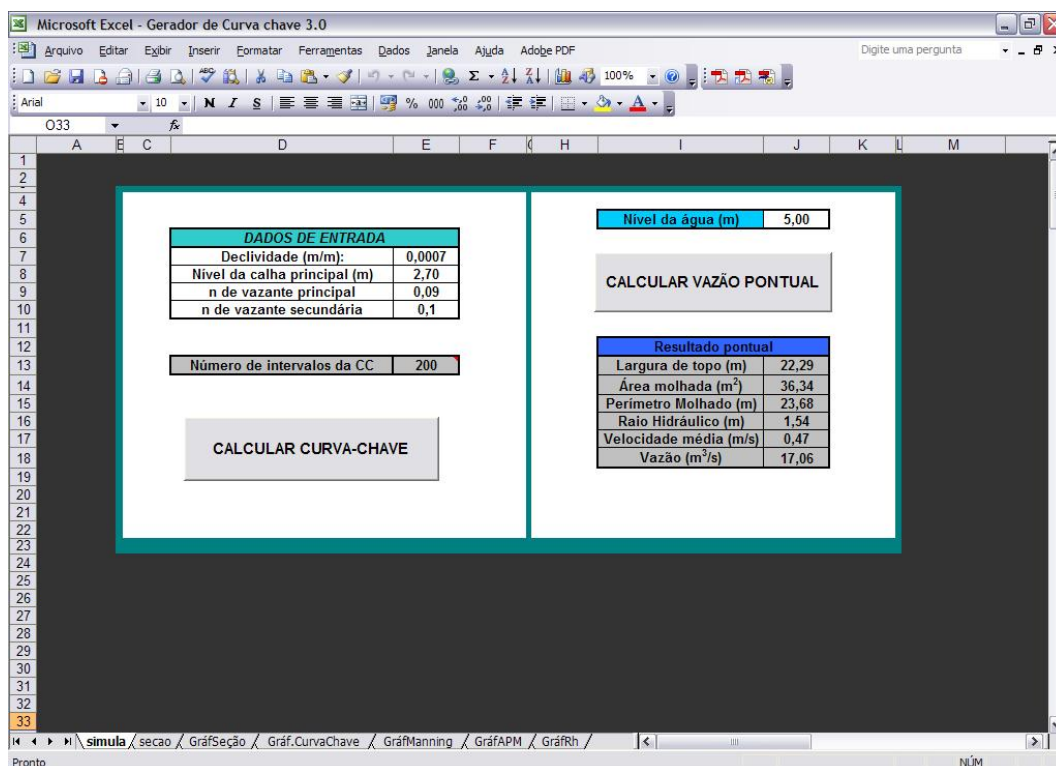


Figura III-18 Tela inicial do programa Gerador de curva chave 3.0

As variáveis consideradas neste programa são:

- Topobatimetria da seção;
- Declividade;
- Coeficiente de Manning variando com o nível da água.

A construção das curvas do coeficiente de Manning variando com o nível d'água, para as duas seções de controle, foi baseada em BARBOSA & PIOLTINE (2004) e são mostradas nas figuras III-19 e III-20.

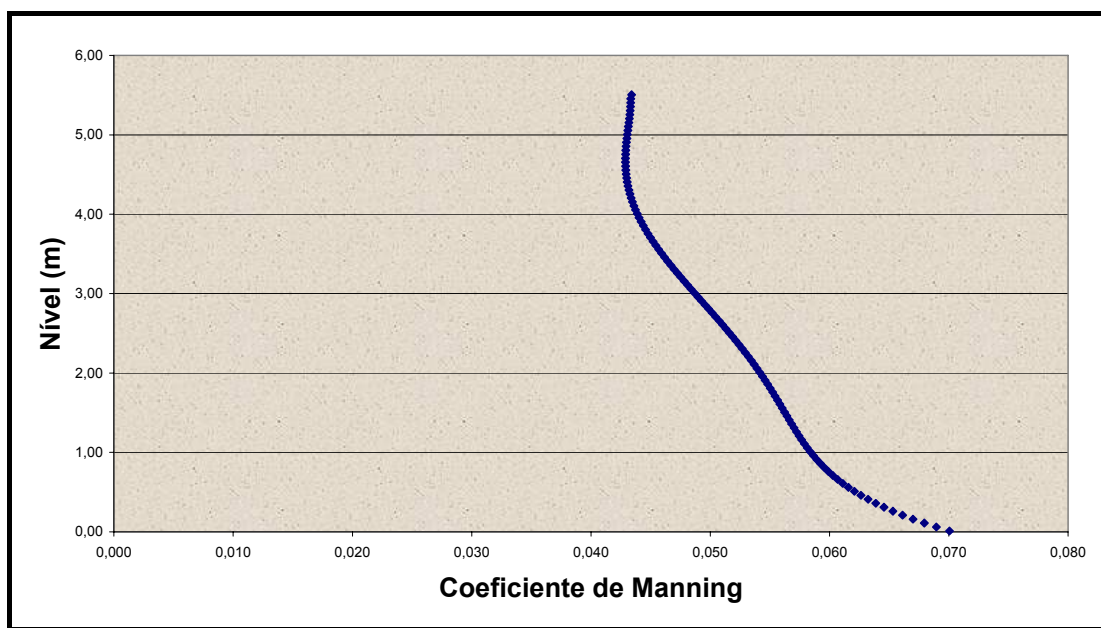


Figura III-19 Curva do coeficiente de Manning na seção Cantagalo

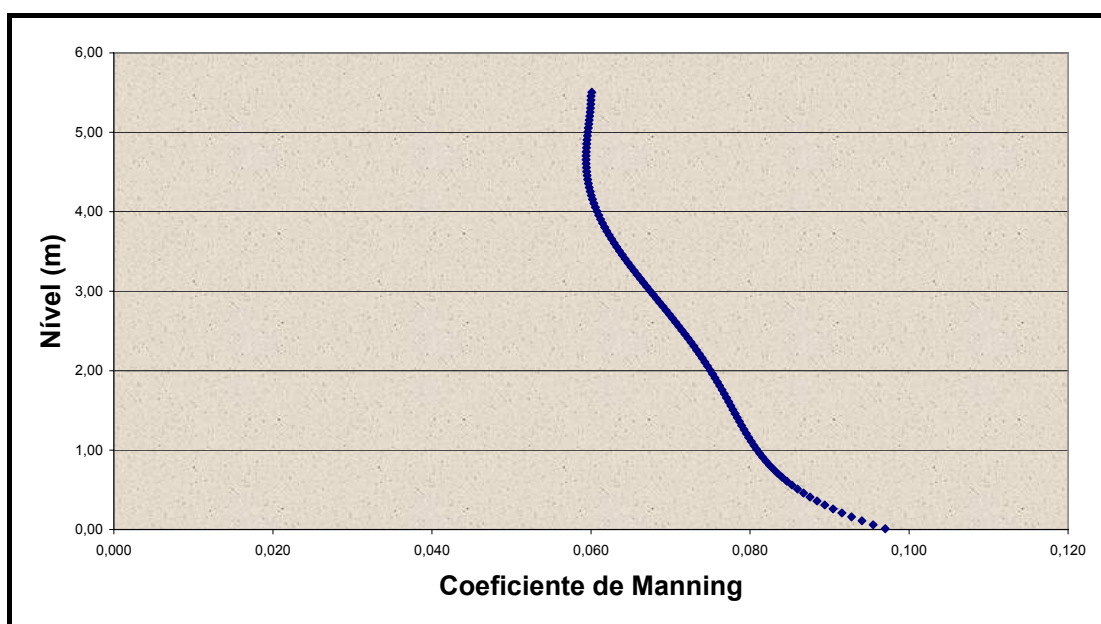


Figura III-20 Curva do coeficiente de Manning na seção Captação-Copasa

Os cálculos para a construção das curvas-chave foram baseados na fórmula de Manning. Conhecendo-se as características geométricas e de resistência ao escoamento do canal, para um determinado nível de água, obtém-se a vazão correspondente.



Considerando que foram feitas poucas medições de vazão na seção Cantagalo, optou-se por fazer uma transposição de dados. Com os dados mostrados na figura III-5 foram obtidos valores constantes de níveis para as duas seções por um período maior que 12 horas. Como não existe nenhum corpo d'água expressivo entre os trechos, pressupõe-se que a vazão permaneceu constante e é a mesma nas duas seções. A partir da curva-chave construída para a seção Captação-Copasa foram estabelecidas vazões correspondentes para a seção Cantagalo. Os períodos observados são mostrados na tabela III-2.

Tabela III-2 Dados observados de níveis constantes nas seções de controle

Início		Fim		Nível Constante		Vazão correspondente (m ³ /s)
data	Hora	data	Hora	Nível Cantagalo (m)	Nível Copasa (m)	
04/01/05	17:00	05/01/05	3:00	1,97	1,85	14,49
15/01/05	3:00	17/01/05	0:00	1,98	1,80	13,69
29/12/04	6:00	30/12/04	18:00	1,87	1,67	11,74
08/02/05	12:00	10/02/05	18:00	2,45	2,35	23,88
				2,43	2,30	22,83
				2,37	2,25	21,80
11/02/05	18:00	12/02/05	18:00	2,42	2,20	20,80
13/02/05	18:00	16/02/05	6:00	2,38	2,20	20,80
				2,37	2,15	19,83
16/02/05	3:00	19/02/05	3:00	2,37	2,10	18,88
				2,35	2,05	17,96
				2,37	2,05	17,96
18/02/05	21:00	23/02/05	0:00	2,37	2,00	17,05
				2,35	2,10	18,88
				2,34	2,05	17,96
				2,36	2,00	17,05

Com os dados de vazão obtidos, tanto por medição quanto por transposição de dados, e com o auxílio do programa Gerador de Curva-Chave 3.0, foram construídas as curvas-chave (figuras III-21 e III-22) correspondentes às seções de controle.

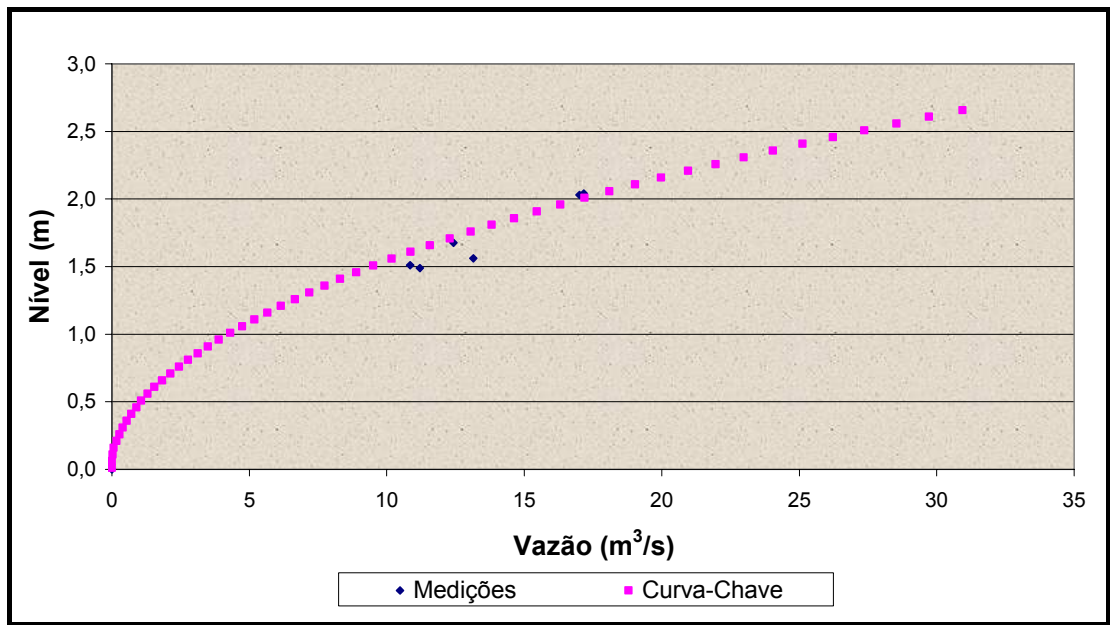


Figura III-21 Curva-Chave da seção Captação-Copasa

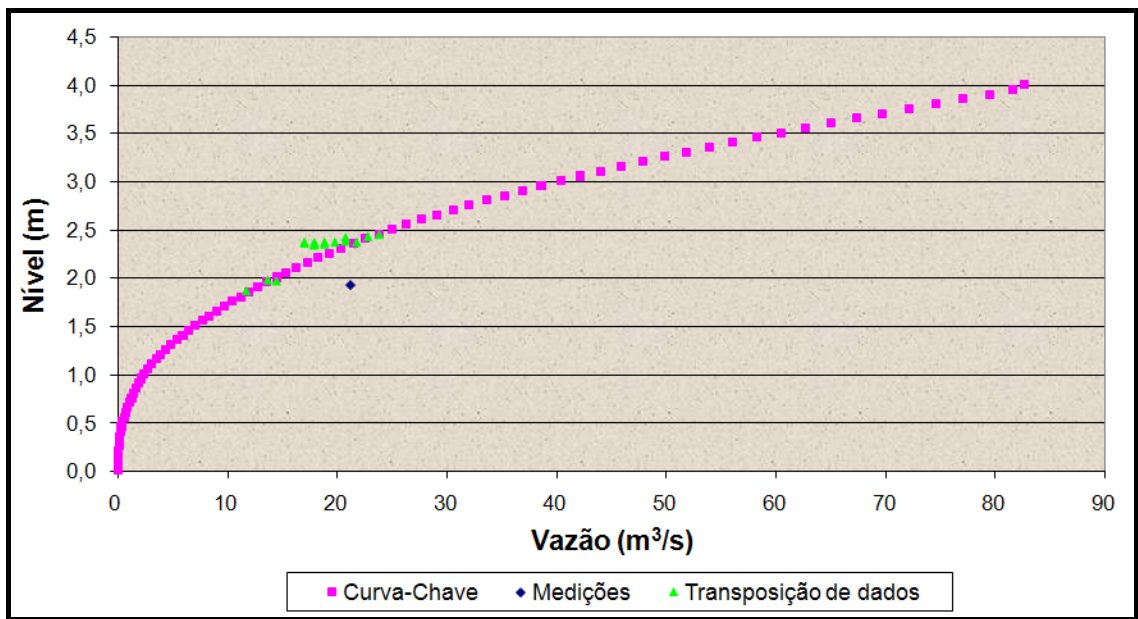


Figura III-22 Curva-Chave da seção Cantagalo



III.4. Simulação da translação da onda de cheia

Para a simulação da translação das ondas de cheia foi desenvolvido um programa computacional em ambiente Visual Basic do Microsoft Excel®. Neste programa foram trabalhados o método das características e o método das diferenças finitas explícito.

O trecho estudado (Cantagalo - Captação-Copasa) foi dividido em 9 (nove) seções intermediárias, mais as duas seções de controle (montante e jusante) totalizando 11 (onze) seções. A extensão total do trecho é de 7784 m, sendo as seções localizadas nas distâncias: 0,0 (zero) m, 778,0 m, 1556,0 m, 2334,0 m, 3112,0 m, 3890,0 m, 4668,0 m, 5446,0 m, 6224,0 m, 7002,0 m e 7784,0 m.

Foram estabelecidas para as seções de controle relações entre:

- Nível (h) e vazão (Q);
- Nível (h) e área do escoamento (A);
- Nível (h) e perímetro molhado (Pm);
- Nível (h) e raio hidráulico (Rh);
- Nível (h) e largura de topo (T);
- Nível (h) e coeficiente de Manning (n).

Essas curvas são estabelecidas apenas com pontos (dados). Quando requeridas para o cálculo de alguma variável, este cálculo é feito por meio de interpolação.

III.4.1. Cálculo da condição inicial nas seções de controle

O cálculo da condição inicial é a determinação dos parâmetros hidráulicos no tempo t igual a zero. Para este cálculo foram observados os níveis a montante



(estação Cantagalo) e a jusante (estação Captação-Copasa) no tempo inicial. A sequência deste cálculo é descrita abaixo:

- Leitura das funções de nível, número de seções, distância total do trecho, intervalo de tempo para o cálculo, tempo total de cálculo, declividade do fundo do canal, nível d'água a montante, nível da água a jusante, fator de relaxação e fator M;
- Leitura do nível d'água a montante (considera-se o nível d'água constante depois da passagem da onda de cheia);
- Para as seções intermediárias os níveis foram calculados por regra de três composta a partir dos níveis e distância das seções de controle. Como exemplo, se os níveis das seções de controle são 3,15m e 3,10m e deseja-se calcular o nível de uma seção intermediária que se localiza exatamente a meia distância entre elas, o nível desta seção será 3,13m;
- Com o nível d'água, calcula-se primeiro a vazão para a seção a montante. A vazão é calculada por meio de interpolação com os dados da curva-chave da seção. Da mesma forma, outros parâmetros também são calculados, tais como: área, perímetro molhado, raio hidráulico, largura de topo e o coeficiente de manning. Tal procedimento também é usado na seção à jusante;
- Os dados de velocidades nas seções de controle são facilmente obtidos, calculando-se as vazões pelas curvas-chave correspondentes e dividindo-se pelas áreas. As respectivas áreas foram obtidas pelas relações nível x área das duas seções;
- Para as seções intermediárias o cálculo é mais complexo. Com os dados de níveis destas seções são calculados os correspondentes parâmetros hidráulicos nas seções de controle. Com estes dados são feitas ponderações com as respectivas distâncias, calculando assim, os parâmetros hidráulicos para as seções intermediárias. Como exemplo têm-se o cálculo da vazão para a seção intermediária, com profundidade de 3,13m, que se localiza a meia distância das duas seções de controle. Para esse nível, na seção a montante,



tem-se uma vazão de 44,83 m³/s e para a seção a jusante tem-se uma vazão correspondente de 43,94 m³/s. Já que esta seção intermediária localiza-se a mesma distância das duas seções, a sua vazão será a média das duas vazões, 44,39 m³/s. Se a seção intermediária estiver mais próxima da seção a montante ou a jusante usa-se uma média ponderada. O mesmo procedimento é realizado para todos os outros parâmetros utilizados para os cálculos nas seções intermediárias.

