



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE  
CONFLUÊNCIAS UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE CANAIS PARALELOS**

**MAIKO PEDROSA VITAL SEVERO**

**UBERLÂNDIA, 30 DE AGOSTO DE 2016**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**Maiko Pedrosa Vital Severo**

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CONFLUÊNCIAS UTILIZANDO A TÉCNICA DE CANAIS PARALELOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de concentração: **Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Linha de Pesquisa: **Recursos Hídricos e Saneamento**.

Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho**

Uberlândia, 30 de agosto de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S498s Severo, Maiko Pedrosa Vital, 1981-  
2016 Simulação numérica de confluências utilizando a técnica de canais paralelos / Maiko Pedrosa Vital Severo. - 2016.  
110 f. : il.

Orientador: José Eduardo Alamy Filho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Escoamento - Simulação por computador - Teses. I. Alamy Filho, José Eduardo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

---



## ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

**ATA Nº:** 166/2016

**CANDIDATO:** Maiko Pedrosa Vital Severo

**Nº. Matrícula:** 11412ECV010

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

**TÍTULO:** "Simulação de confluências utilizando a técnica de canais paralelos"

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**LINHA DE PESQUISA:** Recursos Hídricos e Saneamento

**PROJETO DE PESQUISA:** Monitoramento, Modelagem e Simulação de Escoamentos em Aquíferos

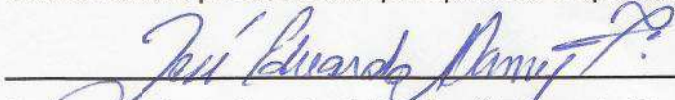
**DATA DA DEFESA:** 30 de agosto de 2016

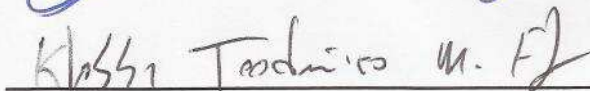
**LOCAL:** Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

**HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 14:00 - 17:00

Reuniu-se na **Sala de Reuniões Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta: Professores Doutores: **Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU; Klebber Teodomiro Martins Formiga – EECA/UFG e José Eduardo Alamy Filho** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga** participou da defesa por meio de vídeo conferência e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

  
Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

  
Membro externo: **Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – EECA/UFG**

Membro interno: **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU**



Membro interno: **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU**

Uberlândia, 30 de agosto de 2016.



*A todos que contribuíram para a realização deste  
trabalho com tanta amizade, dedicação e empenho.*

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a Deus, pela fé, força e direcionamento nos momentos difíceis dessa jornada de estudos juntamente com o trabalho, me ajudando a superar as adversidades que surgiram em meio a esse percurso propriamente dito.

À minha mãe e a meu pai, por acreditarem em mim nas horas em que eu mesmo duvidava ser capaz, pelo incentivo constante e ensinamentos para sempre lutar e jamais desistir.

À minha irmã, que sempre torceu pelo meu sucesso nos desafios quaisquer que fossem.

À minha querida esposa Leidielen pelo apoio, carinho e amor dedicados em todos os momentos.

Aos amigos que encontrei nessa caminhada: Guilherme Lima, Aristeu da Silveira, Ariosvaldo, Alonso e André que com atenção e zelo me ajudaram a entender algumas partes mais complexas deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, por ter flexibilizado meus horários de trabalho para que pudesse concluir as atividades do curso de Mestrado.

À Faculdade de Engenharia Civil, que forneceu a oportunidade e apoio para realização desta pesquisa, especialmente aos professores que com paciência se dedicaram na minha formação curricular e aos técnicos administrativos que contribuíram para efetivação deste legado até o momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho, pela inspiração e norteamento no desenvolvimento dessa dissertação de Mestrado. Agradeço à compreensão, à disposição, ao incentivo constante e ajuda em todos os momentos, pois sem isso, não teria chegado tão longe nessa pesquisa e conclusão deste trabalho.

“Então Moisés estendeu a mão sobre o mar; e o Senhor fez retirar o mar por um forte vento oriental toda aquela noite, e fez do mar terra seca, e as águas foram divididas. ”

Êxodo 14:21

Severo, M. P. V. Simulação Numérica de Confluências Utilizando a Técnica de Canais Paralelos. 110 p. Dissertação de Mestrado – Planejamento Urbano e Infraestrutura – Recursos Hídricos e Saneamento, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

## RESUMO

---

O presente trabalho aponta um estudo das confluências nos escoamentos em rios usando a Técnica de Canais Paralelos (TCP), um modelo hidrodinâmico unidimensional de simulação numérica que tem como ferramenta de cálculo o *Standart Step Method* (STM). Foram observados os escoamentos permanentes variados em canais e rios, sendo associados às equações que envolvem as simulações numéricas a fim de obter um comportamento que possa representar as mudanças significativas no escoamento da água. Realizou-se inicialmente a caracterização de um modelo teste dos canais confluentes elaborando-se uma linguagem em VBA (*Visual Basic for Applications*). Depois, por meio de plataformas, gráficos e do STM foi possível produzir resultados que mensuraram o fluxo nessa região da confluência, para posteriormente serem comparados ao programa HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) verificando a validade do modelo proposto. Aplicou-se ainda a TCP em duas situações práticas de estudo reais, uma confluência dentro do perímetro urbano e outra em uma bacia hidrográfica rural. Utilizando *softwares* como *Surfer* 10 (programa de visualização de dados) e AutoCAD 15 (*software* do tipo CAD - *Computer Aided Design*) foram desenvolvidos mapas e figuras das zonas de previsão de inundação. Com essas respostas obtidas, também foram quantificados os elementos que detalham o escoamento, tais como: áreas atingidas lateralmente, as situações mais críticas do nível da água, a velocidade do escoamento, o volume e a vazão nas seções compreendidas dos canais. Em suma, essa proposta metodológica apresenta vantagens pela estabilidade e potencialidade na manipulação e no processamento de simulações em canais confluentes, o que gera benefícios para a modelagem hidrodinâmica na área de recursos hídricos em termos de eficiência computacional quando aplicada a sistemas mais sofisticados.

**Palavras-chave:** Canais – Confluências –TCP– STM – Regime Permanente



Severo, M. P. V. Numerical simulation of Confluences using the technique of Parallel Channels. 110 p. Thesis of Master Degree - Planning Urban and Infrastructure - Water Resources and Sanitation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2016.

## ABSTRACT

---

This work points to a study of confluences in flows in the rivers using the technique of Parallel Channels (TCP), a one-dimensional hydrodynamic model of numerical simulation that has as a tool for calculating the Standard Step Method (STM). The permanent flows were observed in canals and rivers varied, being associated with the equations that involve the numerical simulations in order to obtain a behavior that could represent significant changes in water flow. Initially took the characterization of a test model from confluent channels elaborating a language in Visual Basic for Applications (VBA). Then, through platforms, graphics and the STM was unable to produce results that measured the flow in this region of Confluence, to later be compared to the HEC-RAS program (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) checking the validity of the proposed model. Even this TCP was applied in two practical situations of real study, a confluence within the urban area and another in a rural watershed. Using software such as Surfer 10 (data visualization program) and 15 AutoCAD (CAD software-Computer Aided Design) were developed maps and pictures of flood forecast zones. With those answers obtained, were also quantified the elements that detail the disposal, such as: stricken areas laterally, the most critical situations the water level, flow velocity, volume, and flow in the sections included the canals. In short, this methodological approach presents advantages for the stability and capability in handling and processing of simulations in confluent channels, which generates benefits for the hydrodynamic modeling in water resources in terms of computational efficiency when applied to more sophisticated systems.

**Keywords:** Channels- Confluences- TCP- STM- Permanent

# SÍMBOLO, ABREVIATURAS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

A - área transversal do rio ( $m^2$ )

$A_m$  - área molhada transversal do rio ( $m^2$ )

B - largura maior da seção transversal (m)

b- largura da seção transversal (m)

$\Delta x$  -variação no eixo x (m)

$d_{lat}$  - distância de inundação lateral (m)

Fr- número de Froude

g - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

h- profundidade (m)

$h_{jus}$ - profundidade a jusante (m)

$H_c$ - altura da calha (m)

$m_l$ ,  $m_l$ - coeficiente angular da reta

$\eta$  - coeficiente de rugosidade de Manning ( $s.m^{-1/3}$ )

P – perímetro (m)

$P_m$  – perímetro molhado (m)

Q – vazão ( $m^3$ )

$R_h$ - raio hidráulico (m)

$S_0$ - declividade inicial (m/m)

$S_f$  - declividade final (m/m)

t – tempo (s)

v- velocidade (m/s)

z- cota de fundo (m)

## SIGLAS

AutoCAD 2015- *CAD Software Computer Aided Design* (Programa utilizado na elaboração de desenhos técnicos em duas e três dimensões)

HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's River Analysis*. Programa de computador que modela o sistema hidráulico de fluxo de rios naturais e outros canais fornecendo suas principais características.