III.4.2. Cálculo da propagação da onda de cheia

O cálculo da propagação da onda de cheia, tanto pelo método das diferenças finitas como pelo método das características, se dá em uma rotina de cálculos de três etapas para cada instante de tempo:

- Cálculo para a seção de controle (seção a montante);
- Cálculo para o meio do canal (seções intermediárias);
- Cálculo para a seção distante (seção a jusante).

Inicia-se com o tempo (t) igual a 1 (um intervalo de tempo) e depois de completadas as três etapas passa-se para o tempo (t) igual a 2 (dois intervalos de tempo) e assim sucessivamente.

i . Método das Diferenças Finitas

a. Seção a montante (primeira etapa)

Na primeira etapa obtém-se o nível para a seção a montante por meio de interpolação dos valores dos níveis de entrada desta seção, para um determinado tempo. De posse do nível d'água, calculam-se os parâmetros hidráulicos por meio de interpolação das relações de nível x parâmetro desejado, já discutidas anteriormente.

**b. Seções intermediárias (segunda etapa)**

Na segunda etapa calculam-se os níveis e as velocidades para os tempos t . As equações utilizadas no método das diferenças finitas foram as do esquema explícito e são elas:

$$y_i^{k+1} = \alpha \cdot y_i^k + \frac{(1-\alpha) \cdot (y_{i+1}^k + y_{i-1}^k)}{2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[V_i^k (y_{i+1}^k - y_{i-1}^k) + \left(\frac{A}{B} \right)_i^k \cdot (V_{i+1}^k - V_{i-1}^k) \right] \quad (\text{Eq. III-1})$$

$$V_i^{k+1} = \alpha \cdot V_i^k + \frac{(1-\alpha) \cdot (V_{i+1}^k + V_{i-1}^k)}{2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[V_i^k (V_{i+1}^k - V_{i-1}^k) + g(y_{i+1}^k - y_{i-1}^k) \right] + g(I_o - I_{fi}^k) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. III-2})$$

Onde:

y é o nível da água (m);

V é a velocidade (m/s);

Δt é o incremento de tempo de cálculo (s);

Δx é o incremento de espaço de cálculo (m);

g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

A é a área da seção transversal (m²);

B é a largura de topo da seção transversal (m);

I_o é a declividade do fundo do canal (m/m);

I_f é a declividade da linha de energia (m/m);

α é o fator de relaxação ($0 \leq \alpha \leq 1$);

i é um índice que indica a i -ésima seção do canal;



k é um índice que indica o k-ésimo nível de tempo de cálculo.

O intervalo de tempo utilizado foi de dez segundos, o intervalo de espaço utilizado foi de 778,0 metros e os parâmetros auxiliares (A, B) utilizados nas equações foram calculados do mesmo modo que na primeira etapa, por interpolação.

A declividade da linha de energia é calculada a cada passo pela fórmula de Manning. A declividade do fundo do canal já foi obtida anteriormente (0,0007 m/m).

O parâmetro de relaxamento (α) utilizado foi de 0,71 para o caso 1, de 0,70 para o caso 2 e de 0,70 para o caso 3. Estes parâmetros foram estabelecidos ajustando-se os valores que melhor se adequavam a cada caso.

c. Seção a jusante (terceira etapa)

Foi utilizada uma condição de contorno dinâmica onde o nível a jusante é calculado pela seguinte fórmula:

$$y_i^{k+1} = \alpha \cdot y_i^k + \frac{(1-\alpha) \cdot (y_i^k + y_{i-1}^k)}{2} - M \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[V_i^k (y_i^k - y_{i-1}^k) + \left(\frac{A}{B} \right)_i^k \cdot (V_i^k - V_{i-1}^k) \right] \quad (\text{Eq. III-3})$$

Esta condição de contorno, adaptada neste trabalho, foi baseada na fórmula utilizada para cálculo das seções intermediárias. Os parâmetros y_{i+1}^k e V_{i+1}^k foram substituídos pelos parâmetros y_i^k e V_i^k , e foi adicionado um fator de ajuste M.

O fator de ajuste M não existia na fórmula original. Verificou-se a sua necessidade, visto que, a terceira parte da fórmula precisava ter um maior peso nos cálculos. Os valores utilizados foram: 3,12 para o caso 1; 3,40 para o caso 2 e 3,46 para o caso 3. Valores estes estabelecidos, ajustando-se para cada caso, os índices que melhor se adequaram.



ii . Método das Características

Utilizando as equações características (II-7), (II-8) (II-9) (II-10), descritas anteriormente, pode-se obter as seguintes equações:

Para a característica direita:

$$\frac{dx}{dt} = V + c \cong \frac{\Delta x^+}{\Delta t} = v_u + c_u \quad (\text{Eq. III-4})$$

$$\Delta x^+ = x_m - x_u \quad (\text{Eq. III-5})$$

$$d(V + 2c) = g(S_o - S_f)dt \Rightarrow \frac{(v_p + 2c_p) - (v_u + 2c_u)}{\Delta t} = g(S_o - S_f)_u \quad (\text{Eq. III-6})$$

Para a característica esquerda:

$$\frac{dx}{dt} = V - c \cong \frac{\Delta x^-}{\Delta t} = v_d - c_d \quad (\text{Eq. III-7})$$

$$\Delta x^- = x_m - x_d \quad (\text{Eq. III-8})$$

$$d(V - 2c) = g(S_o - S_f)dt \Rightarrow \frac{(v_p - 2c_p) - (v_d - 2c_d)}{\Delta t} = g(S_o - S_f)_d \quad (\text{Eq. III-9})$$

onde m é o ponto central.

Discretizadas a equações características iniciam-se as três etapas dos cálculos.

a. Seção a montante

Para o cálculo na seção de controle, no instante de tempo $t+1$, utiliza-se somente a característica direita (figura III-23).

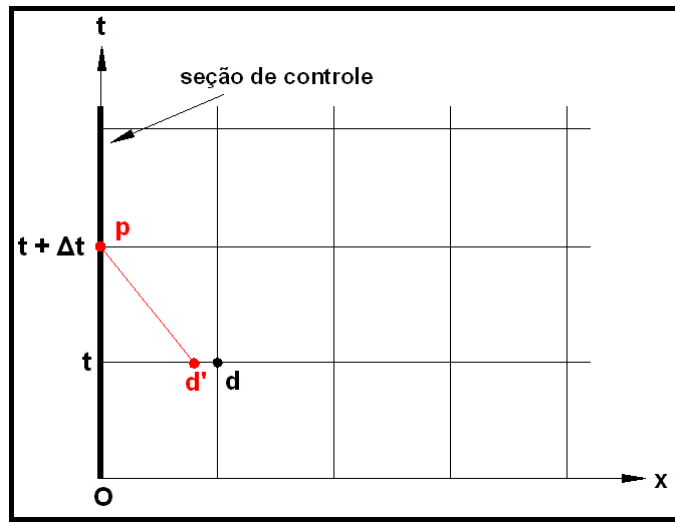


Figura III-23 Método das características para a seção de controle

Seguem-se, então, os seguintes passos:

- 1) Preliminarmente, toma-se:

$$\Delta x^- = \frac{\Delta x}{2} \quad (\text{Eq. III-10})$$

- 2) Determina-se φ :

$$\varphi = \frac{g \cdot Q_{s,t+1}}{b_s} \quad (\text{Eq. III-11})$$

- 3) Estima-se inicialmente v_d e c_d :

$$v_d = \frac{v_{s,t} + v_{s+1,t}}{2} \quad (\text{Eq. III-12})$$

$$c_d = \frac{c_{s,t} + c_{s+1,t}}{2} \quad (\text{Eq. III-13})$$

- 4) Calcula-se Ω_d pela seguintes equações:



$$R_{hd} = \frac{c_d^2}{g} + 2b \frac{c_d^2}{g} \quad (\text{Eq. III-14})$$

$$S_{fd} = \frac{n^2 v_d^2}{R_{hd}^{4/3}} \quad (\text{Eq. III-15})$$

$$\Omega_d = g(S_o - S_{fd}) \quad (\text{Eq. III-16})$$

- 5) Determina-se c_p calculando-se o zero da função da seguinte equação, obtida das equações III-3 e III-6:

$$c_p = \frac{\frac{\varphi}{2} - \Omega_d - v_d + 2c_d}{2} \quad (\text{Eq. III-17})$$

- 6) Calcula-se v_p :

$$v_p = \frac{\varphi}{c_p^2} \quad (\text{Eq. III-18})$$

- 7) Corrige-se Δx^- :

$$\Delta x^- = (v_d + c_d) \Delta t \quad (\text{Eq. III-19})$$

- 8) Recalcula-se v_u e c_u pelas seguintes relações:

$$\theta^- = \frac{\Delta x^-}{\Delta x} \quad (\text{Eq. III-20})$$

$$v_d = \theta^- v_d + (1 - \theta^-) v_m \quad (\text{Eq. III-21})$$

$$c_d = \theta^- c_d + (1 - \theta^-) c_m \quad (\text{Eq. III-22})$$

- 9) Recalcula-se então c_p e repetem-se os cálculos até que v_d e c_d fiquem constantes.

b. Seções intermediárias

Para o cálculo das características para o meio do canal utiliza-se tanto a característica esquerda como a característica direita (figura III-2).

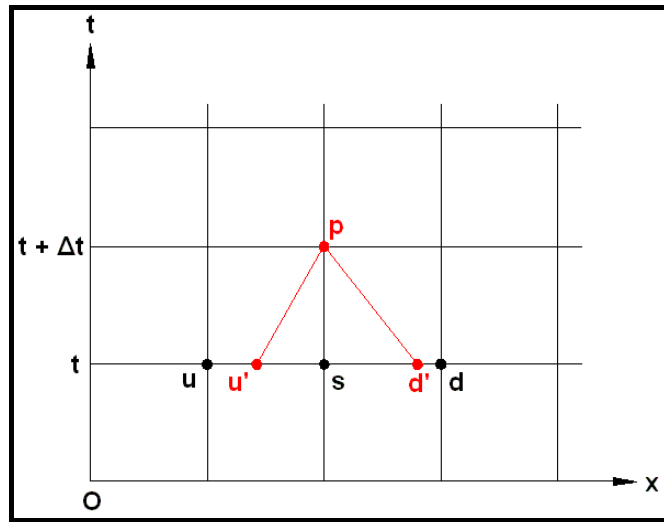


Figura III-24 Método das características para as seções intermediárias

Seguem-se, então, os seguintes passos:

- 1) Preliminarmente, toma-se:

$$\Delta x^- = \frac{\Delta x}{2}$$

$$\Delta x^+ = \frac{\Delta x}{2} \quad (\text{Eq. III-23})$$

- 2) Estima-se inicialmente v_d , c_d , v_u , c_u :

$$v_d = \frac{v_{s,t} + v_{s+1,t}}{2}$$

$$v_u = \frac{v_{s+1,t} + v_{s+2,t}}{2} \quad (\text{Eq. III-24})$$

$$c_d = \frac{c_{s,t} + c_{s+1,t}}{2}$$



(Eq. III-25)

$$c_d = \frac{c_{s+1,t} + c_{s+2,t}}{2}$$

3) Calcula-se Ω_d e Ω_u pela seguintes equações:

$$R_{hd} = \frac{c_d^2}{g} + 2b \frac{c_d^2}{g}$$

$$R_{hu} = \frac{c_u^2}{g} + 2b \frac{c_u^2}{g} \quad (\text{Eq. III-26})$$

$$S_{fd} = \frac{n^2 v_d^2}{R_{hd}^{4/3}}$$

$$S_{fu} = \frac{n^2 v_u^2}{R_{hu}^{4/3}} \quad (\text{Eq. III-27})$$

$$\Omega_d = g(S_o - S_{fd})$$

$$\Omega_u = g(S_o - S_{fu}) \quad (\text{Eq. III-28})$$

4) Determina-se c_p e v_p :

$$c_p = \frac{\Omega_u - \Omega_d - v_d + 2c_d + v_u + 2c_u}{4} \quad (\text{Eq. III-29})$$

$$v_p = \frac{\Omega_u + \Omega_d + v_d - 2c_d + v_u + 2c_u}{2} = \Omega_d + v_d + 2c_p - 2c_d \quad (\text{Eq. III-30})$$

5) Corrige-se Δx^- e Δx^+ :

$$\Delta x^- = (v_d + c_d) \Delta t$$

$$\Delta x^- = (v_d + c_d) \Delta t \quad (\text{Eq. III-31})$$

6) Recalcula-se v_u e c_u pelas seguintes relações:

$$\theta^- = \frac{\Delta x^-}{\Delta x}$$

$$\theta^+ = \frac{\Delta x^+}{\Delta x} \quad (\text{Eq. III-32})$$

$$v_d = \theta^- v_d + (1 - \theta^-) v_m$$

$$v_u = \theta^+ v_u + (1 - \theta^+) v_m \quad (\text{Eq. III-33})$$

$$c_d = \theta^- c_d + (1 - \theta^-) c_m$$

$$c_u = \theta^+ c_u + (1 - \theta^+) c_m \quad (\text{Eq. III-34})$$

- 7) Recalcula-se, então, c_p e v_p e repetem-se os cálculos até que v_d , c_d , v_u e c_u fiquem constantes.

c. Seção a jusante

Para o cálculo da característica para a seção distante utiliza-se somente a característica esquerda (figura III-3).

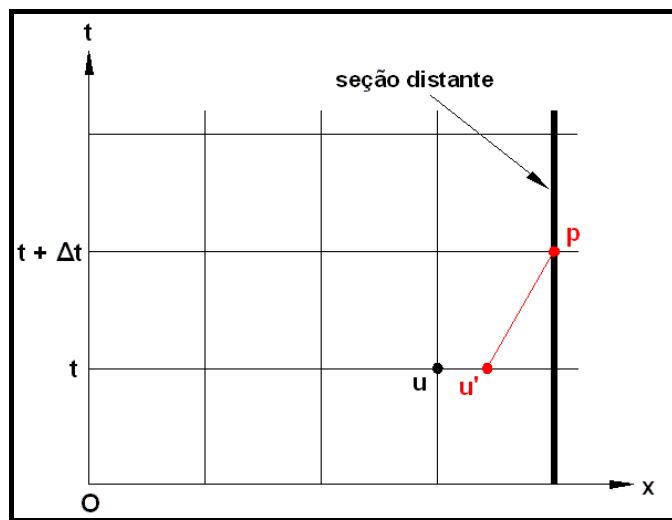


Figura III-25 Método das Características para a seção distante

Seguem-se, então, os seguintes passos:

- 1) Preliminarmente, toma-se:

$$\Delta x^+ = \frac{\Delta x}{2}$$



2) Determina-se φ :

$$\varphi = \frac{g \cdot Q_{s,t+1}}{b_s} \quad (\text{Eq. III-35})$$

3) Estima-se inicialmente v_u e c_u :

$$v_u = \frac{v_{s,t} + v_{s-1,t}}{2}$$

$$c_u = \frac{c_{s,t} + c_{s-1,t}}{2}$$

4) Calcula-se Ω_u pela seguintes equações:

$$R_{hu} = \frac{c_u^2}{g} + 2b \frac{c_u^2}{g}$$

$$S_{fu} = \frac{n^2 v_d^2}{R_{hu}^{4/3}}$$

$$\Omega_u = g(S_o - S_{fu})$$

5) Determina-se c_p calculando-se o zero da função da seguinte equação:

$$c_p = \frac{\frac{\varphi}{2} - \Omega_u - v_u + 2c_u}{2} \quad (\text{Eq. III-36})$$

6) Calcula-se v_p :

$$v_p = \frac{\varphi}{c_p^2} \quad (\text{Eq. III-37})$$

7) Corrige-se Δx^+ :

$$\Delta x^+ = (v_u + c_u) \Delta t$$

8) Recalcula-se v_u e c_u pelas seguintes relações:

$$\theta^+ = \frac{\Delta x^+}{\Delta x}$$



$$v_u = \theta^+ v_u + (1 - \theta^+) v_m$$

$$c_u = \theta^+ c_u + (1 - \theta^+) c_m$$

- 9) Recalcula-se, então, c_p e repetem-se os cálculos até que v_u e c_u fiquem constantes.

III.4.3. Condições de estabilidade

A cada passo de cálculo, para os dois métodos utilizados na simulação, é observada a *condição de estabilidade de Courant*, segundo PORTO (2003).

$$\frac{\Delta x}{\max(|V \pm c|)} \geq \Delta t$$



Capítulo IV Resultados

IV.1. Método das Diferenças Finitas

Nas figuras IV-1, IV-3 e IV-5 são apresentados os gráficos com os resultados das simulações dos níveis nas seções 1.556 m, 3.112 m, 4.668 m, 6.224 m e 7.784 m. Os níveis da seção 0 (seção Cantagalo) e da seção Captação-Copasa são os níveis observados em campo, sendo o primeiro também, os níveis de entrada para a simulação.

Pode-se analisar melhor os resultados nas figuras IV-2, IV-4 e IV-6, onde são apresentados somente os níveis observados em campo e os resultados obtidos pela simulação para a última seção.

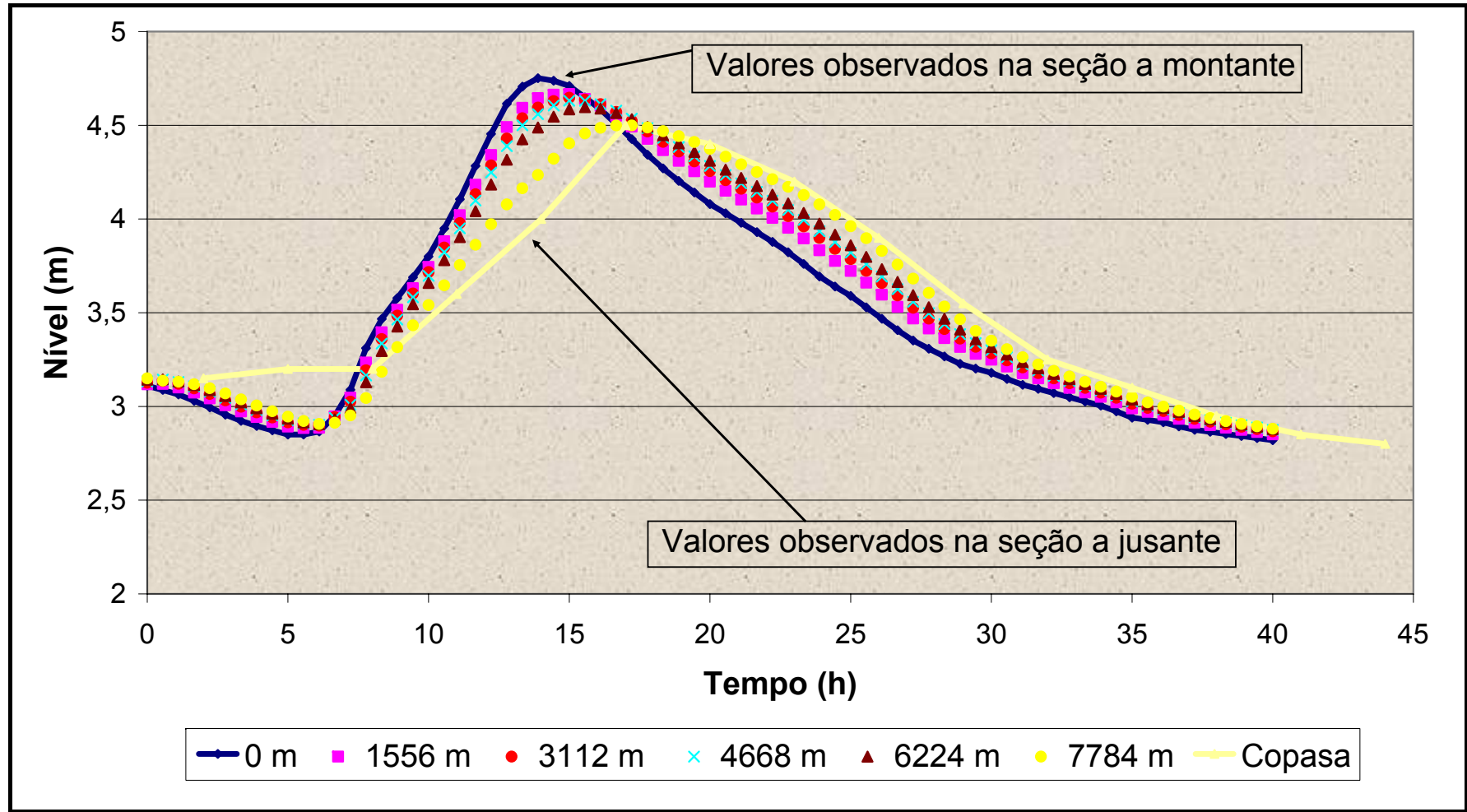


Figura IV-1 Resultado das simulações para a onda de Cheia 1

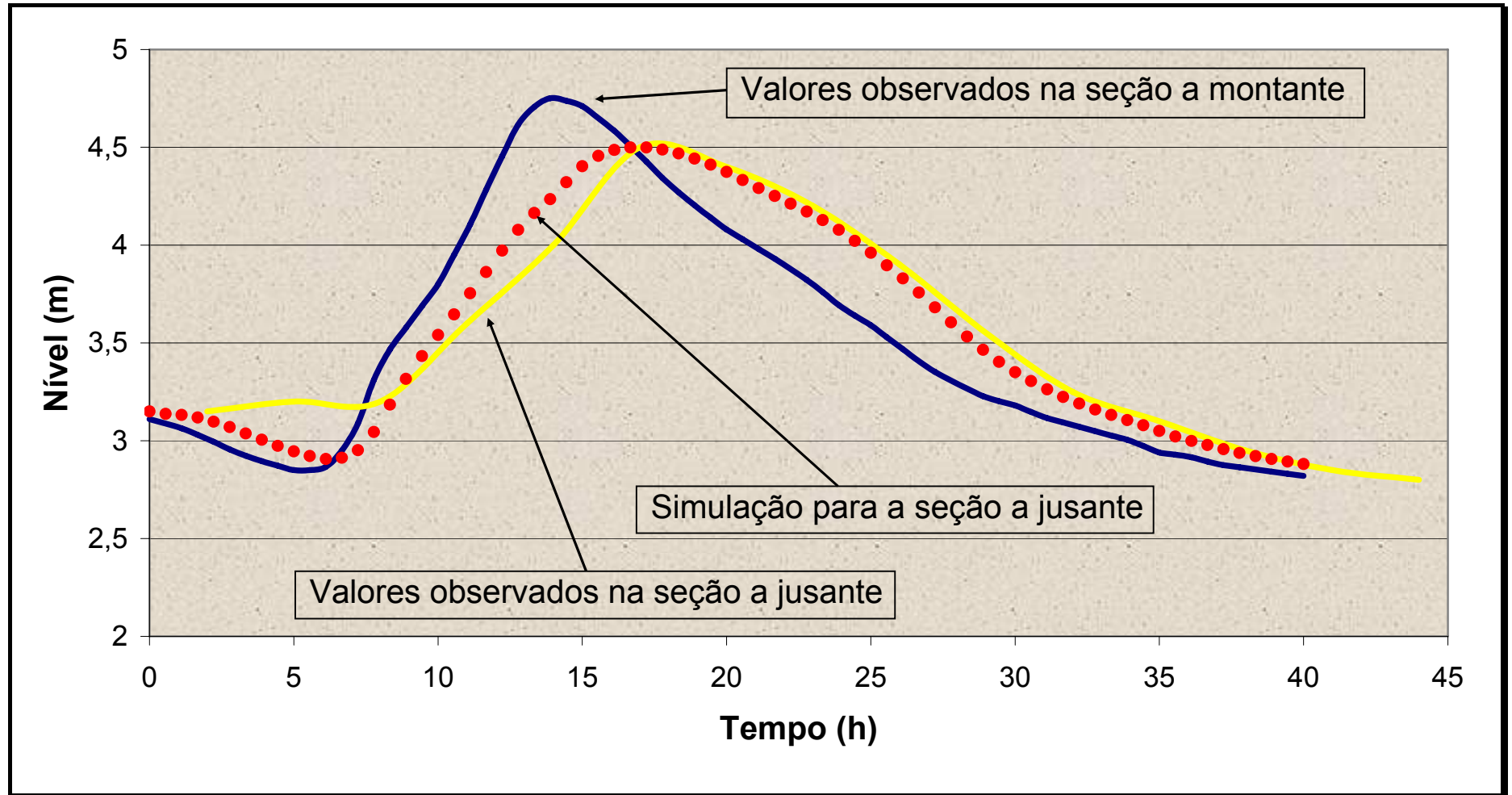


Figura IV-2 Resultado da simulação para a onda de cheia 1 na seção Captação-Copasa

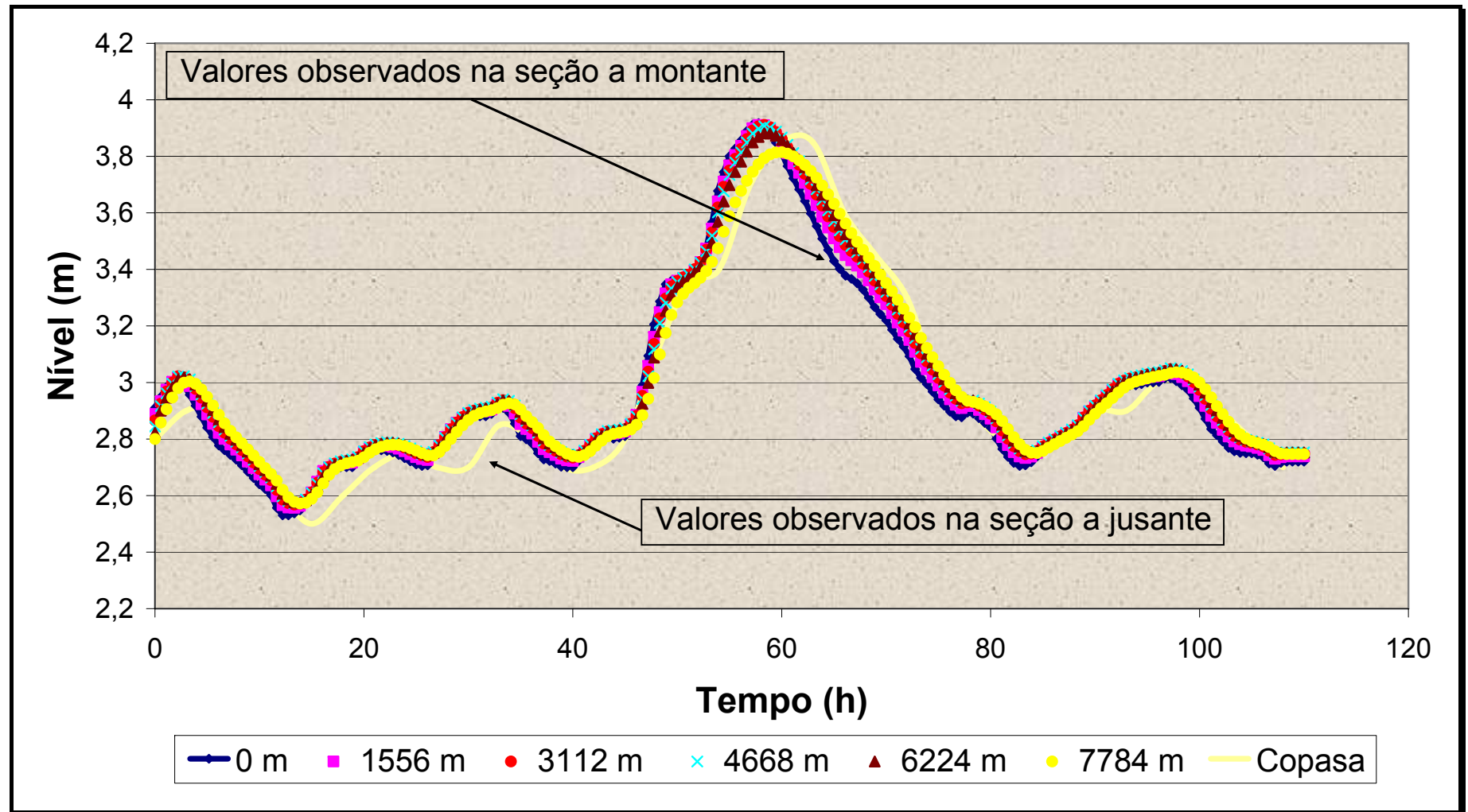


Figura IV-3 Resultado das simulações para a onda de Cheia 2

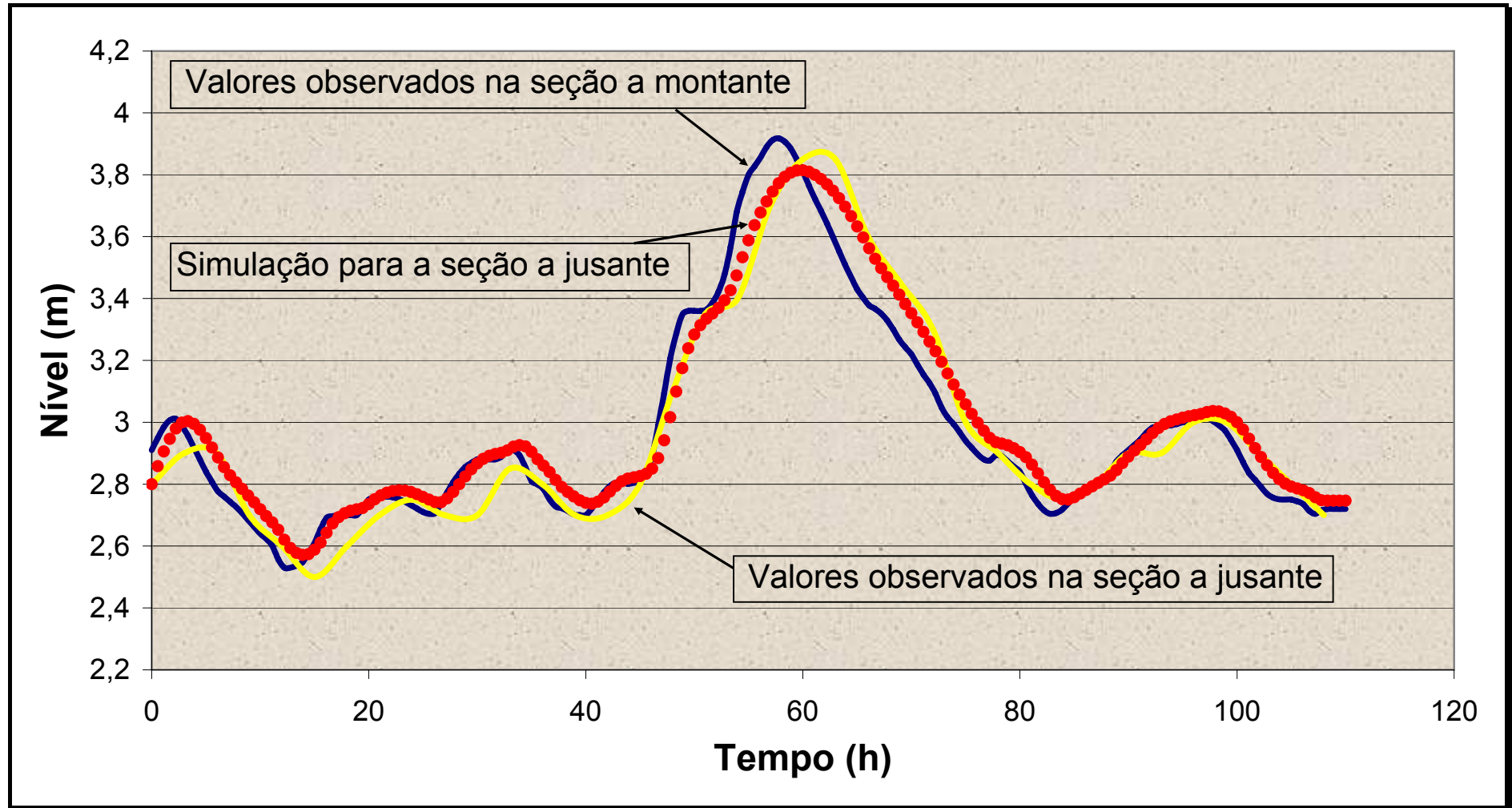


Figura IV-4 Resultado da simulação para a onda de cheia 2 na seção Captação-Copasa