SURFER 10- Programa desenvolvido pela Golden Software Inc. permite uma rápida visualização do comportamento espacial da variável sob estudo.

VBA- *Visual Basic for Applications* (Linguagem de programação do Excel).

MNT- Modelo Numérico de Terreno

STM- *Standard Step Method* (Técnica computacional utilizada para estimar os perfis da superfície da água nos canais com condições de escoamento variado e permanente)

FLOODZ- Programa em VBA utilizado na geração de dados para caracterizar e os canais confluentes e as regiões de inundação.

# LISTAS DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Diagrama dos tipos de escoamentos .....	19
Figura 2.2 – Diagrama E-y .....	22
Figura 2.3 – Combinação do fluxo .....	24
Figura 2.4 – Esquema de uma confluência de dois canais .....	26
Figura 2.5 – Inundação de um canal lateralmente .....	28
Figura 3.1 – Representação do aumento de vazão na calha .....	31
Figura 3.2 – Representação da equação da linha de energia .....	32
Figura 3.3 – Passos STM com varreduras das seções .....	33
Figura 3.4 – Perfil do regime de escoamento pelo canal .....	34
Figura 3.5 – Confluência para dois canais A e B .....	37
Figura 3.6 – Representação de dois canais isolados .....	37
Figura 3.7 – Confluência múltiplas em um canal principal .....	38
Figura 3.8 – Representação para múltiplos canais isolados .....	38
Figura 3.9 – Esquema de inundação lateral de um rio .....	41
Figura 3.10 – Representação da confluência em pontos coordenados .....	42
Figura 3.11 – Ajuste dos canais para adequação dos pontos em comum .....	42
Figura 3.12 – Perfil dlat em corte e em planta de inundação lateral .....	44
Figura 3.13– Exemplo de Modelo Numérico de Terreno (MNT) .....	45
Figura 3.14 – Diagrama de blocos para confluência .....	46
Figura 4.1 – Perfil de um canal genérico confluyente com seções .....	47
Figura 4.2 – Representação do canal teste com coordenadas .....	48
Figura 4.3 – Seções e perfil do canal trapezoidal .....	49
Figura 4.4 – Seção do canal com representação esquemática .....	49
Figura 4.5 – Esquema da Técnica dos Canais Paralelos para o canal teste .....	51
Figura 4.6 – Perfis dos canais teste .....	55
Figura 4.7 – Profundidade dos canais em 2D e Superfície livre em 3D .....	56
Figura 4.8 – Gráfico de comparação TCP x HEC-RAS .....	58
Figura 4.9 – Confluência do Rio Uberabinha com Córrego do Óleo (RUxCO) .....	59
Figura 4.10 – Planimetria da confluência (RUxCO) .....	60
Figura 4.11 – Curvas de nível da confluência (m) (RUxCO) .....	61



Figura 4.12 – Planialtimetria da confluência (m) (RUxCO) .....	62
Figura 4.13 – Representação de um canal com planície de inundação .....	62
Figura 4.14 –Discretização do Rio Uberabinha com dados amostrais .....	64
Figura 4.15 –Discretização do Córrego do Óleo com dados amostrais.....	66
Figura 4.16 – Inundação da confluência (m) para Q <sub>5</sub> (RUxCO) .....	67
Figura 4.17 – Tensão cisalhante (Pa) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCO) .....	68
Figura 4.18 – Velocidade médias (m/s) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCO) .....	69
Figura 4.19 – Nível da água (m) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCO) .....	70
Figura 4.20 – Planície de inundação (m) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCO).....	71
Figura 4.21 – Terreno em 3D (m) na confluência (RUxCO) .....	71
Figura 4.22 – Escoamento em 3D (m) na confluência (RUxCO) .....	72
Figura 4.23 – MNT da inundação em 3D (m) na confluência (RUxCO).....	72
Figura 4.24 – Confluência do Rio Uberaba com Córrego Lageado (RUxCL).....	73
Figura 4.25 – Planimetria da confluência (RUxCL).....	74
Figura 4.26 – Curvas de nível (m) da confluência (RUxCL) .....	75
Figura 4.27 – Planialtimetria da confluência (m) (RUxCL).....	76
Figura 4.28 – Discretização do Rio Uberaba com dados amostrais .....	78
Figura 4.29 – Discretização do Córrego Lageado com dados amostrais.....	80
Figura 4.30 – Inundação da confluência (m) para Q <sub>5</sub> (RUxCL) .....	81
Figura 4.31 – Tensão cisalhante (Pa) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCL).....	82
Figura 4.32 – Velocidades médias (m/s) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCL) .....	82
Figura 4.33 – Nível da água (m) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCL).....	83
Figura 4.34 – Planície de inundação (m) na confluência para Q <sub>5</sub> (RUxCL).....	83
Figura 4.35 – Terreno em 3D (m) na confluência (RUxCL).....	84
Figura 4.36 – Escoamento em 3D (m) na confluência (RUxCL).....	85
Figura 4.37 – MNT da inundação em 3D (m) na confluência (RUxCL) .....	85

# TABELAS

---

Tabela 4.1 – Coordenadas da confluência teste.....	48
Tabela 4.2 – Coordenadas dos canais teste 1 e 2.....	48
Tabela 4.3 – Características geométricas amostrais dos canais 1 e 2.....	50
Tabela 4.4 – Comparação do TCP x HEC-RAS.....	57
Tabela 4.5 – Características amostrais do Rio Uberabinha.....	63
Tabela 4.6 – Características amostrais do Córrego do Óleo.....	65
Tabela 4.7 – Características amostrais do Rio Uberaba.....	77
Tabela 4.8 – Características amostrais do Córrego Lageado.....	79

# SUMÁRIO

---

1 INTRODUÇÃO .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 ESCOAMENTOS EM REDES DE CANAIS .....	19
2.2 ESCOAMENTO PERMANENTE VARIADO .....	20
2.2.1 Comportamento de um fluido quanto à sua variação no tempo .....	20
2.2.2 Comportamento de um fluido quanto à variação na trajetória das partículas .....	21
2.2.3 Considerações do modelo 1D .....	23
2.3 ESTUDO DO STANDARD STEP METHOD .....	23
2.4 ESPECIFICAÇÃO DO ESTUDO DAS CONFLUÊNCIAS .....	24
2.4.1 Estudo do ângulo de entrada do canal secundário na confluência .....	24
2.4.2 Fenômenos importantes que ocorrem na confluência .....	25
2.4.3 Contribuição do canal lateral na junção do fluxo .....	26
2.5 INUNDAÇÕES, CHEIAS E TRANSBORDAMENTOS NOS CANAIS .....	27
3 METODOLOGIA .....	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO .....	29
3.2 EQUAÇÃO GOVERNANTE DO ESCOAMENTO PERMANENTE E VARIADO ...	30
3.3 ESQUEMA NUMÉRICO STANDARD STEP METHOD .....	32
3.4 ESTUDO DA TÉCNICA DOS CANAIS PARALELOS .....	36
3.5 PREPARAÇÃO DOS CANAIS .....	39
3.6 PROGRAMA FLOODZ .....	39
3.7 ESTIMATIVA DE INUNDAÇÕES LATERAIS .....	41
3.8 DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA A IMPLEMENTAÇÃO .....	46
4 RESULTADOS .....	47
4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM CASO TESTE .....	47
4.1.1 Modelagem do canal teste .....	47
4.1.2 Esquema geométrico do canal na confluência teste .....	48
4.1.3 Coeficientes de Manning para o canal .....	49
4.1.4 Condições de contorno para os canais .....	50
4.1.5 Utilização da Técnica de Canais Paralelos .....	51