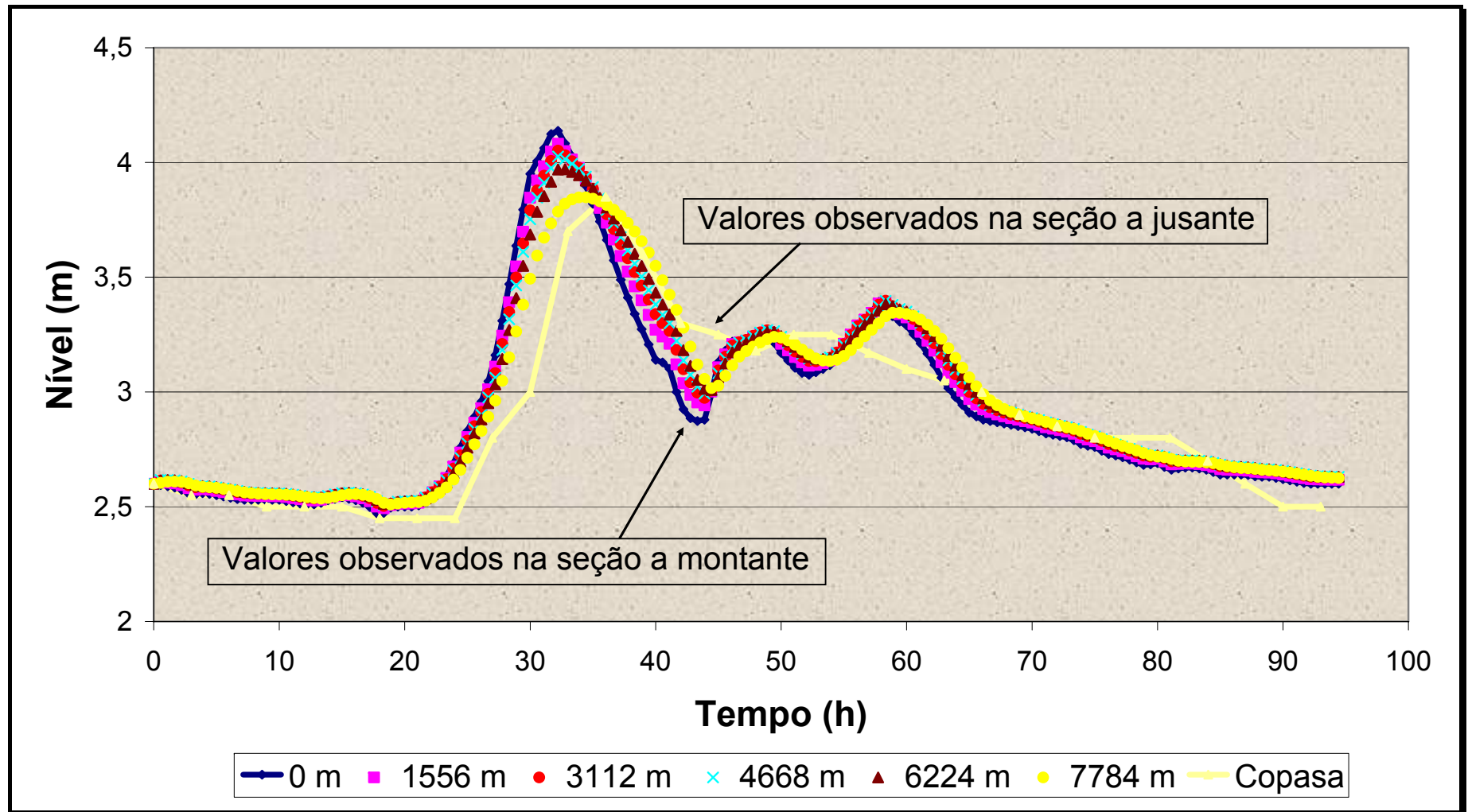


Figura IV-5 Resultado das simulações para a onda de Cheia 3

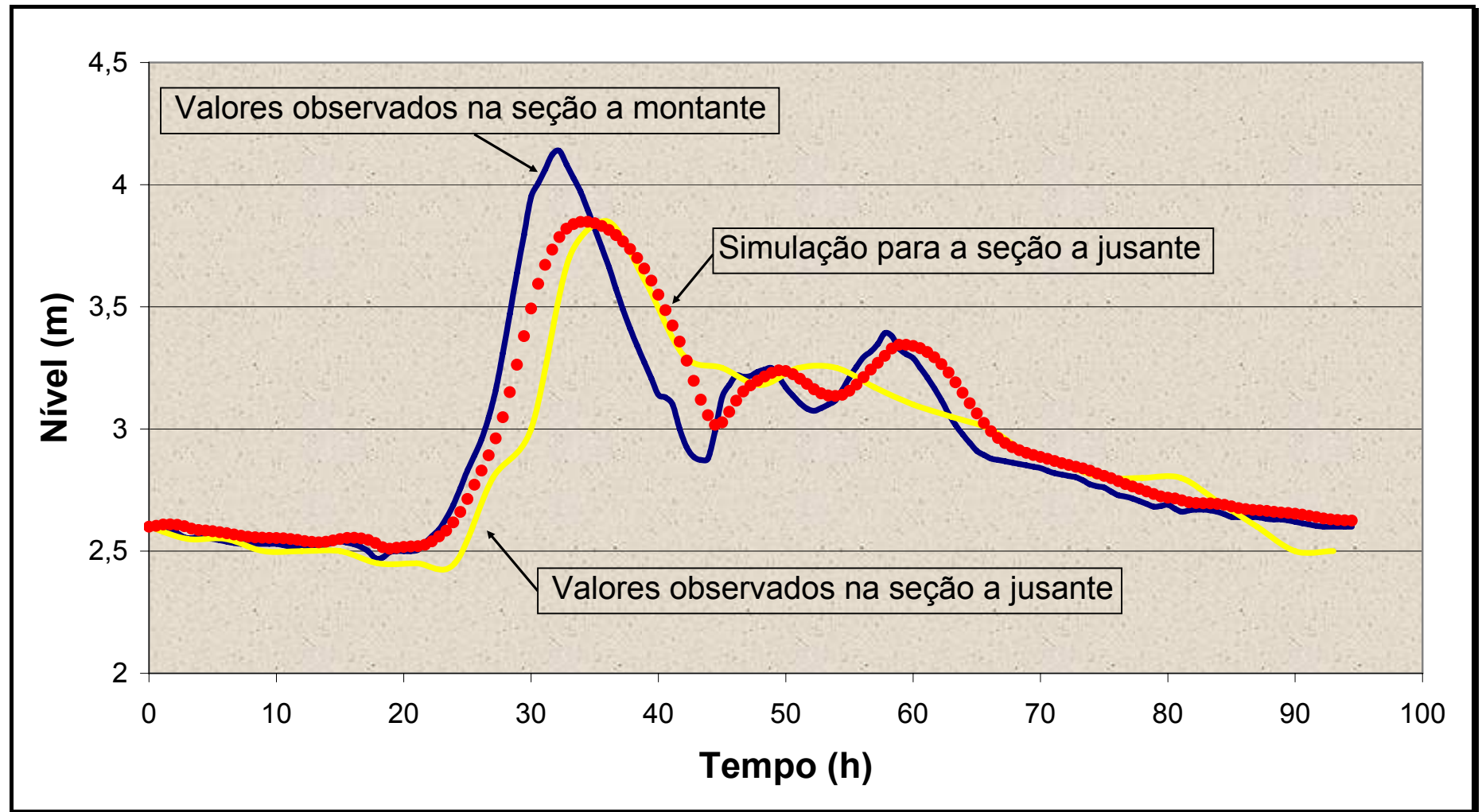


Figura IV-6 Resultado da simulação para a onda de cheia 3 na seção Captação-Copasa

Para se analisar melhor os resultados obtidos, fez-se uma correlação entre os níveis, ponto a ponto, para as três ondas de cheias estudadas, que são mostradas nas figuras IV-7, IV-8 e IV-9, onde foram ajustadas linhas de tendência e calculados os valores dos coeficientes de correlação (R^2).

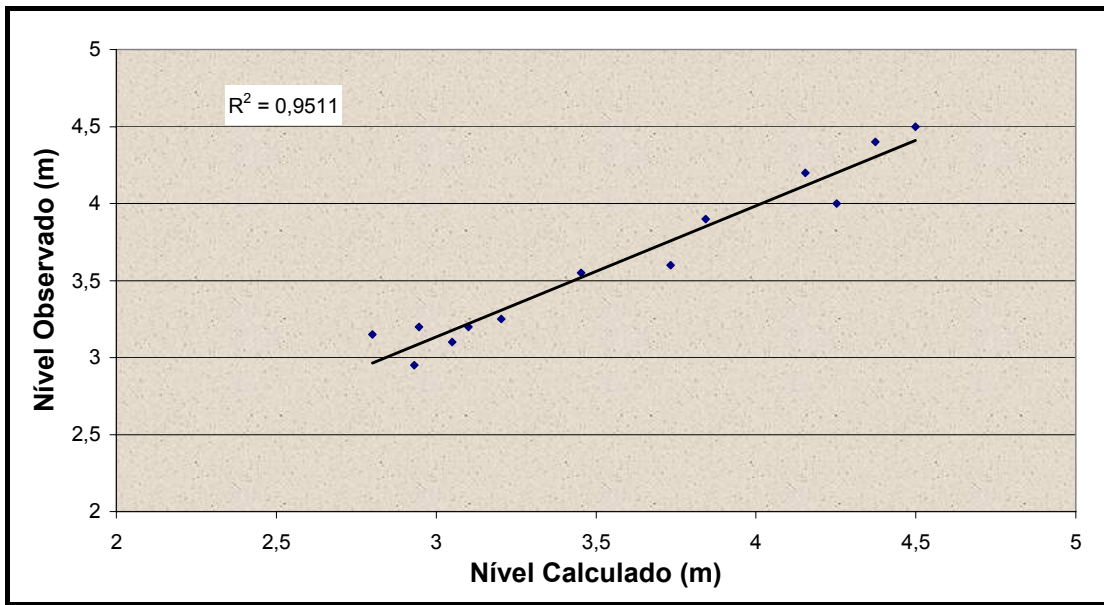


Figura IV-7 Correlação de níveis para a onda de cheia 1

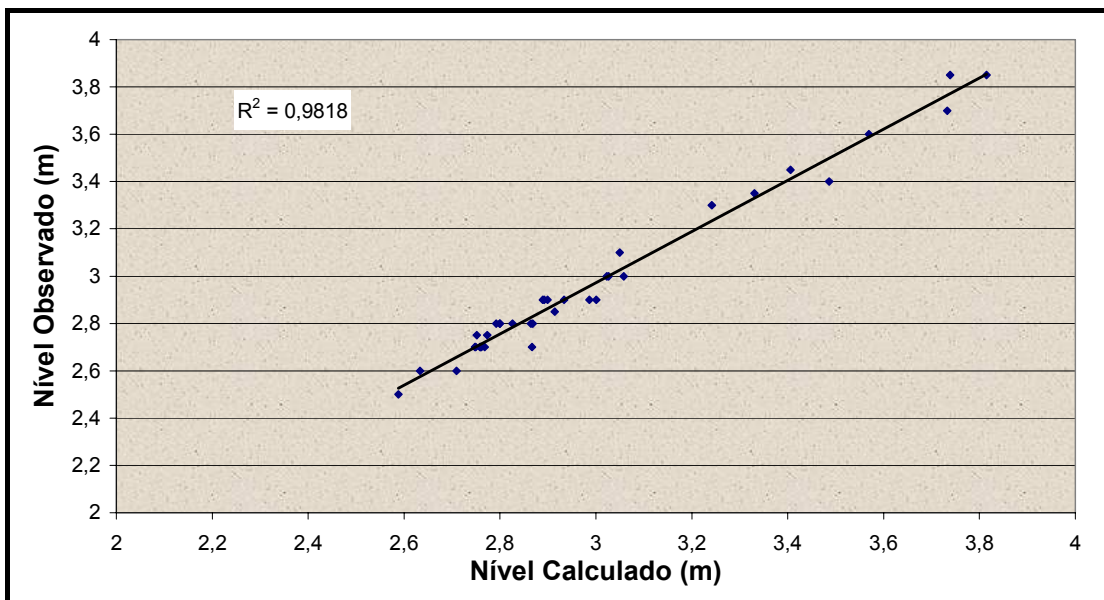


Figura IV-8 Correlação de níveis para a onda de cheia 2

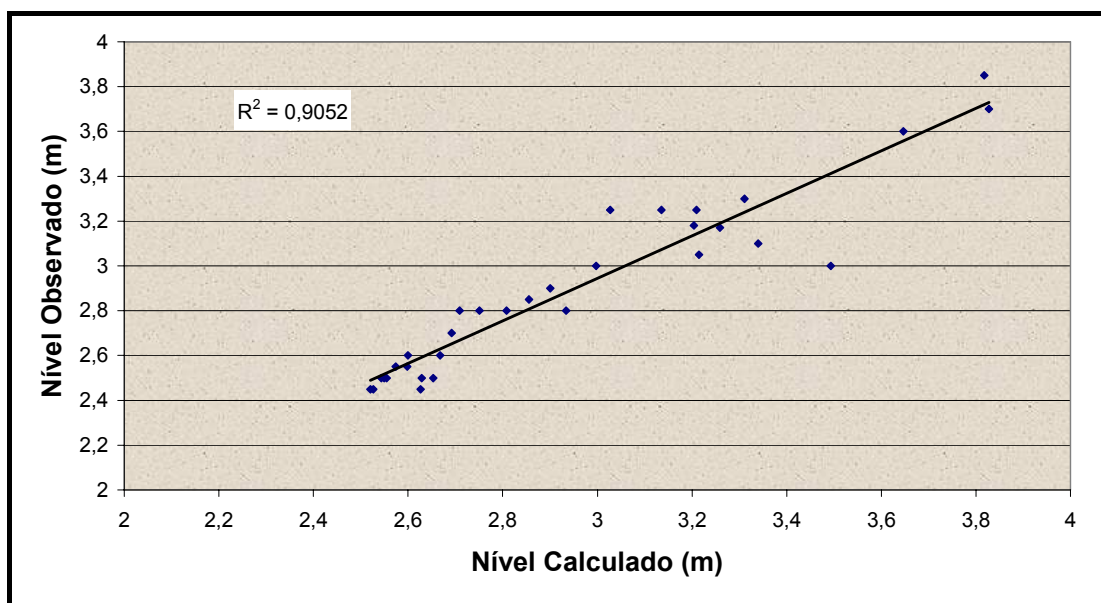


Figura IV-9 Correlação de níveis para a onda de cheia 3

IV.2. Método das Características

O método das características foi aplicado para um canal artificial, como citado na revisão bibliográfica em BARBOSA & MATOS (2004), onde foi obtido um bom resultado na simulação (figura II-2).

No presente trabalho, este método foi aplicado e não foi possível obter resultados satisfatórios. Nenhuma simulação se concretizou por inteiro. Houve uma flutuação dos resultados a cada passo da simulação, ou seja, não houve convergência dos dados. O erro se propagou, na simulação, gerando valores discrepantes e cada vez mais altos até que número de casas destinadas para a variável no programa não foi suficiente e ocasionou um erro no programa (travamento) em certo ponto da simulação.

A figura IV-10 ilustra o início da flutuação dos resultados.

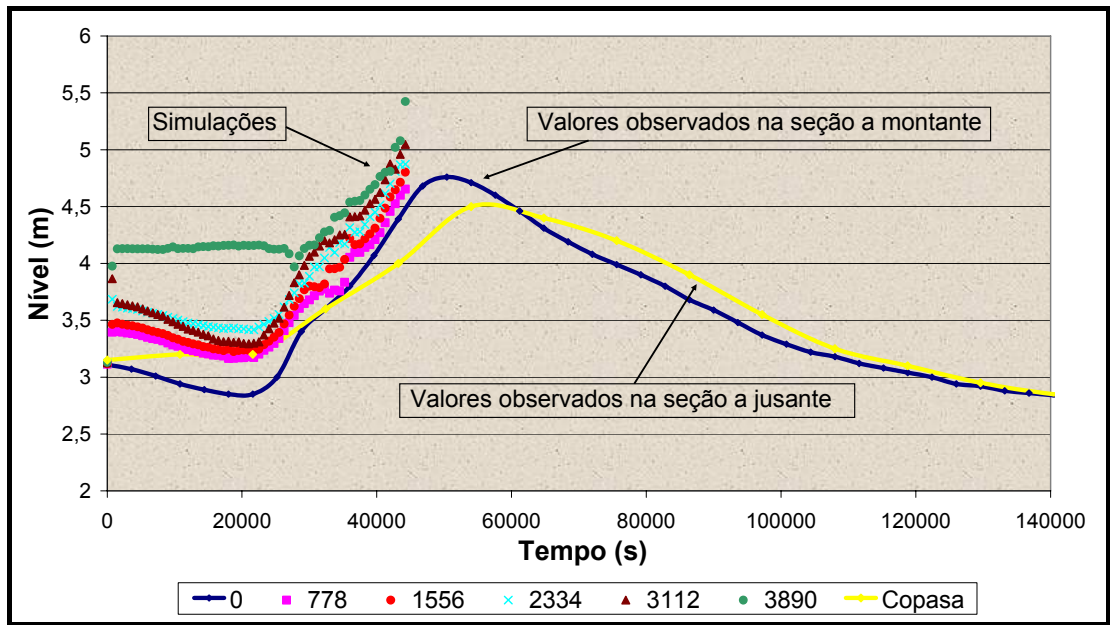


Figura IV-10 Simulação com o método das características para a onda de cheia 1



Capítulo V Conclusões e Recomendações

A partir dos dados obtidos podemos chegar às seguintes conclusões:

- O procedimento de coleta de dados utilizado se mostrou eficiente na caracterização dos parâmetros hidráulicos, comparando-se com outros estudos realizados pela instituição (UNIFEI).
- Na coleta de dados dos níveis d'água nas seções de estudo, o intervalo de 1 (uma) hora na seção do Cantagalo mostrou-se suficiente para a caracterização da variação do nível ao longo do tempo. O mesmo não ocorreu com o intervalo de 3 (três) horas que foi utilizado na seção da Captação-Copasa, que em alguns casos não caracterizou a real variação do nível d'água.
- Na determinação da declividade, mostrou-se ineficiente a caracterização desta por meio de cartas topográficas para o trecho estudado, devido ao grande espaçamento de 20 em 20 metros das curvas de nível da carta e a pequena distância longitudinal entre as seções de controle. A declividade calculada por carta foi praticamente o dobro da declividade calculada pelo DGPS.
- Com relação à fidelidade dos hidrogramas, alguns erros podem ter sido cometidos na seção da Captação-Copasa devido à leitura dos dados terem sido realizadas por um observador. Alguns erros são comuns neste tipo de aquisições de dados, tais como: erro de leitura, leitura após a hora determinada, esquecimento da leitura e esquecimento da leitura com posterior preenchimento de um valor provável.
- A curva-chave da seção Captação-Copasa obtida pelo programa Gerador de Curva Chave foi validada pelas medições de vazões realizadas nesta seção (Figura III-21).
- A curva-chave da seção Cantagalo gerada pelo programa Gerador de Curva Chave foi validada pela transposição de dados e não pela medição de vazão



realizada nesta seção (Figura III-22). A medição de vazão realizada ficou muito distante da transposição de dados, sendo descartada, visto não ter tanta representatividade por ter sido realizada somente uma medição.

- O método das características se mostrou instável e não se obteve bons resultados;
- Os dados das simulações das três ondas de cheia, utilizando o método das diferenças finitas explícito, ficaram bem próximos dos dados reais coletados em campo.
- No caso da onda de cheia 1, no início da simulação os dados não corresponderam aos dados reais. Isto ocorreu devido à análise pontual desta onda de cheia que não levou em conta os dados anteriores (Figura V-1).

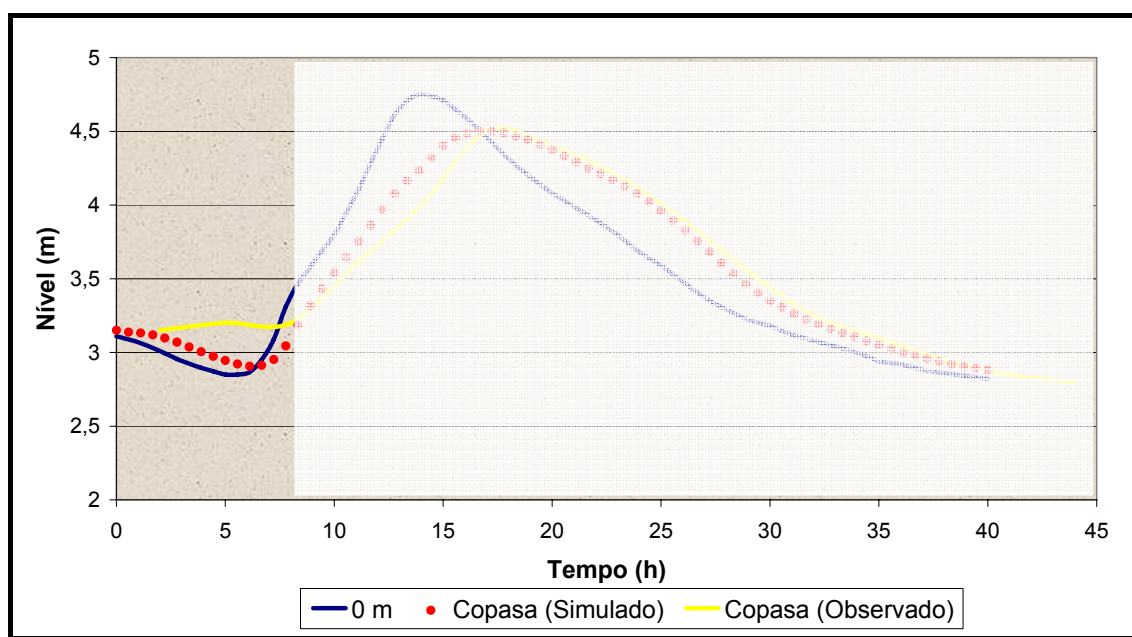


Figura V-1 Início da simulação para a onda de cheia 1

- Na onda de cheia 2, ficou evidenciado que a simulação tem melhores resultados para ondas de maior magnitude, sendo que para as ondas de menor magnitude as simulações apresentam um grau de desvio maior. A figura V-2 retrata essa observação.

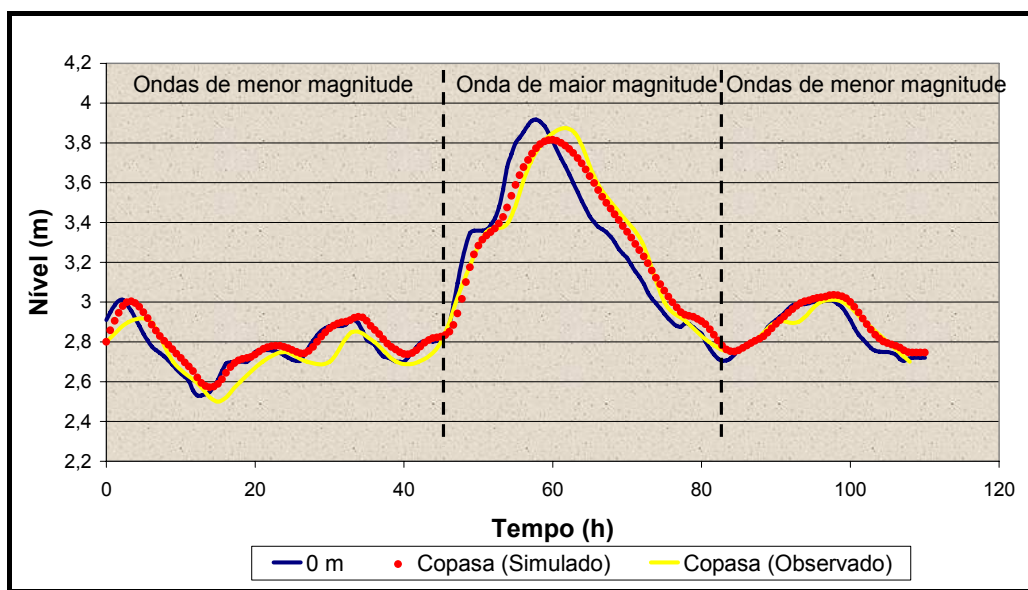


Figura V-2 Simulação das ondas de maior e menor magnitude

➤ A programação do modelo tentou ser a mais fiel possível à real situação do curso d'água estudado, tentando ajustar e retratar as variações naturais dos parâmetros hidráulicos do curso d'água ao longo do trecho estudado, o que não aconteceu, logicamente, com fidelidade. Contudo, o procedimento de ajuste dos dados se mostrou eficiente para tal propósito.

➤ A partir da correlação dos níveis calculados e observados, mostrados nas figuras IV-7, IV-8 e IV-9, pode-se concluir que a onda de cheia que a simulação ficou mais próxima dos dados observados em campo foi a onda de cheia 2, com um R^2 de 0,9818.

➤ A correlação de níveis também comprovou o bom resultados da simulação, com valores de R^2 próximos da unidade.

Recomenda-se para futuros trabalhos:

➤ A coleta de uma maior quantidade de dados de vazões e níveis para o refinamento do modelo;

➤ A aplicação do modelo para outras ondas de cheias de maior e menor magnitude, ocorridas no mesmo trecho, para um melhor refinamento do modelo;



- A aplicação do modelo em canais naturais com rede de afluentes, como estudo de propagação de ondas de cheias provocadas por chuvas intensas que possam vir a causar enchentes.



Referências bibliográficas

BARBOSA, A. A. & PIOLTINE, A. (2004). Caracterização do coeficiente de manning para a bacia do Alto Sapucaí. III Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental – III SBEA.

BARBOSA, A. A & MATOS, A. J. S. (2004). Software para cálculo de curva-chave de canais naturais. III Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental – III SBEA.

BARBOSA, A. A & MATOS, A. J. S. (2004). Propagação De Cheias em Canais Artificiais Utilizando o Método Das Características. III Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental – III SBEA.

BARBOSA, A. A & MATOS, A. J. S. (2002). Protótipo de Monitoramento de Cheias em Tempo Real para a Bacia do Alto Sapucaí. Trabalho de Iniciação Científica – UNIFEI.

BATES, P. D. & DE ROO, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of Hydrology, n° 236 – Ano: 2000. p.54 - 77.

BORDÓN, C. A. S. (1992). Análise de transitórios hidráulicos em pequenas centrais hidroelétricas através do método das características. Itajubá. 159p. Dissertação de Mestrado. Escola Federal de Engenharia Itajubá.

CAMPANA, N. A. & TUCCI, C. E. M. (1999) Previsão da vazão em macrobacias urbanas: arroio Dilúvio em Porto Alegre. RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos V4 n.1 19-33.

CHAUDRY, M. H. (1982). Métodos numéricos para resolução das equações de escoamento transitório em condutos forçados. Convenção Internacional sobre transientes hidráulicos e cavitação. Artigo A2. São Paulo.

CHOW, V. T. (1959). Open channel hydraulics. 1st Ed., MacGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.



EVANGELIST, G. (1969). Waterhammer analysis by method of characteristics. L' Energia Elétrica, nos 10, 11, 12. Milan.

FERREIRA, L. (2004). Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia do ribeirão do Marins – Seção Monjolinho –SP. Campinas. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

HORRITT, M. S. & BATTES, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of Hydrology, 268 – Ano: 2002. p. 87 – 99.

HSU, M., FU, J. & LIU, W. (2003). Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River. Taiwan. Journal of Hydrology, 277 - Ano: 2003. p. 267 – 280.

KIM, G. & BARROS, A. P. (2001). Quantitative flood forecasting using multisensor data and neural networks. Journal of Hydrology, n° 240 – Ano: 2001. p. 45 - 62.

MOREIRA, A. I. (2005). Modelagem Hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

MOUSSA, ROGER & BOCQUIUON, C. (1996). Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. Journal of Hydrology, n° 186 - p. 1 – 30.

MULLER, M. & FILL, H. D. (2003). Redes neurais aplicadas na propagação de vazões. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15p, Curitiba.

PINHEIRO, M. V. (2005). Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG. Dissertação de Mestrado. 119p. UNIFEI.

PORTO, R, M. (2003). Hidráulica Básica. São Carlos. EESC USP.

RASHID, R. S. M. & CHAUDHRY, M. H. (1995). Flood routing in channels with flood plains. Journal of Hydrology, 171 – Ano: 1995. p. 75 – 91.



TRINDADE, P. I. C. (2003). Simulação da propagação de ondas em canais pelo método dos elementos de contorno. Dissertação de Mestrado. 91p. UFRJ.

VIANNA, A. P. P. (2000). Utilização de modelagens Hidrológicas e Hidráulica Associadas a um sistema de informações geográficas para mapeamento de áreas inundáveis. Estudo de Caso: Município de Itajubá – MG. Tese: Engenharia da UFMG. 107 p.

YEN, B. C. & TSAI, C. W. (2001). On noninertia wave versus diffusion wave in flood routing. Journal of Hydrology, 244 - Ano: 2001. p. 97 – 104.



Apêndice A: Dados da Topobatimetria

Tabela A-1 Dados da topobatimetria das seções de controle

Seção Cantagalo		Seção Captação-Copasa	
Distância (m)	Nível (m)	Distância (m)	Nível (m)
0,00	10,74	0,00	10,36
10,00	5,84	400,00	5,56
45,58	5,76	402,88	5,51
46,93	5,82	403,19	5,40
48,54	5,87	405,80	5,06
49,19	4,22	406,99	5,08
50,70	2,79	409,31	4,98
52,73	1,80	410,45	4,35
54,25	0,95	412,08	4,20
56,25	0,13	412,11	4,20
58,25	0,00	412,85	3,85
60,25	0,37	413,44	3,19
62,25	0,29	413,92	2,47
64,25	0,49	414,43	1,83
66,25	0,88	415,05	1,49
68,25	0,93	416,13	0,30
70,25	1,20	416,97	0,02
72,25	1,85	418,41	0,00
74,64	2,51	419,37	0,04
77,32	3,94	420,31	0,04
79,48	4,05	421,15	0,02
81,89	4,90	422,17	0,02
84,28	5,30	423,18	0,09
86,86	5,93	424,25	0,16
90,00	6,74	425,46	0,10
95,44	6,86	426,80	0,05
100,37	7,82	427,82	0,02
106,46	8,39	428,96	0,00
113,34	8,87	430,45	0,27
121,19	8,74	431,35	0,47
123,08	9,03	432,44	0,50
130,25	9,40	436,54	1,49
132,11	9,55	436,78	4,20
139,25	10,94	436,89	5,40
		437,00	6,72
		439,86	6,23
		448,14	6,42
		459,49	6,34
		478,53	6,33



		480,16	6,55
		535,15	8,75
		541,03	8,70
		541,94	8,82
		542,88	9,64
		544,63	10,45
		546,78	11,87



Apêndice B: Dados das Ondas de Cheia

Tabela A-2 Dados das ondas de cheias utilizadas na simulação

Onda de Cheia 1 (caso 1)				Onda de Cheia 2 (caso 2)				Onda de Cheia 3 (caso 3)			
Cantagalo		Captação-Copasa		Cantagalo		Captação-Copasa		Cantagalo		Captação-Copasa	
Tempo (s)	Nível (m)	Tempo (s)	Nível (m)	Tempo (s)	Nível (m)	Tempo (s)	Nível (m)	Tempo (s)	Nível (m)	Tempo (s)	Nível (m)
0	3,11	7200	3,15	0	2,91	0	2,80	0	2,60	0	2,60
3600	3,07	18000	3,20	3600	2,98	10800	2,90	3600	2,59	10800	2,55
7200	3,01	28800	3,20	7200	3,02	21600	2,90	7200	2,58	21600	2,55
10800	2,94	39600	3,60	10800	2,98	32400	2,70	10800	2,55	32400	2,50
14400	2,89	50400	4,00	14400	2,91	43200	2,60	14400	2,56	43200	2,50
18000	2,85	61200	4,50	18000	2,84	54000	2,50	18000	2,55	54000	2,50
21600	2,85	72000	4,40	21600	2,78	64800	2,60	21600	2,54	64800	2,45
25200	3,00	82800	4,20	25200	2,75	75600	2,70	25200	2,53	75600	2,45
28800	3,40	93600	3,90	28800	2,72	86400	2,75	28800	2,53	86400	2,45
32400	3,60	104400	3,55	32400	2,68	97200	2,70	32400	2,53	97200	2,80
36000	3,80	115200	3,25	36000	2,64	108000	2,70	36000	2,53	108000	3,00
39600	4,07	126000	3,10	39600	2,61	118800	2,85	39600	2,52	118800	3,70
43200	4,39	136800	2,95	43200	2,53	129600	2,80	43200	2,51	129600	3,85
46800	4,68	147600	2,85	46800	2,53	140400	2,70	46800	2,51	140400	3,60
50400	4,76	158400	2,80	50400	2,55	151200	2,70	50400	2,53	151200	3,30
54000	4,71			54000	2,61	162000	2,80	54000	2,54	162000	3,25
57600	4,60			57600	2,69	172800	3,10	57600	2,53	172800	3,18
61200	4,46			61200	2,70	183600	3,35	61200	2,51	183600	3,25
64800	4,31			64800	2,70	194400	3,40	64800	2,46	194400	3,25
68400	4,19			68400	2,70	205200	3,70	68400	2,50	205200	3,17
72000	4,08			72000	2,75	216000	3,85	72000	2,50	216000	3,10
75600	3,99			75600	2,76	226800	3,85	75600	2,50	226800	3,05
79200	3,90			79200	2,76	237600	3,60	79200	2,55	237600	3,00
82800	3,80			82800	2,75	248400	3,45	82800	2,60	248400	2,90
86400	3,68			86400	2,73	259200	3,30	86400	2,70	259200	2,85
90000	3,59			90000	2,71	270000	3,00	90000	2,83	270000	2,80
93600	3,48			93600	2,70	280800	2,90	93600	2,94	280800	2,80
97200	3,37			97200	2,76	291600	2,80	97200	3,10	291600	2,80
100800	3,29			100800	2,82	302400	2,75	100800	3,37	302400	2,70
104400	3,22			104400	2,86	313200	2,80	104400	3,67	313200	2,60
108000	3,18			108000	2,88	324000	2,90	108000	3,95	324000	2,50
111600	3,12			111600	2,88	334800	2,90	111600	4,05	334800	2,50
115200	3,08			115200	2,88	345600	3,00	115200	4,16		
118800	3,04			118800	2,92	356400	3,00	118800	4,06		
122400	3,00			122400	2,89	367200	2,90	122400	3,96		
126000	2,94			126000	2,81	378000	2,80	126000	3,82		
129600	2,92			129600	2,79	388800	2,70	129600	3,68		
133200	2,88			133200	2,73			133200	3,52		



136800	2,86			136800	2,72			136800	3,38		
140400	2,84			140400	2,70			140400	3,26		
144000	2,82			144000	2,70			144000	3,14		
147600	2,82			147600	2,74			147600	3,12		
151200	2,80			151200	2,79			151200	2,94		
154800	2,80			154800	2,81			154800	2,87		
158400				158400	2,80			158400	2,88		
162000				162000	2,81			162000	3,13		
165600				165600	2,87			165600	3,22		
169200				169200	3,05			169200	3,21		
172800				172800	3,25			172800	3,24		
176400				176400	3,36			176400	3,25		
180000				180000	3,36			180000	3,17		
				183600	3,36			183600	3,11		
				187200	3,40			187200	3,07		
				190800	3,50			190800	3,09		
				194400	3,70			194400	3,12		
				198000	3,80			198000	3,21		
				201600	3,85			201600	3,29		
				205200	3,91			205200	3,33		
				208800	3,92			208800	3,41		
				212400	3,88			212400	3,32		
				216000	3,81			216000	3,29		
				219600	3,73			219600	3,22		
				223200	3,66			223200	3,14		
				226800	3,58			226800	3,04		
				230400	3,50			230400	2,97		
				234000	3,43			234000	2,91		
				237600	3,38			237600	2,88		
				241200	3,36			241200	2,87		
				244800	3,32			244800	2,86		
				248400	3,26			248400	2,85		
				252000	3,22			252000	2,84		
				255600	3,16			255600	2,82		
				259200	3,11			259200	2,81		
				262800	3,03			262800	2,80		
				266400	2,99			266400	2,77		
				270000	2,94			270000	2,76		
				273600	2,90			273600	2,73		
				277200	2,87			277200	2,72		
				280800	2,90			280800	2,70		
				284400	2,87			284400	2,68		
				288000	2,84			288000	2,69		
				291600	2,77			291600	2,66		
				295200	2,72			295200	2,67		
				298800	2,70			298800	2,67		
				302400	2,72			302400	2,66		
				306000	2,76			306000	2,64		
				309600	2,78			309600	2,64		
				313200	2,80			313200	2,64		



				316800	2,82			316800	2,63		
				320400	2,88			320400	2,63		
				324000	2,91			324000	2,62		
				327600	2,94			327600	2,61		
				331200	2,98			331200	2,60		
				334800	2,99						
				338400	2,99						
				342000	3,00						
				345600	3,00						
				349200	3,02						
				352800	3,00						
				356400	2,97						
				360000	2,91						
				363600	2,84						
				367200	2,80						
				370800	2,76						
				374400	2,75						
				378000	2,75						
				381600	2,74						
				385200	2,70						
				388800	2,72						



Apêndice C: Método das Características

(Baseado em CHOW,1959)

Note que a Eq.(II-27) é a equação dinâmica assumindo $\alpha = 1$ e que a Eq. (II-28) é a equação da continuidade. A equação (II-29) indica que a variação total da profundidade é igual à soma da variação parcial da profundidade devido a distância e devido ao tempo respectivamente.

Resolvendo as quatro equações acima simultaneamente para $\partial y/\partial x$, temos:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{-D(S_0 - S_f) + \frac{D}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{V}{g} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dy}{dt} \frac{dx}{dt}}{\frac{1}{g} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{2V}{g} \frac{dx}{dt} + \frac{V^2}{g} - D} \quad (\text{Eq. V-1})$$

Pode-se assumir que a onda de cheia é composta por um grande número de pulsos infinitesimais. A propagação da onda de cheia pode ser tratada como propagação destes pulsos. Esses pulsos são formados como o resultado de perturbações causadas pela cheia, e cada pulso tem o perfil de sua superfície descontínua. No ponto da descontinuidade, a superfície da água pára e a declividade $\partial y/\partial x$ tem dois valores. Visto que as duas declividades da superfície não carregam nenhuma relação definida uma com a outra, o valor de $\partial y/\partial x$ deve ser indeterminado; ou, matematicamente $\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{0}{0}$. Quando o denominador da Eq. (II-31)

é fixado em zero, temos:

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{2V}{g} \frac{dx}{dt} + \frac{V^2}{g} - D = 0$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - 2V \frac{dx}{dt} + (V^2 - gD) = 0$$



Resolvendo a equação diferencial de 2º grau:

$$\Delta = 4V^2 - 4(V^2 - gD) = 4gD$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2V \pm \sqrt{4gD}}{2} = V \pm \sqrt{gD}$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm c$$

$$dx = (V \pm c)dt \quad (\text{Eq. V-2})$$

Onde $c = \sqrt{gD}$. Para canais de grande largura, $c = \sqrt{gy}$.

Quando o numerador é fixado em zero a Eq.(II-32), temos:

$$-D(S_0 - S_f) + \frac{D}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{V}{g} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dy}{dt} \frac{dx}{dt} = 0$$

$$D \frac{dV}{dt} - V \frac{dy}{dt} + \frac{dy}{dt} \frac{dx}{dt} = D(S_0 - S_f)g$$

Substituindo $\frac{dx}{dt} = V \pm c$, $D = y$ (para canais de grande largura) e dividindo tudo

por y :

$$\frac{dV}{dt} - \frac{V}{y} \frac{dy}{dt} + \frac{dy}{dt} (V \pm c) = (S_0 - S_f)g$$



$$\frac{dV}{dt} \pm \frac{c}{y} \frac{dy}{dt} = (S_0 - S_f)g \quad (\text{Eq. V-3})$$

Fazendo: $\frac{dV}{dt} \pm \frac{dF}{dt} = (S_0 - S_f)g$

Nota-se que: $\frac{d(F)}{dt} = \frac{c}{y} \frac{dy}{dt}$

$$F' \frac{dy}{dt} = \frac{c}{y} \frac{dy}{dt}$$

$$F' = \frac{c}{y}$$

$$F = \int \frac{c}{y} dy$$

$$F = \int \frac{\sqrt{gy}}{y} dy$$

$$F = \sqrt{g} \int y^{-1/2} dy$$

$$F = 2c$$

E com isto:

$$\frac{d(2c)}{dt} = \frac{c}{y} \frac{dy}{dt} \quad (\text{Eq. V-4})$$

Substituindo (II-34) em (II-33)

$$\frac{dV}{dt} \pm \frac{d(2c)}{dt} = (S_0 - S_f)g$$



$$\frac{d(V \pm 2c)}{dt} = (S_0 - S_f)g$$

$$d(V \pm 2c) = g(S_0 - S_f)dt \quad (\text{Eq. V-5})$$

Defini-se:

$$\Omega = g(S_0 - S_f)dt \quad (\text{Eq. V-6})$$

As equações (V-4) e (V-6) são conhecidas como *equações características*. O método de derivar essas equações foi dado primeiro por MASSAU (1889), depois ele desenvolveu o procedimento de tentativa e erro aplicando essas equações para problemas de escoamento não-permanente. Devido ao procedimento ser muito trabalhoso, o método não tinha sido muito popular até o advento da melhoria dos sistemas computacionais.