4.1.6 Aplicação do programa FLOODZ.....	52
4.1.7 Gráficos analisados com base na planilha resumo .....	54
4.1.8 Comparação da Técnica de Canais Paralelos com o HEC-RAS .....	57
4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM CASOS PRÁTICOS DE ESTUDO .....	59
4.2.1 Confluência do Rio Uberabinha x Córrego do Óleo .....	59
4.2.1.1 Caracterização da região (RU x CO) .....	60
4.2.1.2 Análise da zona de previsão de inundação da região (RU x CO) .....	62
4.2.1.3 Tensão cisalhante e da velocidade do escoamento (RU x CO) .....	68
4.2.1.4 Representação do nível da água e da planície de inundação (RU x CO) .....	69
4.2.1.5 Modelo Numérico do Terreno e do escoamento em 3D (RU x CO) .....	71
4.2.2 Confluência do Rio Uberaba x Córrego Lageado .....	73
4.2.2.1 Caracterização da região (RU x CL) .....	74
4.2.2.2 Análise da zona de previsão de inundação da região (RU x CL) .....	77
4.2.2.3 Tensão cisalhante e da velocidade do escoamento (RU x CL) .....	81
4.2.2.4 Representação do nível da água e da planície de inundação (RU x CL) .....	83
4.2.2.5 Modelo Numérico do Terreno e do escoamento em 3D (RU x CL) .....	84
5 CONCLUSÃO .....	86
REFERÊNCIAS .....	88
APÊNDICE .....	91
Apêndice A MTDHC .....	91
Apêndice B COMPRIMENTO .....	93
Apêndice C DISCRETIZAÇÃO .....	94
Apêndice D CURVAS-CHAVE .....	97
Apêndice E STM .....	102



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

As confluências são regiões específicas dos escoamentos e por sua vez representam locais propícios ao aumento do volume das águas devido ao somatório de vazões, neste contexto é que o estudo da Técnica dos Canais Paralelos (TCP) aplicada às confluências se torna uma importante ferramenta para a previsão de inundações dos rios e canais. Auxiliando, assim, na criação dos projetos de engenharia de drenagem urbana ou até outros que se assemelhem a essas situações.

A propagação das ondas de cheias nos rios pode ser representada pelos modelos hidrodinâmicos, estes desenvolvidos por diversos métodos numéricos computacionais complexos (SULEIMAN, 2006). Ainda assim, não se podem dispensar os modelos mais simples de propagação que exigem um número menor de dados de entrada e podem ser usados em alguns casos de maneira mais eficiente quando simulados.

Os modelos hidrodinâmicos 1D consideram o escoamento perpendicular à seção transversal não se preocupando com o seu ângulo de entrada de vazão lateral, por sua vez são utilizados como balizadores junto aos cálculos do método de solução proposto para este trabalho, o *Standard Step Method* (STM) (CHAUDHRY, 2008). Esse método é utilizado para estimar em uma dimensão o perfil da superfície da água, neste caso no regime permanente variado. Basicamente usa a combinação das equações de energia, momento e continuidade para determinar a profundidade com determinada declividade e vazão.

Diversas obras como as de estruturas de concreto armado, sistemas de abastecimento ao longo rio, redes de drenagem pluvial, barragens, redes de lançamento de efluentes entre outros usam os modelos hidrológicos na sua concepção. Na prática são muito válidos como suporte para a engenharia na simulação unidimensional das variáveis do escoamento e caracterização de canais (MELO, 1998).

Os modelos bidimensionais, apesar de serem largamente usados para simulação em canais, não foram objeto desse trabalho em virtude de que nesse caso não foi necessário determinar as características na sua direção transversal do escoamento e sim somente na direção longitudinal. Não obstante, muitas vezes a simplificação da modelagem em 1D não consegue representar o escoamento, mas com certeza pode ser parte inicial de um estudo 2D (LIMA, 2009).

As confluências possuem uma característica específica, que é o aumento da vazão por causa do canal confluyente. Um estudo abrangente desse fenômeno é necessário no projeto para combinar o escoamento em redes de canais abertos e para avaliar seus impactos. Este acontecimento foi reconhecido e intitulado por estudos anteriores como uma importante característica da combinação desses canais (CHANSON, 2004).

O objetivo desse trabalho é estudar o escoamento em canais paralelos confluentes usando o modelo da TCP, desenvolvida unidimensionalmente por meio das equações diferenciais para o escoamento em regimes permanentes variados. Aplicando conceitos numéricos do *Standart Step Method* a fim de avaliar previamente as zonas de inundação, os impactos dos níveis da água, das velocidades, das vazões nas regiões críticas dos rios e canais de uma maneira genérica que possa ser usado em situações práticas.

Por meio de programas como Excel (que possui código computacional escrito na linguagem VBA), AutoCAD 15 e *Surfer* 10 é que foi possível gerar resultados que permitiram detectar as áreas inundadas nos canais. Foi desenvolvido também um modelo teste de confluência discretizando os canais e evidenciando uma situação fictícia para avaliar o comportamento nessa zona de inundação.

Com esses dados foi comparada a Técnica de Canais Paralelos com o programa de simulações em rios e canais amplamente consagrado pela literatura, HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis*). Isso para determinar o quanto a técnica se mostrava próxima à realidade, para em um segundo momento usar o modelo desenvolvido anteriormente em dois casos práticos: uma confluência dentro do perímetro urbano e outra em uma bacia hidrográfica perto de uma região urbana.

O estudo também mostra a viabilidade do uso do Excel como meio de linguagem computacional para a simulação do escoamento, permitindo o pré-processamento por meio da entrada de parâmetros iniciais e pelo banco de dados armazenados em planilhas. Dessa forma, com a utilização de cálculos iterativos e com o pós-processamento foi possível gerar gráficos importantes na avaliação dos impactos, fornecendo informações suficientes para análise unidimensional dos escoamentos (ALAMY FILHO ET. AL. 2011).

Diante do exposto, esse trabalho permite uma abordagem ampla desta temática de confluências discutindo suas implicações no contexto da infraestrutura urbana como um mecanismo de auxílio na prevenção de inundações a fim de evitar consequências indesejadas (GRIBBIN, 2009). A principal contribuição desse estudo é a possibilidade de ir mais adiante com esse conteúdo e aprimorar as técnicas de modelagem em 1D já existentes, tornando-as mais rápidas e eficientes.

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 1:** Aborda o objeto de estudo e suas implicações.
- **Capítulo 2:** Apresenta uma revisão bibliográfica dos métodos estudados.
- **Capítulo 3:** Caracteriza a área de estudo e a dispõe sobre a metodologia aplicada.
- **Capítulo 4:** Comenta e discute os resultados.
- **Capítulo 5:** Realiza a conclusão do trabalho.

# CAPÍTULO 2

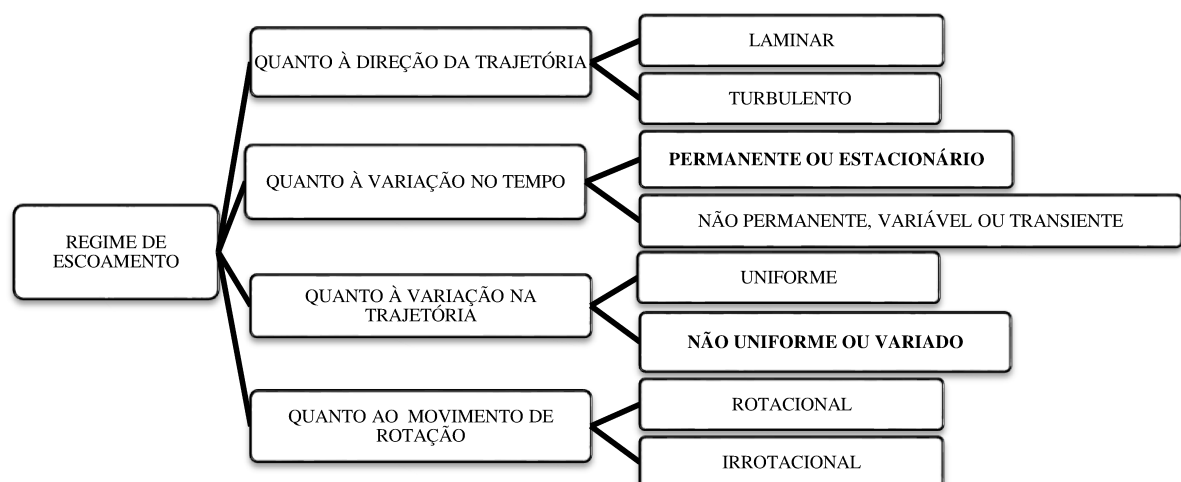
## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESCOAMENTOS EM REDES DE CANAIS

As propriedades hidráulicas em canais naturais em sua maioria são bastante irregulares, os valores empíricos são razoáveis e coletados através de observações e experiências em campo. No entanto, as aplicações de teorias consolidadas pelo uso em canais artificiais produzem resultados muito próximos ao real e relativamente precisos para fins práticos (CHOW, 1959). Dessa forma, as avaliações da capacidade de vazão, da profundidade e do nível da água são fundamentais para a caracterização hidráulica de um canal, constituídos por inúmeras seções transversais, cotas fundo e outros parâmetros necessários.

Quando os escoamentos são avaliados pelo tempo, estes podem ser permanentes e não permanentes, ao se analisar a variabilidade espacial os escoamentos podem ser uniformes e não uniformes. O diagrama da Figura 2.1 representa as situações possíveis de escoamento no canal:

**Figura 2.1 – Diagrama dos tipos de escoamentos**



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.2 ESCOAMENTO PERMANENTE VARIADO

Os escoamentos permanentes variados utilizados neste trabalho, e suas características são de fundamental importância nesse processo. As grandezas  $Q$  (vazão) e  $h$  (profundidade) variam ao longo da distância, mas em uma mesma seção, permanecem não variáveis com o tempo. Os casos mais comuns de variação em hidráulica fluvial são:

- ✓ Mudanças de declividade
- ✓ Mudanças significativas na seção
- ✓ A montante da confluência de rios
- ✓ A montante de reservatórios

### 2.2.1 Comportamento de um fluido quanto à sua variação no tempo

- **Escoamento permanente**, ou estacionário, é aquele no qual a velocidade e a pressão num determinado ponto, não variam com o tempo.

A velocidade e a pressão podem variar de um ponto para outro do fluxo, mas se mantêm constantes em cada ponto imóvel do espaço, em qualquer momento do tempo, fazendo a pressão e a velocidade em um ponto serem funções das coordenadas do ponto e não dependentes do tempo (CAIXETA, 2013). No escoamento permanente a corrente fluida é dita "estável". Considerando assim, que a vazão ( $Q$ ) e altura ( $h$ ) são conhecidas para as seções analisadas e não se alteram no tempo.

- **Escoamento não permanente**, é o escoamento no qual a velocidade e a pressão, em determinado ponto, são variantes com o tempo, variando também de um ponto a outro.

Este tipo de escoamento é também chamado de "variável" ou "transitório", e a corrente é dita "instável" (ROCHA, 2008). A pressão e a velocidade em um ponto são dependentes tanto das coordenadas como também do tempo.

### 2.2.2 Comportamento de um fluido quanto à variação na trajetória das partículas

- **Escoamento uniforme**, é aquele no qual todos os pontos da mesma trajetória que seguem as partículas apresentam a mesma velocidade, não havendo variação seu módulo, direção e sentido permanecem constantes (ALAMY FILHO, 2013). Neste escoamento, a seção transversal da corrente de fluido é invariável.
- **Escoamento variado**, é aquele no qual os diversos pontos de uma mesma trajetória não apresentam constância da velocidade num intervalo de tempo considerado. Isso significa que em cada seção mudam as características como área, profundidade, rugosidade do canal e etc.

Outra forma de subdividir o fluxo em estado constante (por exemplo, nenhuma onda de inundação), e dado da seguinte maneira: fluxo uniforme, fluxo gradualmente variado e fluxo rapidamente variado (PORTO, 1999).

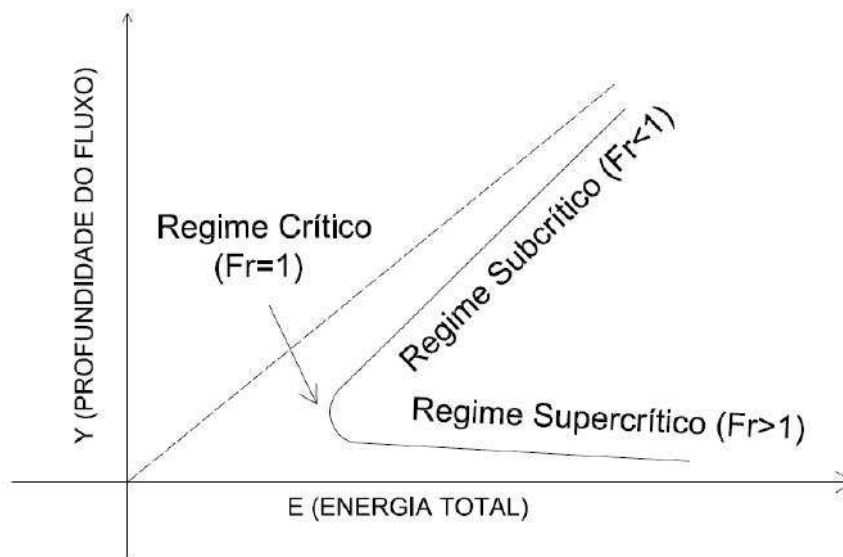
**Fluxo uniforme** descreve uma situação onde a profundidade de fluxo não muda com a distância ao longo do canal. Isso só pode ocorrer em um canal suave que não experimenta quaisquer mudanças no fluxo, geometria do canal, aspereza ou canal de inclinação. Durante o fluxo uniforme, a profundidade de fluxo é conhecida como profundidade normal. Esta profundidade é análoga à velocidade terminal de um objeto em queda livre, onde a gravidade e as forças de atrito estão em equilíbrio (MOGLEN, 2013). Tipicamente, esta profundidade é calculada usando a fórmula de Manning.

**Fluxo gradualmente variado** ocorre quando a mudança da espessura do fluxo pela mudança na distância do fluxo é muito pequena. Neste caso, as relações hidrostáticas desenvolvidas para fluxo uniforme ainda se aplicam. Exemplos disso incluem o remanso por trás de uma estrutura de fluxo (por exemplo, barragem, comportas, açude, etc.), quando há uma obstrução no canal, e quando há uma pequena alteração na inclinação do canal.

**Fluxo rapidamente variado** ocorre quando a mudança na profundidade de fluxo pela mudança na distância do fluxo é significativa. Neste caso, as relações hidrostáticas não são adequadas para soluções analíticas, e a continuidade do impulso deve ser empregada (NEVES, 1999). A exemplos incluem-se as grandes mudanças na inclinação como em um vertedouro, constrição/expansão abrupta do fluxo ou até um salto hidráulico.

Para a geometria do canal em uma taxa de fluxo determinada há uma relação entre a profundidade de fluxo e a energia total. Isto é ilustrado na Figura 2.2 onde indica a parcela de energia pela profundidade de fluxo, amplamente conhecida como um diagrama de E-y.

**Figura 2.2 – Diagrama E-y**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta representação, a profundidade onde ocorre a energia mínima é conhecida como a profundidade crítica. Analisando o gráfico percebe-se que quanto mais a profundidade diminui tende a um regime supercrítico, ao passo que, quando a profundidade aumenta tende a um regime subcrítico. Com efeito, o comportamento do escoamento pode ser caracterizado pelo número de Froude (Fr):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (2.1)$$

Sendo: V = velocidade (m/s); g = gravidade (m/s<sup>2</sup>) e y = profundidade (m)

- Regime subcrítico (Fr < 1);
- Regime crítico (Fr = 1);
- Regime supercrítico (Fr > 1).

### 2.2.3 Considerações do modelo 1D

Os modelos 1D assumem que o fluxo se move em uma só direção e que essa direção é conhecida, geralmente assumida como direção da parte central do canal (PAIVA, 2009). A geometria do canal é representada por seções transversais que são perpendiculares a direção do fluxo.

Segundo Vasquez (2009) A velocidade média na seção transversal ( $V$ ) é calculada a partir da equação da continuidade como sendo o resultado da vazão ( $Q$ ) pela área hidráulica ( $A$ ), ( $V = Q/A$ ). Os níveis de água são calculados usando equações de resistência hidráulica, como por exemplo, equação 2.2 de Manning:

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{S_0}} = A \cdot (R_H)^{\frac{2}{3}} \quad (2.2)$$

Onde:  $n$  – coeficiente de Manning (depende da rugosidade da parede);  $Q$  – vazão ( $m^3/s$ );  $S_0$  – declividade inicial ( $m/m$ );  $A$  – área ( $m^2$ );  $R_H = A_m/P_m$  - raio hidráulico ( $m$ ) ( $A_m$  é a área da seção transversal molhada e  $P_m$  o perímetro molhado). É importante ressaltar que esses métodos só fornecem um único valor médio de velocidade para toda a seção e que sua direção é perpendicular à seção transversal (BLADÉ, 2012).

## 2.3 ESTUDO DO STANDARD STEP METHOD

O método do *Standard Step Method* (STM) foi inicialmente descrito por Chow (1959, pág. 249), esse faz uso da Equação de Conservação de Energia, entre duas seções de cálculo, e da fórmula de Manning para determinação da perda de carga entre as seções consideradas.