Apêndice D: Dados - DGPS

Tabela A-3 Dados obtidos ao longo do trecho estudado

Descrição	Ponto	E	N	H	Distância total(m)
Ponte Santo Antônio	R1	460321,8	7513480	838,14	0,00
Estação Cantagalo	R2	459672,5	7514344	837,14	1505,76
Apae rural	R3	458932,6	7514346	836,78	2345,99
Condomínio rural	R4	458219,2	7514878	835,14	3869,37
Cabelte Cabelauto	R5	457151,7	7516258	832,81	6612,76
Ponte da AFL	R6	456505,4	7517206	832,24	8546,73
Estação Captação-Copasa	BASE	456343,9	7517752	831,97	9289,98
Ponte da Imbel	R7	455611,5	7518154	830,95	10274,76



Apêndice E: Programa Translação de ondas de cheia – Método das Diferenças Finitas

Dim nivelSecao(200), areaCG(200), RhCG(200), ManningCG(200), QCG(200), BCG(200), cCG(200), vCG(200) As Double
Dim areaCP(200), RhCP(200), ManningCP(200), QCP(200), BCP(200), cCP(200), vCP(200) As Double
Dim y(40000, 30), Q(40000, 30), v(40000, 30), c(40000, 30), Area(40000, 30), Rh(40000, 30), B(40000, 30) As Double
Dim QM, QJ, AM, AJ, RhM, RhJ, BM, BJ, cJ, cM, yJ, yM, distanciatotal, A, Raioh, Manning, ManningJ, ManningM As Double
Dim So, L(50), Thid(200), yhid(200), Tempototal, yMontante, yJusante, largT, cel, nivel, Vazao, alpha, Beta As Double
Dim s, t, ns, deltaT, dx As Integer

Sub Principal()

leiturasdasfuncoes 'Qs(y),ns(y),As(y),Rhs(y)
leiturasdados 'dados de entrada

CondicaoInicial 'hidrograma de entrada Q(t,0),y(0,s),v(0,s),c(0,s),Q(0,s)
ImpressaodaCondicaoInicial
Metododasdiferencasfinitas
ImpressaoMC

End Sub

Sub leiturasdasfuncoes()

Worksheets("dadosCC").Select
npontos = 200
Range("b4").Select

n = 1

Do While n <= npontos

nivelSecao(n) = ActiveCell 'nivel para as duas secoes
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop

ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1

Do While n <= npontos

QCG(n) = ActiveCell 'vazao cantagalo
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop

ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1

Do While n <= npontos

ManningCG(n) = ActiveCell
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop

ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select



```

n = 1
Do While n <= npontos

    areaCG(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 2).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    RhCG(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    BCG(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 3).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    QCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    ManningCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    areaCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 2).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    RhCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

```



```
BCP(n) = ActiveCell
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop

End Sub
Sub leiturasdados()

Worksheets("principal").Select

Range("ns").Select
ns = ActiveCell 'número de seções
Range("dist").Select
distanciatotal = ActiveCell
Range("deltaT").Select 'intervalo de tempo para o cálculo
deltaT = ActiveCell
Range("Tempo").Select
Tempototal = ActiveCell 'tempo total de cálculo
Range("So").Select
So = ActiveCell 'declividade do fundo do canal
Range("ymontante").Select
yMontante = ActiveCell 'nível da água a montante
Range("yjusante").Select
yJusante = ActiveCell 'nível da água a jusante
dx = distanciatotal / ns 'distancia entre cada seção
Range("alpha").Select
alpha = ActiveCell 'fator de relaxação
Range("beta").Select
Beta = ActiveCell 'fator Matos

End Sub
Sub NivelTempoM()

n = 0
Do While Thid(n) < (t * deltaT)

    n = n + 1

Loop

If Thid(n) = (t * deltaT) Then

    ycalc = yhid(n)

Else

    xmaior = yhid(n)
    ymaior = Thid(n)

    xmenor = yhid(n - 1)
    ymenor = Thid(n - 1)

    If xmaior = xmenor Then
        ycalc = xmaior
    Else
        w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
        z = ymenor - w * xmenor
        ycalc = Abs((-z) + (t * deltaT)) / w
    End If
End If
y(t, s) = ycalc

End Sub
Sub nivelM() 'nível a montante

n = 0

Do While nivelSecao(n) < nivel

    n = n + 1
```



```
Loop
If nivelSecao(n) = y(t, s) Then

QM = QCG(n)
AM = areaCG(n)
RhM = RhCG(n)
BM = BCG(n)
ManningM = ManningCG(n)

Else

'Vazão
xmaior = QCG(n)
ymaior = nivelSecao(n)

xmenor = QCG(n - 1)
ymenor = nivelSecao(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

QM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'vazão montante

'Area
xmaior = areaCG(n)
xmenor = areaCG(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

AM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'area montante

'Raio Hidraulico
xmaior = RhCG(n)
xmenor = RhCG(n - 1)
If xmaior = xmenor Then
  RhM = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  RhM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'raio hidraulico montante
End If

'Largura de Topo
xmaior = BCG(n)
xmenor = BCG(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

BM = Abs((-z) + y(t, s)) / w

'Manning
xmaior = ManningCG(n)
xmenor = ManningCG(n - 1)
If xmaior = xmenor Then ' q o valor de n é igual para uma mm altura
  ManningM = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  ManningM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'Manning montante
End If
End If

End Sub
```



Sub nivelJ() 'nivel a jusante

n = 1

Do While nivelSecao(n) < nivel

n = n + 1

Loop

If nivelSecao(n) = y(t, s) Then

QJ = QCP(n)

AJ = areaCP(n)

RhJ = RhCP(n)

RhJ = RhCP(n)

BJ = BCP(n)

ManningJ = ManningCP(n)

Else

'Vazão

xmaior = QCP(n)

ymaior = nivelSecao(n)

xmenor = QCP(n - 1)

ymenor = nivelSecao(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

QJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Area

xmaior = areaCP(n)

xmenor = areaCP(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

AJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Raio Hidraulico

xmaior = RhCP(n)

xmenor = RhCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then

RhJ = xmaior

Else

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

RhJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

End If

RhJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Largura de Topo

xmaior = BCP(n)

xmenor = BCP(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

BJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Manning

xmaior = ManningCP(n)

xmenor = ManningCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then



```

ManningJ = xmaior
Else
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

ManningJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w
End If

End If

End Sub
Sub Calculodonivel()

aux = Abs(yM - yJ) / distanciatotal

If yM > yJ Then
nivel = yM - aux * (s * dx)
Else
nivel = yM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculodaVazao()

aux = Abs(QM - QJ) / distanciatotal

If QM > QJ Then
Vazao = QM - aux * (s * dx)
Else
Vazao = QM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub Calculodaarea()

aux = Abs(AM - AJ) / distanciatotal

If AM > AJ Then
A = AM - aux * (s * dx)
Else
A = AM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoRaiohidraulico()

aux = Abs(RhM - RhJ) / distanciatotal

If RhM > RhJ Then
Raioh = RhM - aux * (s * dx)
Else
Raioh = RhM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoLarguradeTopo()

aux = Abs(BM - BJ) / distanciatotal

If BM > BJ Then
largT = BM - aux * (s * dx)
Else
largT = BM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoManning()

aux = Abs(ManningM - ManningJ) / distanciatotal

If ManningM > ManningJ Then

```



```

    Manning = ManningM - aux * (s * dx)
Else
    Manning = ManningM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub cRhM()

    n = 1

    Do While cCG(n) < cel
        n = n + 1
    Loop

    If cCG(n) = cel Then
        ManningM = ManningCG(n)
        RhM = RhCG(n)
    Else
        'n
        xmaior = ManningCG(n)
        ymaior = cCG(n)

        xmenor = ManningCG(n - 1)
        ymenor = cCG(n - 1)

        If xmaior = xmenor Then
            ManningM = xmaior
        Else
            w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
            z = ymenor - w * xmenor

            ManningM = Abs((-z) + cel) / w
        End If

        'Raio Hidraulico
        xmaior = RhCG(n)
        xmenor = RhCG(n - 1)
        w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
        z = ymenor - w * xmenor

        RhM = Abs((-z) + cel) / w
    End If
End Sub
Sub cRhJ()

    n = 1

    Do While cCP(n) < cel
        n = n + 1
    Loop

    If cCP(n) = cel Then
        ManningJ = ManningCP(n)
        RhJ = RhCP(n)
    Else
        'n
        xmaior = ManningCP(n)
        ymaior = cCP(n)

```




```

xmenor = ManningCP(n - 1)
ymenor = cCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
  ManningJ = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

ManningJ = Abs((-z) + cel) / w
End If

'Raio Hidraulico
xmaior = RhCP(n)
xmenor = RhCP(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

RhJ = Abs((-z) + cel) / w
End If
End Sub
Sub cnivelJ()
  n = 1
  Do While cCP(n) < cel
    n = n + 1
  Loop
  If cCP(n) = cel Then
    yJ = nivelSecao(n)
    AJ = QCP(n)
  Else
    'A
    xmaior = areaCP(n)
    ymaior = cCP(n)
    xmenor = areaCP(n - 1)
    ymenor = cCP(n - 1)
    If xmaior = xmenor Then
      AJ = xmaior
    Else
      w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
      z = ymenor - w * xmenor
    End If
    AJ = Abs((-z) + cel) / w
  End If
  'y
  xmaior = nivelSecao(n)
  xmenor = nivelSecao(n - 1)
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor
  yJ = Abs((-z) + cel) / w
End If
End Sub
Sub cnivelM()
  n = 1

```



```

Do While cCG(n) < cel
    n = n + 1
Loop
If cCG(n) = cel Then
    yM = nivelSecao(n)
    AM = QCG(n)
Else
    'A
    xmaior = areaCG(n)
    ymaior = cCG(n)
    xmenor = areaCG(n - 1)
    ymenor = cCG(n - 1)
    If xmaior = xmenor Then
        AM = xmaior
    Else
        w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
        z = ymenor - w * xmenor
    End If
    AM = Abs((-z) + cel) / w
End If
'y
xmaior = nivelSecao(n)
xmenor = nivelSecao(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor
yM = Abs((-z) + cel) / w
End If
End Sub
Sub VazaoNivelJ()
    n = 1
    Do While QCP(n) < Q(t + 1, s)
        n = n + 1
    Loop
    If QCP(n) = Q(t + 1, s) Then
        yJ = nivelSecao(n)
        AJ = areaCP(n)
        BJ = BCP(n)
    Else
        'nivel
        ymaior = QCP(n)
        ymenor = QCP(n - 1)
        xmaior = nivelSecao(n)
        xmenor = nivelSecao(n - 1)
        w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
        z = ymenor - w * xmenor
        yJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w
    End If
End Sub

```



```

'A
xmaior = areaCP(n)
xmenor = areaCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
  AJ = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  AJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w
End If

'B
xmaior = BCP(n)
xmenor = BCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
  BJ = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  BJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w
End If
End Sub
Sub CondicaoInicial()

'LEITURA DO HIDROGRAMA DA SEÇÃO A MONTANTE

Worksheets("hidrograma").Select
Range("npontos").Select
npontoshid = ActiveCell
Range("hidrograma").Select
n = 0

Do While n < npontoshid

  Thid(n) = ActiveCell
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1

Loop
Thid(npontoshid) = Tempototal

ActiveCell.Offset(-npontoshid, 1).Range("A1").Select
n = 0
Do While n < npontoshid

  yhid(n) = ActiveCell
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1

Loop
yhid(npontoshid) = yhid(npontoshid - 1) 'considerando y constante depois da onda

'CALCULO DE TODOS OS NÍVEIS PARA TODAS AS SEÇÕES EM t=0

aux1 = Abs(yJusante - yMontante) / ns
y(0, 0) = yMontante
s = 1
Do While s < ns
  If yJusante < yMontante Then
    y(0, s) = yMontante - aux1 * s
  Else
    y(0, s) = yMontante + aux1 * s
  End If
  s = s + 1
Loop

```



```

y(0, ns) = yJusante

'CALCULO DA VELOCIDADE E DA CELERIDADE PARA TODAS AS SEÇÕES EM t=0

s = 0
t = 0
nivel = y(t, s)
nivelM
L(s) = 0
Q(0, 0) = QM
Area(t, s) = AM
Rh(t, s) = RhM
B(t, s) = BM
c(t, s) = (9.81 * AM / BM) ^ 0.5
v(t, s) = Q(t, s) / AM
s = 1
Do While s <= ns

    nivel = y(t, s)
    nivelM
    nivelJ
    Calculodaarea
    CalculoRaiohidraulico
    CalculoLarguradeTopo
    CalculodaVazao
    L(s) = L(0) + s * dx
    Area(t, s) = A
    Rh(t, s) = Raioh
    B(t, s) = largT
    Q(t, s) = Vazao
    c(t, s) = (9.81 * A / largT) ^ 0.5
    v(t, s) = Q(t, s) / A
    s = s + 1

Loop

End Sub
Sub Metododasdiferencasfinitas()

t = 0
Do While t < (Tempototal / deltaT)

    'cálculo para seção a montante
    s = 0
    t = t + 1
    NivelTempoM 'calcula o nível do hidrograma para um determinado tempo
    nivel = y(t, s)
    nivelM ' calcula os valores de Q, A, Rh ,n ,T
    t = t - 1
    Q(t + 1, s) = QM
    v(t + 1, s) = QM / AM
    c(t + 1, s) = (9.81 * AM / BM) ^ 0.5

    'cálculo para o meio do canal

    s = 1
    Do While s < ns

        nivel = y(t, s)
        nivelM
        nivelJ
        Calculodaarea
        CalculoLarguradeTopo
        CalculoManning
        CalculoRaiohidraulico
        Sf = ((Manning * v(t, s)) ^ 2) / (Raioh ^ (4 / 3))
        y(t + 1, s) = (alpha * y(t, s)) + ((1 - alpha) * (y(t, s + 1) + y(t, s - 1)) / 2) - 1 * ((deltaT / (2 * dx)) * (v(t, s) * (y(t, s + 1) -
        y(t, s - 1)) + (A / largT) * (v(t, s + 1) - v(t, s - 1))))
        v(t + 1, s) = (alpha * v(t, s)) + ((1 - alpha) * (v(t, s + 1) + v(t, s - 1)) / 2) - ((deltaT / (2 * dx)) * (v(t, s) * (v(t, s + 1) - v(t, s
        - 1)) + 9.81 * (y(t, s + 1) - y(t, s - 1)) + 9.81 * (So - Sf) * deltaT))
    
```



```

nivel = y(t + 1, s)
nivelM
nivelJ
Calculodaarea
CalculoLarguradeTopo
Area(t + 1, s) = A
Q(t + 1, s) = v(t + 1, s) * A
c(t + 1, s) = (9.81 * A / largT) ^ 0.5

s = s + 1
Loop

' Cálculo para a última seção *****
s = ns

nivel = y(t, s)
nivelJ
A = AJ
largT = BJ
y(t + 1, s) = (alpha * y(t, s)) + ((1 - alpha) * (y(t, s) + y(t, s - 1)) / 2) + Beta * ((deltaT / (2 * dx)) * (v(t, s) * (y(t, s) - y(t, s - 1)) + (A / largT) * (v(t, s) - v(t, s - 1))))

t = t + 1 ' para calcular o nivelJ no tempo certo: y(t + 1, s)
nivel = y(t, s)
nivelJ ' calcula os valores de Q, A, Rh ,n ,T
t = t - 1

Q(t + 1, s) = QJ
Area(t + 1, s) = AJ
v(t + 1, s) = QJ / AJ
c(t + 1, s) = (9.81 * AJ / BJ) ^ 0.5

t = t + 1
Loop

End Sub
Sub ImpressaodaCondicaoInicial()

    t = 0
    Worksheets("condicaoInicial").Select

    s = 0
    Range("distancia").Select
    Do While s <= ns

        ActiveCell.Value = L(s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        s = s + 1
    Loop

    s = 0
    Range("y0s").Select
    Do While s <= ns

        ActiveCell.Value = y(t, s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        s = s + 1
    Loop

    s = 0
    Range("q0s").Select
    Do While s <= ns

        ActiveCell.Value = Q(t, s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        s = s + 1
    Loop

    s = 0
    Range("A0s").Select