Essa é uma técnica computacional utilizada para estimar a perfis de água de superfície unidimensional em canais abertos com fluxo gradualmente variado sob condições de estado estacionário. O STM usa uma combinação das equações energia, dinâmica e da continuidade para determinar a profundidade da água com uma dada inclinação final ( $S_f$ ) em relação a inclinação do canal inicial ( $S_0$ ), lembrando que a geometria do canal também modifica a taxa de fluxo determinado (MOGLEN, 2013).



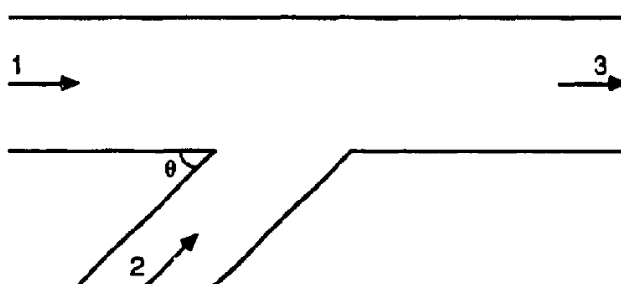
A distância entre as seções deve ser conhecida e o método busca determinar as variáveis hidráulicas em cada seção. O procedimento considera o escoamento unidimensional, permanente e gradualmente variado em um canal prismático. Além disso, o STM é uma metodologia amplamente usada no meio científico que produz resultados satisfatórios mesmo sendo baseada em algumas premissas simplificadoras. As premissas adotadas no modelo são as seguintes: escoamento permanente; fluxo unidimensional; declividade da linha de energia é constante entre duas seções transversais e declividade do canal inferior a 1:10 (HENDERSON, 1966).

## 2.4 ESPECIFICAÇÃO DO ESTUDO DAS CONFLUÊNCIAS

### 2.4.1 Estudo do ângulo de entrada do canal secundário na confluência

O primeiro estudo abrangente de modo que combina o fluxo em canal aberto foi fornecido por Taylor (1944). Ele estudou as características do fluxo na junção de dois canais horizontais cuja seção transversal era retangular. Ele aplicou a equação de momento para a análise da combinação de fluxo e verificou suas previsões com dados experimentais para ângulos de junção de 45° e 135°.

**Figura 2.3 – Combinação do fluxo**



Fonte: TRAN, 1988, p.69.

Seus estudos teóricos foram mais conclusivos para os ângulos de junção sobremaneira menores, acredita-se que isto era devido à distribuição de velocidade abaixo da junção que foi distorcida e o fluxo não permanece em paralelo às paredes do canal.

Na verdade, de acordo com os resultados do estudo apresentados, esta contrariedade está relacionada com a estimativa da transferência momento do ramo para o canal (TRAN, 1988).

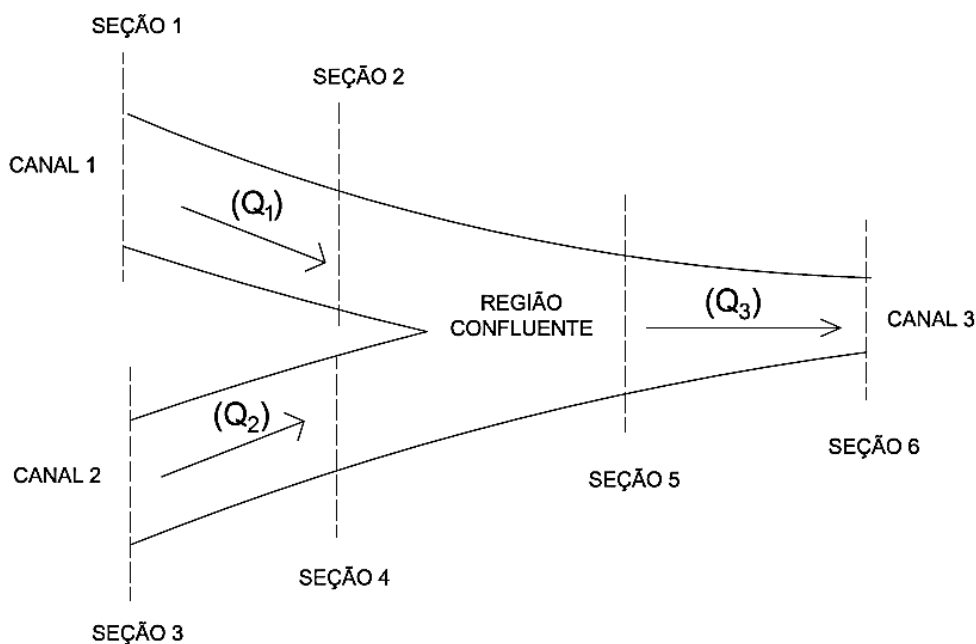
Um segundo estudo sistemático para junção simples dos escoamentos foi apresentado por Webber e Greated (1966), um pequeno modelo com junção ângulos  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  foi criada. Modi et al. (1981) investigado as combinações de canais aberto usou uma abordagem de mapeamento baseada em uma variável complexa teórica. No seu trabalho não levou em conta as perdas de energia.

Outro autor também estudo melhor essa região confluyente, Reid (1984) analisou experimentalmente a geometria da zona de separação nos cruzamentos de canal aberto. Os resultados incluíram dados para máximo o comprimento e a máxima largura da zona de separação. Os pesquisadores descobriram que aumentando a largura e o comprimento da zona de separação sistematicamente causam um aumento do ângulo de confluência e da descarga do ramo lateral. O índice de forma na zona de separação foi definido como a relação do máximo largura da recirculação pelo seu comprimento.

Ramamurthy (1988) estudou o escoamento de canais abertos na junção angular sobre a base da transferência do impulso do ramo lateral para principal ramo do canal. O pesquisador aplicou dinâmica separada de equações para o fluxo em ambos os canais laterais e principais. O momento de contribuição lateral foi encontrado para avaliar o quanto se aumentaria com os aumentos de taxa de descarga lateral.

#### **2.4.2 Fenômenos importantes que ocorrem na confluência**

Dentre as regiões de importância para o estudo de canais destacam-se as confluências, devido ao efeito de bloqueio no fluxo é preciso determinar como se comportam as variáveis no aumento de volume com o somatório das vazões (KESSERWANI, 2008). Isso posto, é necessário a caracterização dos elementos nessas regiões para a posteriormente simular como se comportam frente aos regimes de escoamentos impostos.

**Figura 2.4 – Esquema de uma confluência de dois canais**

Fonte: Elaborada pelo autor.

O dimensionamento de uma junção conforme Chow (1988) necessita de um cálculo bastante complexo, pois haverá remanso em ambos os canais devendo ser calculada a distância que atingirá tal remanso. Quando o escoamento é subcrítico o problema pode ser resolvido, mas quando é supercrítico as altas velocidades, as perdas, a recirculação do canal lateral e formação de ondas no canal principal começam a dar erros e assim surgem as instabilidades dos cálculos. Na maioria dos casos o estudo de modelos reduzidos é necessário para se encontrar resultados mais corretos quando o regime estudado é crítico (RASHWAN, 2004).

### 2.4.3 Contribuição do canal lateral na junção do fluxo

Ao longo do canal haverá algumas contribuições de fluxo do canal lateral no canal principal de escoamento. Quando o fluxo do canal secundário se aproxima do canal principal, sua direção, forma gradual e seu padrão de fluxo são semelhantes ao canal de curvas (THOMAZ, 2012). É importante saber, não considerar esta contribuição lateral é uma omissão importante na análise de fluxo combinado, especialmente quando o ângulo de junção não é muito pequeno.

As forças de pressão sobre a parede do canal do ramo devem ser consideradas para obter diretamente a magnitude do momentum lateral, que é transferido para o canal principal. Acredita-se que isto é devido à distribuição de velocidade, uma falta de uniformidade, na junção que foi distorcida e o fluxo não permanece paralelo às paredes do canal (VASQUEZ, 2009).

Deve-se observar que, na derivação deste modelo, Carballa (1979) negligencia a diferença de pressão sobre as duas paredes do canal de ramo e também deixa de lado o efeito do coeficiente de energia do fluxo abaixo da junção por questões de simplificação de cálculo.

## **2.5 INUNDAÇÕES, CHEIAS E TRANSBORDAMENTOS NOS CANAIS.**

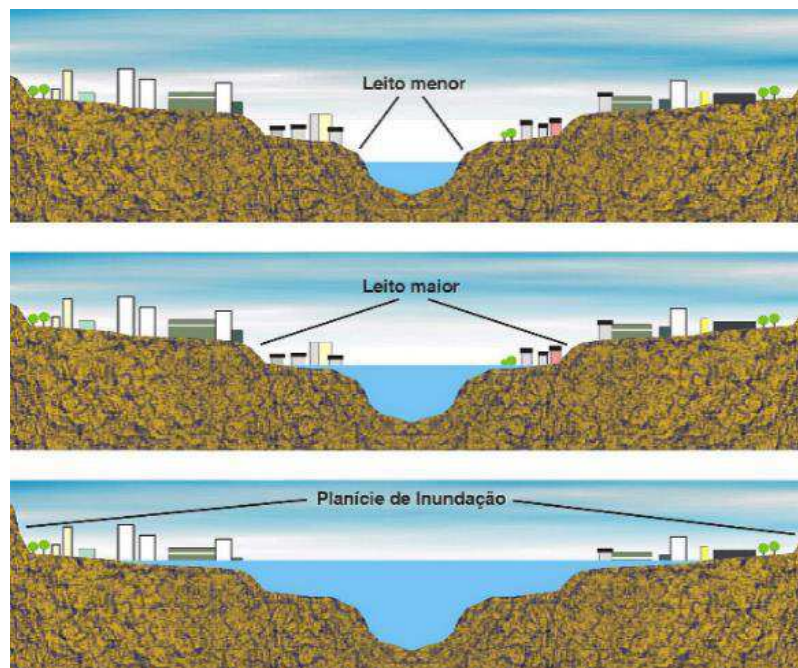
Alguns conceitos são necessários para que o estudo das confluências tenha um melhor embasamento quando se refere às inundações.

De acordo com o glossário da Secretaria Nacional de Defesa Civil SEDEC (CASTRO, 2005), inundação é o “transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, ou acumulação de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas”.

Para Kobiyama et al (2006), a inundação, que é popularmente tratada como enchente, é “o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele”. Quando não ocorre o transbordamento, apesar de o rio ficar praticamente cheio, tem-se uma enchente e não uma inundação (Figura 2.5).

Por seu turno, outros fatores como obstruções ao escoamento, projetos inadequados, confluências, bueiros de aterro, trechos curtos de pontes com pilares no caminho do fluxo também contribuem para as inundações.

Em linhas gerais pode-se dizer que ocorre a enchente ou inundação quando a capacidade de armazenamento, atenuação e infiltração da água na bacia é reduzida, devido ao uso e ocupação do solo (TUCCI, 1998).

**Figura 2.5 – Inundação de um canal lateralmente**

Fonte: Adaptada pelo autor, (CASTRO, 2005).

Diante disso pode-se observar que quando o escoamento está dentro da calha é chamado de leito menor, quando ultrapassa a calha é chamado de leito maior e quando atinge níveis mais elevados significa que a planície de inundação já foi comprometida.

Os principais tipos de enchentes e inundações em áreas urbanas têm suas causas em fatores específicos como impermeabilizações do solo aumentando o escoamento, ocupação das margens fazendo com que o rio extravase do seu leito menor ocupando a várzea que é o leito maior (CANHOLI, 2005).

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

A elaboração desta etapa consiste essencialmente na análise da revisão bibliográfica, demonstração da Técnica dos Canais Paralelos (TCP) e do desenvolvimento dos cálculos pelo *Standard Step Method* (STM). Primeiramente foi explicado como é feito o desenvolvimento da equação governante para o escoamento permanente variado, em seguida criou-se uma sequência de passos para o STM a ser executado. Segundamente, foi representada a Técnica dos Canais Paralelos com figuras e plataformas, além de uma explanação da estimativa de inundações laterais dos canais propostos. Por fim, é apresentado um diagrama de blocos com a implementação resumida do método computacional utilizado.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO

A Técnica dos Canais Paralelos (TCP) requer certos cuidados e testes prévios com o intuito de garantir a eficiência dos cálculos. A técnica foi aplicada desenvolvendo um caso teste, foram isolados os canais objetivando-se a discretização dos mesmos e uma melhor caracterização dos canais.

Como se trata de uma técnica em fase inicial, os códigos precisam ser testados quanto a sua conduta em operação matemática. Então, por intermédio das ferramentas do Excel é que foi utilizado o *Standard Step Method* (STM) para realizar as iterações que determinaram os níveis e as vazões em cada seção analisada e na sequência foi avaliado o comportamento gráfico dessas variações diagnosticando possíveis discordâncias do que se espera na região da confluência.

Assim que foi verificada a aplicabilidade, implementou-se a TCP em dois casos práticos de junção de canais, sendo estas, situações reais de canais naturais. A primeira envolve um ambiente dentro do perímetro urbano onde um rio principal recebe um afluente, e a outra situação se refere a uma bacia hidrográfica perto da região urbana.

### 3.2 EQUAÇÃO GOVERNANTE DO ESCOAMENTO PERMANENTE E VARIADO

A equação governante representa a carga disponível em uma seção analisada e pode-se ser desenvolvida da seguinte forma.

$$H = z + h + \frac{V^2}{2g} = \left( z + h + \frac{Q^2}{A^2 \cdot 2g} \right), \text{ Sendo } A = A_m \quad (3.1)$$

Derivando em relação a x (distancia longitudinal):

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{Q^2}{2g} \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Mas, } \frac{dH}{dx} = -S_f ; \quad e \quad \frac{dz}{dx} = -S_0 \quad (3.3)$$

$$S_0 - S_f = \frac{dh}{dx} + \frac{Q^2}{2g} \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) \quad (\text{I}) \quad (3.4)$$

$$F(A, x) = F(A, A(x)) = F(A, (x))$$

$$\frac{d}{dx} \cdot \int \left( \frac{1}{A^2} \right) = \frac{dF}{dx} = \frac{dF}{dA} \cdot \frac{dA}{dx} = \frac{d}{dA} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) \cdot \left( \frac{dA}{dx} \right) \quad (\text{II}) \quad (3.5)$$

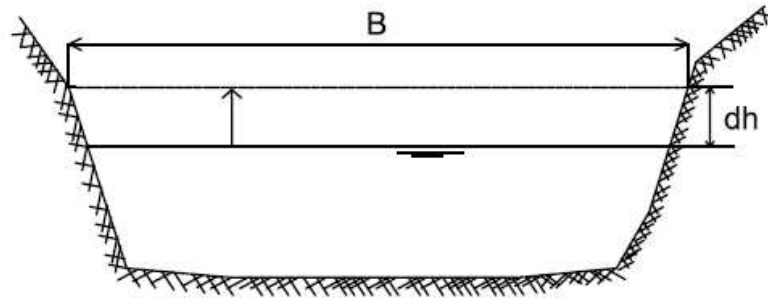
(Regra da cadeia)

$$A = A(h) = A(h(x))$$

$$\frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dh} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.6)$$

Em (II):

$$\frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) = \frac{d}{dA} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) \cdot \frac{dA}{dh} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.7)$$

**Figura 3.1 – Representação do aumento de vazão na calha**

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$dA = B \cdot dh \quad \longrightarrow \quad \boxed{\frac{dA}{dh}} = B \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{1}{A^2} \right) = \frac{dA^{-2}}{dA} \cdot B \cdot \frac{dh}{dx} = -2 \cdot A^{-3} \cdot B \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.9)$$

Voltando a (I):

$$S_0 - S_f = \frac{dh}{dx} + \frac{Q^2}{2g} \cdot \left( \frac{-2 \cdot B}{A^3} \cdot \frac{dh}{dx} \right) \quad (3.10)$$

$$S_0 - S_f = \frac{dh}{dx} \cdot \left[ 1 + \frac{Q^2}{2g} \cdot \left( \frac{-2 \cdot B}{A^3} \right) \right] \quad (3.11)$$

Enfim, a fórmula que calcula a variação da profundidade pela distância.

$$\boxed{\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{\left[ 1 - \frac{B \cdot Q^2}{g \cdot A^3} \right]}} \quad (3.12)$$

Sendo as variáveis: A- área da seção (m<sup>2</sup>); B- base da seção (m); dh - variação de altura (m); dx - variação de distância (m); Q- vazão (m<sup>3</sup>/s); S<sub>0</sub> - declividade inicial (m/m); S<sub>f</sub> declividade final (m/m); g- gravidade (m/s<sup>2</sup>).