```



```
Do While s <= ns
    ActiveCell.Value = Area(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
s = 0
Range("Rh0s").Select
Do While s <= ns
    ActiveCell.Value = Rh(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
s = 0
Range("B0s").Select
Do While s <= ns
    ActiveCell.Value = B(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
s = 0
Range("v0s").Select
Do While s <= ns
    ActiveCell.Value = v(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
s = 0
Range("c0s").Select
Do While s <= ns
    ActiveCell.Value = c(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
End Sub
Sub ImpressaoMC()
    intT = 200 'intervalo de tempo de impressao
    ints = 2 ' intervalo de espaço de impressão
    tempodeimpressao = (Tempototal / deltaT)
    nptos = tempodeimpressao / intT '(Tempototal / (deltaT*intT))
    Worksheets("y").Select
    Range("a1").Select
    ActiveCell.Value = "T(s)L(m)"
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    t = 0
    Do While t <= tempodeimpressao
        ActiveCell.Value = t * deltaT
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        t = t + intT
    Loop
    Range("b1").Select
    s = 0
    Do While s <= ns
        t = 0
        ActiveCell.Value = L(s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        Do While t <= tempodeimpressao
            ActiveCell.Value = y(t, s)
            ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
            t = t + intT
```



```
Loop
s = s + ints
ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'celeridade
Worksheets("c").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\c(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
Do While t <= tempodeimpressao
    ActiveCell.Value = t * deltaT
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    t = t + intT
Loop

Range("b1").Select

s = 0

Do While s <= ns
    t = 0
    ActiveCell.Value = L(s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

    Do While t <= tempodeimpressao
        ActiveCell.Value = c(t, s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        t = t + intT
    Loop
    s = s + ints
    ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'velocidade
Worksheets("v").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\v(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
Do While t <= tempodeimpressao
    ActiveCell.Value = t * deltaT
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    t = t + intT
Loop

Range("b1").Select

s = 0

Do While s <= ns
    t = 0
    ActiveCell.Value = L(s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

    Do While t <= tempodeimpressao
        ActiveCell.Value = v(t, s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        t = t + intT
    Loop
    s = s + ints
    ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'Vazão
Worksheets("Q").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\v(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
Do While t <= tempodeimpressao
    ActiveCell.Value = t * deltaT
```



```
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        t = t + intT
    Loop

    Range("b1").Select

    s = 0

    Do While s <= ns
        t = 0
        ActiveCell.Value = L(s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

        Do While t <= tempodeimpressao
            ActiveCell.Value = Q(t, s)
            ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
            t = t + intT
        Loop
        s = s + ints
        ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
    Loop
End Sub
```




Apêndice F: Programa Translação de ondas de cheia – Método das Características

Dim nivelSecao(200), areaCG(200), RhCG(200), ManningCG(200), QCG(200), BCG(200), cCG(200), vCG(200) As Double
Dim areaCP(200), RhCP(200), ManningCP(200), QCP(200), BCP(200), cCP(200), vCP(200) As Double
Dim y(40000, 30), Q(40000, 30), v(40000, 30), c(40000, 30), Area(40000, 30), Rh(40000, 30), B(40000, 30) As Double
Dim QM, QJ, AM, AJ, RhM, RhJ, BM, BJ, cJ, cM, yJ, yM, distanciatotal, A, Raioh, Manning, ManningJ, ManningM As Double
Dim So, L(50), Thid(200), yhid(200), Tempototal, yMontante, yJusante, largT, cel, nivel, Vazao, alpha, Beta As Double
Dim s, t, ns, deltaT, dx As Integer

Sub Principal()

leiturasfuncoes 'Qs(y),ns(y),As(y),Rhs(y)
leiturasdados 'dados de entrada

CondicaoInicial 'hidrograma de entrada Q(t,0),y(0,s),v(0,s),c(0,s),Q(0,s)
ImpressaodaCondicaoInicial
Metodascaracteristicas
ImpressaoMC

End Sub

Sub leiturasfuncoes()

Worksheets("dadosCC").Select
npontos = 200
Range("b4").Select

n = 1
Do While n <= npontos

nivelSecao(n) = ActiveCell 'nivel para as duas secoes
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

QCG(n) = ActiveCell 'vazao cantagalo
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

ManningCG(n) = ActiveCell
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos



```

areaCG(n) = ActiveCell
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 2).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    RhCG(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    BCG(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 3).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    QCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    ManningCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    areaCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 2).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    RhCP(n) = ActiveCell
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
    n = n + 1

Loop
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select

n = 1
Do While n <= npontos

    BCP(n) = ActiveCell

```



```

ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
n = n + 1

Loop

End Sub
Sub leiturasdados()

Worksheets("principal").Select

Range("ns").Select
ns = ActiveCell 'número de seções
Range("dist").Select
distanciatotal = ActiveCell
Range("deltaT").Select 'intervalo de tempo para o cálculo
deltaT = ActiveCell
Range("Tempo").Select
Tempototal = ActiveCell 'tempo total de cálculo
Range("So").Select
So = ActiveCell 'declividade do fundo do canal
Range("ymontante").Select
yMontante = ActiveCell 'nível da água a montante
Range("yjusante").Select
yJusante = ActiveCell 'nível da água a jusante
dx = distanciatotal / ns 'distancia entre cada seção
Range("alpha").Select
alpha = ActiveCell 'fator de relaxação
Range("beta").Select
Beta = ActiveCell 'fator Matos

End Sub
Sub NivelTempoM()

n = 0
Do While Thid(n) < (t * deltaT)

n = n + 1

Loop

If Thid(n) = (t * deltaT) Then

ycalc = yhid(n)

Else

xmaior = yhid(n)
ymaior = Thid(n)

xmenor = yhid(n - 1)
ymenor = Thid(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
ycalc = xmaior
Else
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor
ycalc = Abs((-z) + (t * deltaT)) / w
End If
End If
y(t, s) = ycalc

End Sub
Sub nivelM() 'nível a montante

n = 0

Do While nivelSecao(n) < nivel

n = n + 1

Loop

```



```

If nivelSecao(n) = y(t, s) Then

  QM = QCG(n)
  AM = areaCG(n)
  RhM = RhCG(n)
  BM = BCG(n)
  ManningM = ManningCG(n)

Else

  'Vazão
  xmaior = QCG(n)
  ymaior = nivelSecao(n)

  xmenor = QCG(n - 1)
  ymenor = nivelSecao(n - 1)

  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  QM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'vazão montante

  'Area
  xmaior = areaCG(n)
  xmenor = areaCG(n - 1)
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  AM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'area montante

  'Raio Hidraulico
  xmaior = RhCG(n)
  xmenor = RhCG(n - 1)
  If xmaior = xmenor Then
    RhM = xmaior
  Else
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

    RhM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'raio hidraulico montante
  End If

  'Largura de Topo
  xmaior = BCG(n)
  xmenor = BCG(n - 1)
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  BM = Abs((-z) + y(t, s)) / w

  'Manning
  xmaior = ManningCG(n)
  xmenor = ManningCG(n - 1)
  If xmaior = xmenor Then ' q o valor de n é igual para uma mm altura
    ManningM = xmaior
  Else
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

    ManningM = Abs((-z) + y(t, s)) / w 'Manning montante
  End If
End If

End Sub
Sub nivelJ() 'nivel a jusante

```



n = 1

Do While nivelSecao(n) < nivel

n = n + 1

Loop

If nivelSecao(n) = y(t, s) Then

QJ = QCP(n)

AJ = areaCP(n)

RhJ = RhCP(n)

RhJ = RhCP(n)

BJ = BCP(n)

ManningJ = ManningCP(n)

Else

'Vazão

xmaior = QCP(n)

ymaior = nivelSecao(n)

xmenor = QCP(n - 1)

y menor = nivelSecao(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

QJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Area

xmaior = areaCP(n)

xmenor = areaCP(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

AJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Raio Hidraulico

xmaior = RhCP(n)

xmenor = RhCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then

RhJ = xmaior

Else

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

RhJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

End If

RhJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Largura de Topo

xmaior = BCP(n)

xmenor = BCP(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)

z = ymenor - w * xmenor

BJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w)

'Manning

xmaior = ManningCP(n)

xmenor = ManningCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then

ManningJ = xmaior

Else



```

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

ManningJ = Abs((-z) + y(t, s)) / w
End If

End If

End Sub
Sub Calculodonivel()

aux = Abs(yM - yJ) / distanciatotal

If yM > yJ Then
nível = yM - aux * (s * dx)
Else
nível = yM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculodaVazao()

aux = Abs(QM - QJ) / distanciatotal

If QM > QJ Then
Vazao = QM - aux * (s * dx)
Else
Vazao = QM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub Calculodaarea()

aux = Abs(AM - AJ) / distanciatotal

If AM > AJ Then
A = AM - aux * (s * dx)
Else
A = AM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoRaiohidraulico()

aux = Abs(RhM - RhJ) / distanciatotal

If RhM > RhJ Then
Raioh = RhM - aux * (s * dx)
Else
Raioh = RhM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoLarguradeTopo()

aux = Abs(BM - BJ) / distanciatotal

If BM > BJ Then
largT = BM - aux * (s * dx)
Else
largT = BM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub CalculoManning()

aux = Abs(ManningM - ManningJ) / distanciatotal

If ManningM > ManningJ Then
Manning = ManningM - aux * (s * dx)
Else

```



```

Manning = ManningM + aux * (s * dx)
End If

End Sub
Sub cRhM()

n = 1

Do While cCG(n) < cel
    n = n + 1
Loop

If cCG(n) = cel Then

ManningM = ManningCG(n)
RhM = RhCG(n)

Else

'n
xmaior = ManningCG(n)
ymaior = cCG(n)

xmenor = ManningCG(n - 1)
ymenor = cCG(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
    ManningM = xmaior
Else
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

ManningM = Abs((-z) + cel) / w
End If

'Raio Hidraulico
xmaior = RhCG(n)
xmenor = RhCG(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

RhM = Abs((-z) + cel) / w

End If
End Sub
Sub cRhJ()

n = 1

Do While cCP(n) < cel
    n = n + 1
Loop

If cCP(n) = cel Then

ManningJ = ManningCP(n)
RhJ = RhCP(n)

Else

'n
xmaior = ManningCP(n)
ymaior = cCP(n)

xmenor = ManningCP(n - 1)
ymenor = cCP(n - 1)

```



```

    If xmaior = xmenor Then
      ManningJ = xmaior
    Else
      w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
      z = ymenor - w * xmenor

      ManningJ = Abs((-z) + cel) / w
    End If

    'Raio Hidraulico
    xmaior = RhCP(n)
    xmenor = RhCP(n - 1)
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

    RhJ = Abs((-z) + cel) / w
  End If
End Sub
Sub cnivelJ()

  n = 1

  Do While cCP(n) < cel

    n = n + 1

  Loop

  If cCP(n) = cel Then

    yJ = nivelSecao(n)
    AJ = QCP(n)

  Else

    'A
    xmaior = areaCP(n)
    ymaior = cCP(n)

    xmenor = areaCP(n - 1)
    ymenor = cCP(n - 1)

    If xmaior = xmenor Then
      AJ = xmaior
    Else
      w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
      z = ymenor - w * xmenor

      AJ = Abs((-z) + cel) / w
    End If

    'y
    xmaior = nivelSecao(n)
    xmenor = nivelSecao(n - 1)
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

    yJ = Abs((-z) + cel) / w
  End If
End Sub
Sub cnivelM()

  n = 1

  Do While cCG(n) < cel

```




```

    n = n + 1

Loop

If cCG(n) = cel Then

yM = nivelSecao(n)
AM = QCG(n)

Else

'A
xmaior = areaCG(n)
ymaior = cCG(n)

xmenor = areaCG(n - 1)
ymenor = cCG(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
    AM = xmaior
Else
    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    z = ymenor - w * xmenor

AM = Abs((-z) + cel) / w
End If

'y
xmaior = nivelSecao(n)
xmenor = nivelSecao(n - 1)
w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

yM = Abs((-z) + cel) / w
End If
End Sub
Sub VazaoNivelJ()
    n = 1

    Do While QCP(n) < Q(t + 1, s)

        n = n + 1

Loop

If QCP(n) = Q(t + 1, s) Then

yJ = nivelSecao(n)
AJ = areaCP(n)
BJ = BCP(n)

Else

'nivel

ymaior = QCP(n)
ymenor = QCP(n - 1)

xmaior = nivelSecao(n)
xmenor = nivelSecao(n - 1)

w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
z = ymenor - w * xmenor

yJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w

'A

```



```

xmaior = areaCP(n)
xmenor = areaCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
  AJ = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  AJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w
End If

'B
xmaior = BCP(n)
xmenor = BCP(n - 1)

If xmaior = xmenor Then
  BJ = xmaior
Else
  w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
  z = ymenor - w * xmenor

  BJ = Abs((-z) + Q(t + 1, s)) / w
End If
End If
End Sub
Sub CondicaoInicial()

'LEITURA DO HIDROGRAMA DA SEÇÃO A MONTANTE

Worksheets("hidrograma").Select
Range("npontos").Select
npontoshid = ActiveCell
Range("hidrograma").Select
n = 0

Do While n < npontoshid

  Thid(n) = ActiveCell
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1

Loop
Thid(npontoshid) = Tempototal

ActiveCell.Offset(-npontoshid, 1).Range("A1").Select
n = 0
Do While n < npontoshid

  yhid(n) = ActiveCell
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1

Loop
yhid(npontoshid) = yhid(npontoshid - 1) 'considerando y constante depois da onda

'CALCULO DE TODOS OS NÍVEIS PARA TODAS AS SEÇÕES EM t=0

aux1 = Abs(yJusante - yMontante) / ns
y(0, 0) = yMontante
s = 1
Do While s < ns
  If yJusante < yMontante Then
    y(0, s) = yMontante - aux1 * s
  Else
    y(0, s) = yMontante + aux1 * s
  End If
  s = s + 1
Loop
y(0, ns) = yJusante

```



'CALCULO DA VELOCIDADE E DA CELERIDADE PARA TODAS AS SEÇÕES EM t=0

```
s = 0
t = 0
nivel = y(t, s)
nivelM
L(s) = 0
Q(0, 0) = QM
Area(t, s) = AM
Rh(t, s) = RhM
B(t, s) = BM
c(t, s) = (9.81 * AM / BM) ^ 0.5
v(t, s) = Q(t, s) / AM
s = 1
Do While s <= ns
```

```
    nivel = y(t, s)
    nivelM
    nivelJ
    Calculodaarea
    CalculoRaiohidraulico
    CalculoLarguradeTopo
    CalculodaVazao
    L(s) = L(0) + s * dx
    Area(t, s) = A
    Rh(t, s) = Raioh
    B(t, s) = largT
    Q(t, s) = Vazao
    c(t, s) = (9.81 * A / largT) ^ 0.5
    v(t, s) = Q(t, s) / A
    s = s + 1
```

Loop

End Sub

Sub Metodascaracteristicas()

```
t = 0
Do While t < (Tempototal / deltaT)
```

'cálculo para seção a montante

```
s = 0
t = t + 1
NivelTempoM 'calcula o nível do hidrograma para um determinado tempo
nivel = y(t, s)
nivelM ' calcula os valores de Q, A, Rh ,n ,T
t = t - 1
v(t + 1, s) = QM / AM
c(t + 1, s) = (9.81 * AM / BM) ^ 0.5
```

'cálculo das características para o meio do canal

```
s = 0
Do While s < (ns - 1)
```

```
    vd = (v(t, s + 1) + v(t, s + 2)) / 2
    vu = (v(t, s) + v(t, s + 1)) / 2
    cd = (c(t, s + 1) + c(t, s + 2)) / 2
    cu = (c(t, s) + c(t, s + 1)) / 2
    yd = (y(t, s + 1) + y(t, s + 2)) / 2
    yu = (y(t, s) + y(t, s + 1)) / 2
    cdaux = cd + 1
    cuaux = cu + 1
    vdaux = vd + 1
    vuaux = vu + 1
```

```
    Do While (Abs(cdaux - cd) > 0.0000001) And (Abs(cuaux - cu) > 0.0000001) And (Abs(vuaux - vu) > 0.0000001)
    And (Abs(vdaux - vd) > 0.0000001)
```

```
    nivel = yu
    nivelJ
    nivelM
```



CalculoManning
CalculoRaiohidraulico

$$Sfu = ((Manning * vu)^2) / (Raioh ^ (4 / 3))$$
$$omegau = 9.81 * (So - Sfu)$$

nivel = yd
nivelJ
nivelM

s = s + 2
CalculoManning
CalculoRaiohidraulico
s = s - 2

$$Sfd = ((Manning * vd)^2) / (Raioh ^ (4 / 3))$$
$$omegad = 9.81 * (So - Sfd)$$

$$CONSTp = vu + 9.81 * yu / cu + 9.81 * omegau * deltaT$$
$$CONSTn = vd - 9.81 * yd / cd + 9.81 * omegad * deltaT$$

$$vp = (CONSTp + CONSTn) / 2$$
$$y(t + 1, s + 1) = (vp - CONSTn) * cu / 9.81$$

nivel = y(t, s + 1) ' para o cálculo na seção p
nivelJ
nivelM

s = s + 1
Calculodaarea
CalculoLarguradeTopo
s = s - 1

$$cp = (9.81 * A / largT) ^ 0.5$$

$$dxd = (vd - cd) * deltaT$$
$$tetad = dxd / dx$$
$$dxu = (vu + cu) * deltaT$$
$$tetau = dxu / dx$$

$$vu = (1 - tetau) * v(t, s + 1) + tetau * v(t, s)$$

$$cuaux = cu$$

$$cu = (1 - tetau) * c(t, s + 1) + tetau * c(t, s)$$
$$vd = (1 - tetad) * v(t, s + 1) + tetad * v(t, s + 2)$$
$$cdaux = cd$$
$$cd = (1 - tetad) * c(t, s + 1) + tetad * c(t, s + 2)$$

$$yu = (1 - tetau) * y(t, s + 1) + tetau * y(t, s)$$
$$yd = (1 - tetad) * y(t, s + 1) + tetad * y(t, s + 2)$$

Loop

$$y(t + 1, s + 1) = y(t + 1, s + 1)$$

nivel = y(t + 1, s + 1)
nivelJ
nivelM

s = s + 1
Calculodaarea
s = s - 1

$$v(t + 1, s + 1) = vp$$
$$c(t + 1, s + 1) = cp$$

$$Area(t + 1, s + 1) = A$$
$$Q(t + 1, s + 1) = Area(t + 1, s + 1) * v(t + 1, s + 1)$$



```

s = s + 1
Loop

' Cálculo das características para a última seção *****
s = ns

'aux = (v(t, s) * deltaT) / dx 'proporção do espaço percorrido pelo espaço total

'Q(t + 1, s) = Q(t, s) * (1 - aux) + Q(t, s - 1) * aux
'VazaoNivelJ
'y(t + 1, s) = yJ
'Area(t + 1, s) = AJ
'v(t + 1, s) = Q(t + 1, s) / Area(t + 1, s)
'c(t + 1, s) = (9.81 * AJ / BJ) ^ 0.5

'y(t + 1, s) = y(t, s) * (1 - aux) + y(t, s - 1) * aux
nivel = y(t, s)
nivelJ
A = AJ
largT = BJ
y(t + 1, s) = (alpha * y(t, s)) + ((1 - alpha) * (y(t, s) + y(t, s - 1)) / 2) + Beta * ((deltaT / (2 * dx)) * (v(t, s) * (y(t, s) - y(t, s - 1)) + (A / largT) * (v(t, s) - v(t, s - 1))))

t = t + 1 ' para calcular o nivelJ no tempo certo: y(t + 1, s)
nivel = y(t, s)
nivelJ ' calcula os valores de Q, A, Rh ,n ,T
t = t - 1

Q(t + 1, s) = QJ
Area(t + 1, s) = AJ
v(t + 1, s) = QJ / AJ
c(t + 1, s) = (9.81 * AJ / BJ) ^ 0.5

t = t + 1
Loop

End Sub
Sub ImpressaodaCondicaoInicial()

t = 0
Worksheets("condicaoInicial").Select

s = 0
Range("distancia").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = L(s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("y0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = y(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("q0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = Q(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