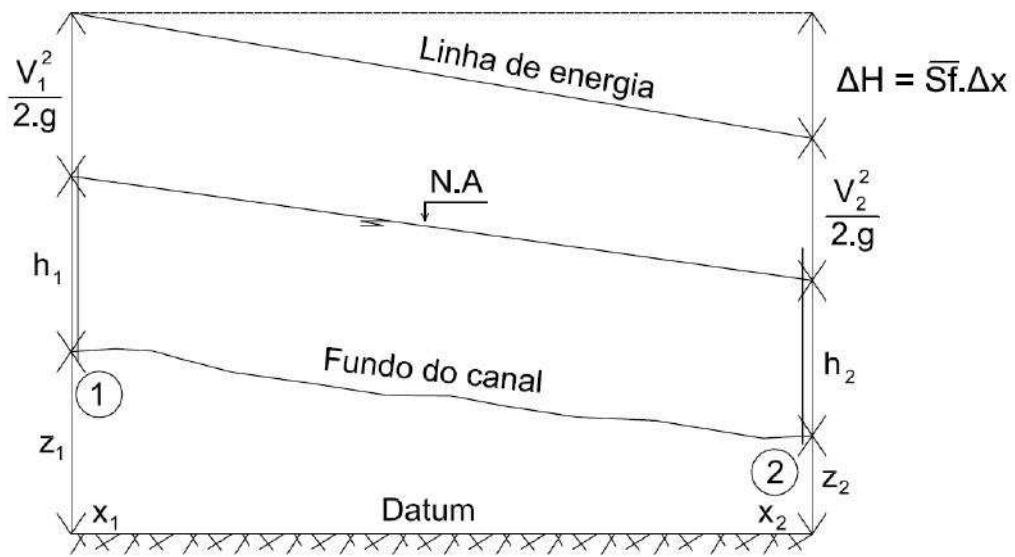


### 3.3 ESQUEMA NUMÉRICO STANDARD STEP METHOD

O *Standard Step Method* (STM) é uma técnica computacional utilizada para estimar a superfície da água em canais e rios em uma dimensão (1D). Basicamente calcula a profundidade (h) para uma determinada posição (x) específica (SOUSA, 2010).

A equação de energia usada para determinar o escoamento permanente se baseia em uma partícula de água em um escoamento com peso específico  $\gamma$ , massa específica  $\rho$ , massa  $m$  que se encontra a uma cota  $z$  em relação a um Datum, submetida a um campo gravitacional, levando-se em conta a energia cinética e a potencial de posição e de pressão. A Figura 3.2 apresenta esse modelo da seguinte forma.

**Figura 3.2 – Representação da equação da linha de energia**



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$H_1 = H_2 + \Delta H \rightarrow H_2 = H_1 + (S_{f1} + S_{f2}) \cdot \frac{(x_2 - x_1)}{2} \quad (3.13)$$

$$z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{A_2^2 \cdot 2g} = H_1 - \frac{S_{f1}}{2} \cdot (x_2 - x_1) - \frac{S_{f2}}{2} \cdot (x_2 - x_1) \quad (3.14)$$

$$z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{A_2^2 \cdot 2g} - H_1 + \frac{S_{f1}}{2} \cdot (x_2 - x_1) + \frac{S_{f2}}{2} \cdot (x_2 - x_1) = 0 = F(h_2) \quad (3.15)$$

$F(h_2) = 0$  é a equação a ser resolvida  $\longrightarrow$  para  $h_2$   
de  $h_1$  conhecido, passo de cálculo  $\longrightarrow$  calcular  $h_2$

Onde,

$A$  – área da seção ( $m^2$ )

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$h_1, h_2$  – profundidade da água na seção ( $m$ )

$Q$  – vazão ( $m^3/s$ )

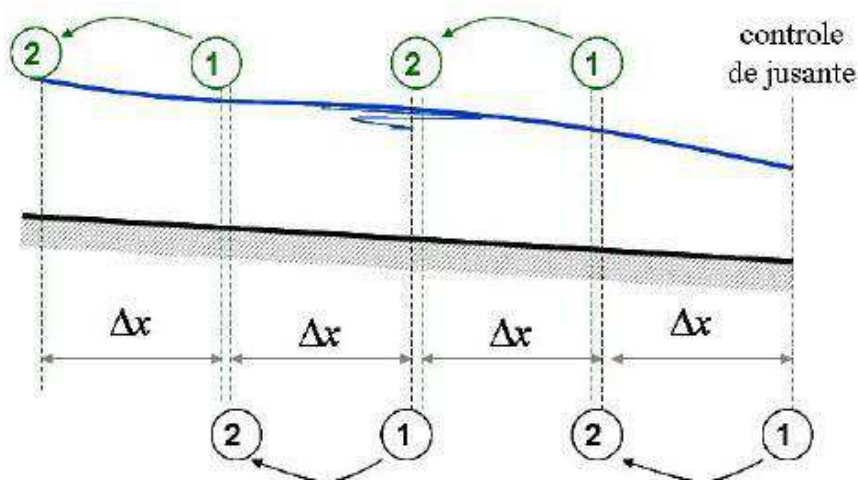
$V_1, V_2$  – velocidades médias da seção ( $m/s$ )

$S_{f1}, S_{f2}$  – declividade das seções ( $m/m$ )

$z_1, z_2$  – cota de fundo do canal com referência no Datum ( $m$ )

Este procedimento iterativo do STM estabelece incrementos ( $\Delta x$ ), calculando a profundidade do escoamento em seções consecutivas espaçadas desse valor (REZENDE, 2012). Considerando o escoamento fluvial (subcrítico) nos canais, o sentido de cálculo é realizado de jusante para montante, conforme ilustra a Figura 3.3. No procedimento iterativo para escoamento fluvial subcrítico, após calculada, cada seção de montante (2) passa a ser a seção de jusante (1) para o próximo passo. Dessa forma, a linha d'água é delineada ao longo de toda extensão do canal. A profundidade de controle à jusante ( $h_{jus}$ ) é determinada como contorno nessa região inicial de cálculo.

**Figura 3.3 – Passos STM com varreduras das seções**



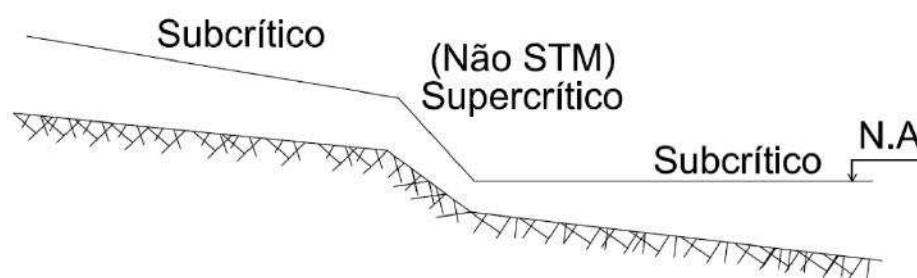
Fonte: REZENDE, 2012.

Em suma, o *Standard Step Method* parte de variáveis conhecidas na seção (1) para calcular a profundidade na seção (2). O esquema dos passos pode ser resumido de acordo com os procedimentos encontrados em Chaudhry (2008) e geralmente são conhecidas as vazões ( $Q$ ) e tem-se a profundidade ( $h$ ) à jusante como condição de contorno.

Quando os valores de jusante interferem à montante tem-se o regime subcrítico, e em contrapartida quando os valores a montante interferem a jusante tem-se o regime supercrítico.

A saber, no STM usa-se o regime subcrítico na maioria do canal, mas quando houver declividade acentuada e o regime for supercrítico (não usa STM) iguala-se o número de Froude à unidade ( $Fr=1$ ). Dessa forma, foi determinada que a profundidade ( $h$ ) fosse igual a profundidade crítica ( $h_{crítico}$ ) nessa região.

**Figura 3.4 – Perfil do regime de escoamento pelo canal**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir a sequência de passos baseado em Souza (2010) a serem seguidos para o cálculo do STM:

**PASSO 1:** calcular a carga de energia potencial do escoamento na seção 1:

$$H_1 = z_1 + h_1 + \frac{Q^2}{A_{m1}^2 \cdot 2g} \quad (3.16)$$

Sendo que  $A_{m1} = F(h_1)$

**PASSO 2:** estimativa da primeira profundidade na seção 2:

$$\hat{h}_2 = h_1 + f(x_1, h_1) \cdot (x_2 - x_1) \quad (3.17)$$

Sendo que:

$$f(x_1, h_1) = \frac{(S_{01} - S_{f1})}{\left[1 - \frac{B_1 \cdot Q^2}{(g \cdot A_{m1}^3)}\right]} \quad (3.18)$$

**PASSO 3:** com a estimativa de profundidade  $\hat{h}_2$ , calcular:  $\hat{B}_2, \hat{A}_{m2}, \hat{P}_{m2}, \hat{R}_{m2}, \hat{S}_{f2}$  e  $z_2$ .