```



```
s = 0
Range("A0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = Area(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("Rh0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = Rh(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("B0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = B(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("v0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = v(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop

s = 0
Range("c0s").Select
Do While s <= ns

    ActiveCell.Value = c(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    s = s + 1
Loop
End Sub
Sub ImpressaoMC()

    intT = 200 'intervalo de tempo de impressao
    ints = 2 ' intervalo de espaço de impressão
    tempodeimpressao = (Tempototal / deltaT)
    nptos = tempodeimpressao / intT '(Tempototal / (deltaT*intT))

    Worksheets("y").Select
    Range("a1").Select
    ActiveCell.Value = "T(s)\L(m)"
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    t = 0
    Do While t <= tempodeimpressao
        ActiveCell.Value = t * deltaT
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
        t = t + intT
    Loop

    Range("b1").Select

    s = 0

    Do While s <= ns
        t = 0
        ActiveCell.Value = L(s)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

        Do While t <= tempodeimpressao
            ActiveCell.Value = y(t, s)
```



```
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = t + intT
Loop
s = s + ints
ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'celeridade
Worksheets("c").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\c(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
Do While t <= tempodeimpressao
ActiveCell.Value = t * deltaT
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = t + intT
Loop

Range("b1").Select

s = 0

Do While s <= ns
t = 0
ActiveCell.Value = L(s)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

Do While t <= tempodeimpressao
ActiveCell.Value = c(t, s)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = t + intT
Loop
s = s + ints
ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'velocidade
Worksheets("v").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\v(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
Do While t <= tempodeimpressao
ActiveCell.Value = t * deltaT
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = t + intT
Loop

Range("b1").Select

s = 0

Do While s <= ns
t = 0
ActiveCell.Value = L(s)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

Do While t <= tempodeimpressao
ActiveCell.Value = v(t, s)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = t + intT
Loop
s = s + ints
ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

'Vazão
Worksheets("Q").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Value = "T(s)\v(m/s)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
t = 0
```



```
Do While t <= tempodeimpressao
  ActiveCell.Value = t * deltaT
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
  t = t + intT
Loop

Range("b1").Select

s = 0

Do While s <= ns
  t = 0
  ActiveCell.Value = L(s)
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select

  Do While t <= tempodeimpressao
    ActiveCell.Value = Q(t, s)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    t = t + intT
  Loop
  s = s + ints
  ActiveCell.Offset(-(nptos + 2), 1).Range("A1").Select
Loop

End Sub
```




Apêndice G: Programa gerador de curva chave

Dim y, nivel, ymin, ymax, yc, declividade, z1, z2, ytalvegue, xtalvegue, ntalvegue As Double
Dim ysecao(1000), xsecao(1000), QCC(1000), nivelCC(1000), ManningCC(1000) As Double
Dim ACC(1000), RhCC(1000), PMCC(1000), TCC(1000) As Double
Dim A, T, PM, Rh, V, Manning, Q, interv, Bt, h As Double
Dim Asc, PMs, z1p, z2p, Ap, Ae, Ad, Ac, PMp, PMe, PMd, PMc, nz1p, nz2p, he, hd As Double
Dim nz1, nz2, n, nintcc, aux, npontos As Integer
Dim NivelMaxCC, nivelc, z1t, z2t As Double
Dim nvazantep, nvazantes, cotaesquerda, cotadireita As Double

Sub CALCULODAVAZAO()

```
dadosdeentradaCOMUM
dadosdeentradaCALCULODAVAZAO

If nivel >= ymin Then

    leiturasecaoprincipal

    If ysecao(npontos) > ysecao(1) Then
        NivelMaxCC = ysecao(1) ' altura maxima que é calculada a curva chave
    Else
        NivelMaxCC = ysecao(npontos)
    End If

    If nivel > ymax Then

        ' calha principal
        aux = 1
        h = ymax
        cotasdamargemesquerda
        cotasdamargemdireita
        Bp = z2 - z1 'largura de topo da seção principal
        z1p = z1
        z2p = z2
        nz1p = nz1
        nz2p = nz2
        he = ymax
        hd = ymax
        nivelc = ymax
        integral
        Ap = Asc
        PMp = PMs
        'calha esquerda
        aux = 2
        h = nivel
        cotasdamargemesquerda
        cotaesquerda = z1
        z1t = z1
        z2 = z1p
        nz2 = nz1p + 1
        he = nivel
        hd = ymax
        nivelc = nivel
        integral
        Ae = Asc
        PMe = PMs
        'calha direita
        aux = 3
        cotasdamargemdireita
        cotadireita = z2
        z1 = z2p
        z2t = z2
        nz1 = nz2p - 1
```



```
he = ymaxp
hd = nivel
nivelc = nivel
integral
Ad = Asc
PMd = PMs
'coluna d'água
Ac = (nivel - ymaxp) * Bp
PMc = 2 * (nivel - ymaxp) + Bp
calculos

Else
h = nivel
cotasdasmargemesquerda
cotaesquerda = z1
cotasdasmargemdireita
cotadireita = z2
z1t = z1
z2t = z2
he = nivel
hd = nivel
nivelc = nivel
aux = 1
integral
Ap = Asc
PMp = PMs
calculos
End If
tabelaVazao

End If

MsgBox " Vazão = " & Q
If nivel < ymin Then
MsgBox "Entre com um valor maior ou igual a " & ymin

End If

End Sub
Sub CalculoCurvaChave()

cont = 0
dadosdeentradaCOMUM
dadosdeentradaCurvaChave
leiturasecaoprincipal

If ysecao(npontos) > ysecao(1) Then
NivelMaxCC = ysecao(1) ' altura maxima que é calculada a curva chave
Else
NivelMaxCC = ysecao(npontos)
End If
'NivelMaxCC = 10 'para usar no prog Metodo das caracteristicas
interv = (NivelMaxCC - ymin) / nintcc 'tamanho do intervalo
Do While nivel < NivelMaxCC

If nivel > ymaxp Then

' calha principal
aux = 1
h = ymaxp
cotasdasmargemesquerda
cotasdasmargemdireita
Bp = z2 - z1 'largura de topo da seção principal
z1p = z1
z2p = z2
nz1p = nz1
nz2p = nz2
he = ymaxp
hd = ymaxp
nivelc = ymaxp
integral
Ap = Asc
PMp = PMs
```



```

'calha esquerda
aux = 2
h = nivel
cotasdamargemesquerda
cotaesquerda = z1
z2 = z1p
nz2 = nz1p + 1
he = nivel
hd = ymaxp
nivelc = nivel
integral
Ae = Asc
PMe = PMs
'calha direita
aux = 3
cotasdamargemdireita
cotadireita = z2
z1 = z2p
nz1 = nz2p - 1
he = ymaxp
hd = nivel
nivelc = nivel
integral
Ad = Asc
PMd = PMs
'coluna d'água
Ac = (nivel - ymaxp) * Bp
PMc = 2 * (nivel - ymaxp) + Bp
calculos

Else
h = nivel
cotasdamargemesquerda
cotaesquerda = z1
cotasdamargemdireita
cotadireita = z2
z1t = z1
z2t = z2
he = nivel
hd = nivel
nivelc = nivel
aux = 1
integral
Ap = Asc
PMp = PMs
calculos
End If

QCC(cont) = Q
ManningCC(cont) = Manning
ACC(cont) = A
PMCC(cont) = PM
RhCC(cont) = Rh
TCC(cont) = T

If cont = 0 Then

    nivelCC(0) = ymin
    cont = cont + 1
    nivel = nivel + interv

Else

    nivelCC(cont) = interv + nivelCC(cont - 1)
    cont = cont + 1
    nivel = nivel + interv

End If

Loop

tabelacurvachave
End Sub

```



Sub dadosdeentradaCOMUM()

```
Worksheets("simula").Select
declividade = Cells(7, 5)
Range("e8").Select
ymaxp = ActiveCell 'altura maxima da calha principal
ymin = 0.01 'altura minima para os calculos
ytalvegue = 1000
```

```
nvazantep = Cells(9, 5)
nvazantes = Cells(10, 5)
Ap = 0
Ae = 0
Ad = 0
Ac = 0
PMp = 0
PMe = 0
PMd = 0
PMc = 0
```

End Sub

Sub dadosdeentradaCALCULODAVAZAO()

```
Worksheets("simula").Select
nivel = Cells(5, 10) 'nível da água
```

End Sub

Sub dadosdeentradaCurvaChave()

```
Worksheets("simula").Select
nintcc = Cells(13, 5) 'numero de intervalos da curva chave
```

```
nivel = ymin
```

End Sub

Sub leiturasecaoprincipal()

```
Worksheets("secao").Select
npontos = Cells(3, 3)
Range("b5").Select
```

```
n = 1
```

```
Do While n <= npontos
```

```
  xsecao(n) = ActiveCell
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1
```

```
Loop
```

```
ActiveCell.Offset(-npontos, 1).Range("A1").Select
```

```
n = 1
```

```
Do While n <= npontos
```

```
  ysecao(n) = ActiveCell
```

```
  If ytalvegue > ysecao(n) Then
```

```
    ytalvegue = ysecao(n)
    xtalvegue = xsecao(n)
    ntalvegue = n
```

```
  End If
```

```
  ActiveCell.Offset(1, 0).Range("a1").Select
  n = n + 1
```

```
Loop
```



End Sub

Sub cotasdamargemesquerda()

```
n = ntalvegue
Do While ysecao(n) < h
    n = n - 1
Loop
If ysecao(n) = h Then
    z1 = xsecao(n)
Else
    xmaior = xsecao(n)
    ymaior = ysecao(n)
    xmenor = xsecao(n + 1)
    ymenor = ysecao(n + 1)

    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    k = ymenor - w * xmenor

    nmenor = n - 1
    z1 = Abs((-k) + h) / w
End If
nz1 = n
```

End Sub

Sub cotasdamargemdireita()

```
n = ntalvegue
Do While ysecao(n) < h
    n = n + 1
Loop
If ysecao(n) = h Then
    z2 = xsecao(n)
Else
    xmaior = xsecao(n)
    ymaior = ysecao(n)
    xmenor = xsecao(n - 1)
    ymenor = ysecao(n - 1)

    w = (ymaior - ymenor) / (xmaior - xmenor)
    k = ymenor - w * xmenor

    nmenor = n - 1
    z2 = Abs((-k) + h) / w
End If
nz2 = n
```

End Sub

Sub integral() 'area do canal pela regra de Simpson

```
PMps = 0
Asc = 0
```



```
areaacima = 0
areaabaixo = 0
n = nz1 + 1
Do While n < (nz2 - 1)

    base = Abs(xsecao(n + 1) - xsecao(n))
    altura = Abs(ysecao(n + 1) - ysecao(n))

    If ysecao(n + 1) < ysecao(n) Then

        h2 = ysecao(n + 1)

    Else

        h2 = ysecao(n) 'h2 altura menor do fundo

    End If

    d = Sqr(base ^ 2 + altura ^ 2) ' diagonal
    PMps = PMps + d 'perimetro molhado parcial da seção
    areaparcial = ((base * altura / 2) + base * h2)
    areaabaixo = areaabaixo + areaparcial
    n = n + 1

Loop
If aux = 1 Then
    ys1 = ysecao(nz1 + 1)
    xs1 = xsecao(nz1 + 1)
    ys2 = ysecao(nz2 - 1)
    xs2 = xsecao(nz2 - 1)
End If
If aux = 2 Then
    If z1 < xsecao(nz1p) Then
        ys1 = ysecao(nz1 + 1)
        xs1 = xsecao(nz1 + 1)
        ys2 = ysecao(nz2 - 1)
        xs2 = xsecao(nz2 - 1)
    Else
        ys1 = hd
        xs1 = z2
        ys2 = hd
        xs2 = z2
    End If
End If
If aux = 3 Then

    If z2 > xsecao(nz2p) Then
        ys1 = ysecao(nz1 + 1)
        xs1 = xsecao(nz1 + 1)
        ys2 = ysecao(nz2 - 1)
        xs2 = xsecao(nz2 - 1)
    Else
        ys1 = he
        xs1 = z1
        ys2 = he
        xs2 = z1
    End If
End If
'esquerda
If he >= ys1 Then
    ys3 = ys1
Else
    ys3 = he
End If
yinterv = Abs(he - ys1)
xinterv = Abs(z1 - xs1)
PMz1 = Sqr(yinterv ^ 2 + xinterv ^ 2)
areaabaixo1 = (((yinterv * xinterv) / 2) + xinterv * ys3)

'direita
If hd >= ys2 Then
    ys3 = ys2
```



```
Else
  ys3 = hd
End If
yinterv = Abs(hd - ys2)
xinterv = Abs(z2 - xs2)
Pmz2 = Sqr(yinterv ^ 2 + xinterv ^ 2)
areaabaiox2 = (((yinterv * xinterv) / 2) + xinterv * ys3)

'total
PMs = PMps + PMz1 + Pmz2 'PM da seção
areaacima = nivelc * (z2 - z1) 'nível da calha
Asc = areaacima - (areaabaixo + areaabaiox1 + areaabaiox2) 'A da seção

End Sub

Sub calculos()

A = Ap + Ae + Ad + Ac
PM = PMp + PMe + PMd

T = cotadireita - cotaesquerda ' largura de topo

Rh = A / PM

If nivel < ymax Then
  h = nivel
Else
  h = ymax
End If

'%DMP = 3,2817 * %nvazante ^ 2 - 7,4733 * %nvazante + 4,3023
'%nvazante ^ 2 (- 7,4733/3,2817) * %nvazante + (4,3023-%DMP)/3,2817
' por Bácsara
' pelo table curve
'%nvazante = 1.081325242 - 1.95432589*%DMP + 7.869474599*%DMP ^ 2 - 17.4047301*%DMP
^3+16.96912742*%DMP ^ 4 - 5.89428262*%DMP ^ 5

'B = -7.4733 / 3.2817

'hnmin = ymax * (-3.2817 * (B ^ 2) / 4 + 4.3023) 'nível mínimo que a eq consegue calcular
'If h < hnmin Then
'  hn = hnmin
'Else
'  hn = h
'End If

pdmp = h / ymax
Manning = (1.081325242 - 1.95432589 * pdmp + 7.869474599 * pdmp ^ 2 - 17.4047301 * pdmp ^ 3 +
16.96912742 * pdmp ^ 4 - 5.89428262 * pdmp ^ 5) * nvazantep

Rhp = Ap / PMp
Vp = (Rhp ^ (2 / 3)) * (declividade ^ 0.5) / Manning
Qp = Vp * Ap

If nivel > ymax Then

  pdmp = nivel / ymax
  If pdmp < 1.2 Then
    Manning = (1.081325242 - 1.95432589 * pdmp + 7.869474599 * pdmp ^ 2 - 17.4047301 * pdmp ^ 3 +
16.96912742 * pdmp ^ 4 - 5.89428262 * pdmp ^ 5) * nvazantep
  Else
    Manning = 0.05
  End If
  'y=1.429209773 - 13.5570451*x+142.8351996*x^2 - 715.512147*x^3+1613.083006*x^4+-991.461784*x^5-
1241.95614*x^6+340.5944911*x^7+1745.384445*x^8
  Rhc = Ac / PMc
  Vc = (Rhc ^ (2 / 3)) * (declividade ^ 0.5) / Manning
  Qc = Vc * Ac
```



```

pdmp = nivel / NivelMaxCC
Manning = (1.081325242 - 1.95432589 * pdmp + 7.869474599 * pdmp ^ 2 - 17.4047301 * pdmp ^ 3 +
16.96912742 * pdmp ^ 4 - 5.89428262 * pdmp ^ 5) * nvazantes

```

```

Rhe = Ae / PMe
Ve = (Rhe ^ (2 / 3)) * (declividade ^ 0.5) / Manning
Qe = Ve * Ae

```

```

Rhd = Ad / PMd
Vd = (Rhd ^ (2 / 3)) * (declividade ^ 0.5) / Manning
Qd = Vd * Ad

```

```
End If
```

```

Q = Qp + Qe + Qd + Qc
V = Q / A
Manning = (Rh ^ (2 / 3)) * (declividade ^ 0.5) / V

```

```
End Sub
```

```
Sub tabelaVazao()
```

```

Worksheets("simula").Select
Cells(13, 10) = T
Cells(14, 10) = A
Cells(15, 10) = PM
Cells(16, 10) = Rh
Cells(17, 10) = V
Cells(18, 10) = Q
Range("a1").Select

```

```
End Sub
```

```
Sub tabelacurvachave()
```

```

cont = 0
Worksheets("simula").Select
Range("ycc").Select

Do While cont < nintcc

    ActiveCell.Value = nivelCC(cont)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    cont = cont + 1
Loop

```

```

cont = 0
Range("Q").Select

```

```

Do While cont < nintcc

    ActiveCell.Value = QCC(cont)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    cont = cont + 1
Loop

```

```

cont = 0
Range("mn").Select

```

```

Do While cont < nintcc

    ActiveCell.Value = ManningCC(cont)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
    cont = cont + 1
Loop

```

```

cont = 0
Range("ACC").Select

```

```

Do While cont < nintcc

    ActiveCell.Value = ACC(cont)

```




```
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
cont = cont + 1
Loop

cont = 0
Range("PMCC").Select

Do While cont < nintcc

ActiveCell.Value = PMCC(cont)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
cont = cont + 1
Loop

cont = 0
Range("RhCC").Select

Do While cont < nintcc

ActiveCell.Value = RhCC(cont)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
cont = cont + 1
Loop

cont = 0
Range("TCC").Select

Do While cont < nintcc

ActiveCell.Value = TCC(cont)
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
cont = cont + 1
Loop

Range("a1").Select
```

End Sub