**PASSO 4:** calcular  $F(h_2)$ , utilizando os valores de:  $\hat{h}_2, \hat{A}_{m2}, \hat{P}_{m2}, \hat{R}_{m2}$  e  $\hat{S}_{f2}$ .

$$F(h_2) = \hat{h}_2 + \frac{Q^2}{\hat{A}_{m1}^2 \cdot 2g} + \frac{1}{2} \cdot \hat{S}_{f2} \cdot (x_2 - x_1) + z_2 - H_1 + \frac{1}{2} \cdot S_{f1} \cdot (x_2 - x_1) \quad (3.19)$$

$$\text{Sendo } \hat{S}_{f1} \text{ e } S_{f1} \text{ encontrados pela fórmula } \frac{n \cdot Q}{\sqrt{S_f}} = A_m \cdot R h^{\frac{2}{3}} \quad (3.20)$$

**PASSO 5:** utilizando do método de Newton-Raphson para solução da equação  $F(h_2) = 0$ . Por este método, deve-se calcular a derivada  $\frac{dF}{dh_2}$ , usando os valores já estimados de  $\hat{h}_2, \hat{A}_{m2}, \hat{P}_{m2}, \hat{R}_{m2}$  e  $\hat{S}_{f2}$ .

$$\frac{dF}{dh_2} = 1 - \frac{Q^2 \cdot \hat{B}_2}{g \cdot \hat{A}_{m2}^3} - (x_2 - x_1) \cdot \left( \hat{S}_{f2} \cdot \frac{\hat{B}_2}{\hat{A}_{m2}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\hat{S}_{f2}}{\hat{R}_{h2}} \cdot \frac{dR_{h2}}{dh_2} \right) \quad (3.21)$$

$$\text{Sendo } \frac{dR_{h2}}{dh_2} = \frac{\hat{B}_2}{\hat{P}_{m2}} - \frac{\hat{A}_{m2}}{\hat{P}_{m2}^2} \cdot \frac{dP_m}{dh_2} \quad (3.22)$$

Considerar:

$$\frac{dR_{h2}}{dh_2} \begin{cases} 2 & \text{(canal retangular)} \\ 2 \cdot \sqrt{1 + S^2} & \text{(canal trapezoidal) , para S como declividade dos taludes (S=H/V)} \end{cases}$$

**PASSO 6:** aplicação da fórmula de Newton-Rapson para estimativa da profundidade ajustada:

$$h_2 = \hat{h}_2 - \frac{F(\hat{h}_2)}{\left(\frac{dF}{d\hat{h}_2}\right)} \quad (3.23)$$

**PASSO 7:** comparação dos valores calculados nas duas últimas iterações.

- ✓ Se  $|h_2 - \hat{h}_2| \leq \text{tolerância}$ , então:  $h_2$  é a profundidade final calculada.
- ✓ Caso não, fazer  $\hat{h}_2 = h_2$  e repetir os passo de (3) a (7).

A *tolerância* é um valor pequeno, de forma que a diferença  $|h_2 - \hat{h}_2|$  não seja muito significativa. Em se tratando de diferença entre profundidades, a adoção de uma *tolerância* de  $10^{-3}$  m, equivalente a 1mm, é mais do que suficiente.

De acordo com Chaudhry (2008) A vantagem do *Standard Step Method* é a de permitir o cálculo da posição superfície livre em canais com mudanças de declividade e de largura ao longo do comprimento. Essa circunstância é bastante útil devido a formação ao longo do curso natural dos rios, geralmente com seções bem irregulares.

### 3.4 ESTUDO DA TÉCNICA DOS CANAIS PARALELOS

A Técnica dos Canais Paralelos (TCP) foi desenvolvida neste trabalho criada com o intuito de simular variação dos níveis da água na confluência de canais em escoamentos permanentes variados. Esta técnica original se baseia em adicionar a vazão de um canal B em um canal A isoladamente, fazendo o mesmo para o canal B, ou seja, inserir a vazão do canal A no canal B de maneira independente.

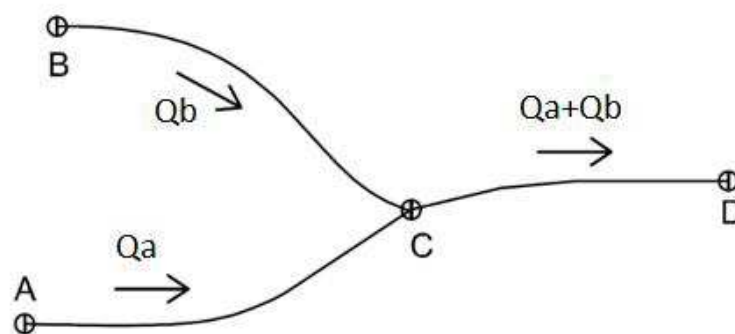
Diante disso, é como se existissem dois canais isolados, e que depois será atribuído um ponto em comum de encontro a esses canais, chamado de confluência, sendo este o ponto onde acontece o aumento de volume resultante. Depois por meio do método de iterações *Standard Step Method* (STD) faz-se os cálculos para determinação da profundidade nas seções.

Assim, também é necessário saber que em um sistema com  $n$  confluências por definição será gerado  $n+1$  simulações de canais independentes. A exemplo, se o canal possuir 4 confluências serão necessárias 5 simulações para usar a técnica.

Segue um esquema analítico para melhor entendimento:

A confluência dos canais se posiciona no ponto C onde ocorre o encontro dos canais A e B conforme a Figura 3.5.

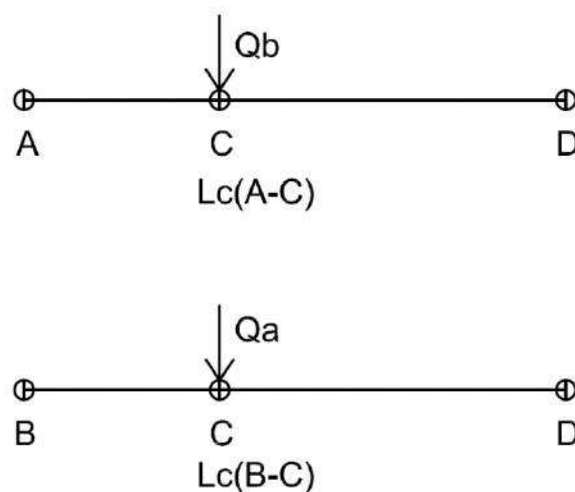
**Figura 3.5 – Confluência para dois canais A e B**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada canal é representado independentemente do outro, com a adição da vazão de entrada do canal adjacente acompanhando cada trecho analisado (Figura 3.6).

**Figura 3.6 – Representação de dois canais isolados**

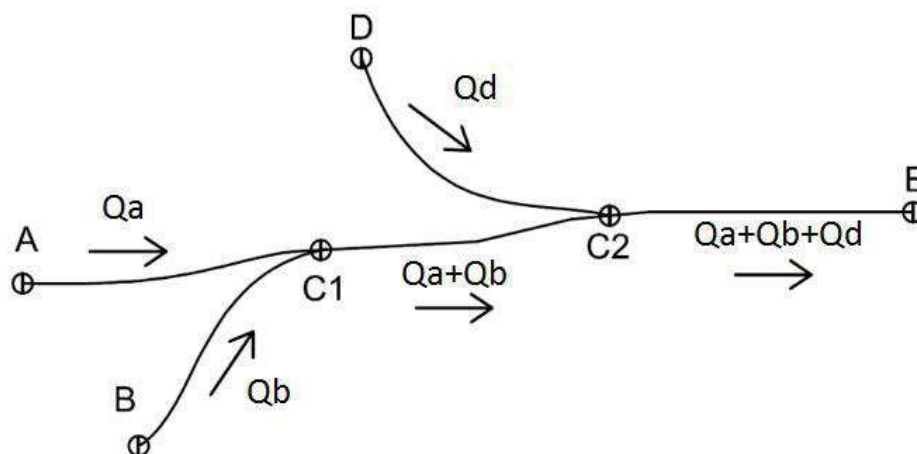


Fonte: Elaborada pelo autor.

A mesma Técnica de Canais Paralelos, como dito anteriormente, pode ser aplicada para um canal com um número maior de confluências (Figura 3.7).

Para isso construir um número maior de canais isolados respeitando a proporcionalidade, na qual, para  $n$  canais serão necessárias  $n+1$  simulações.

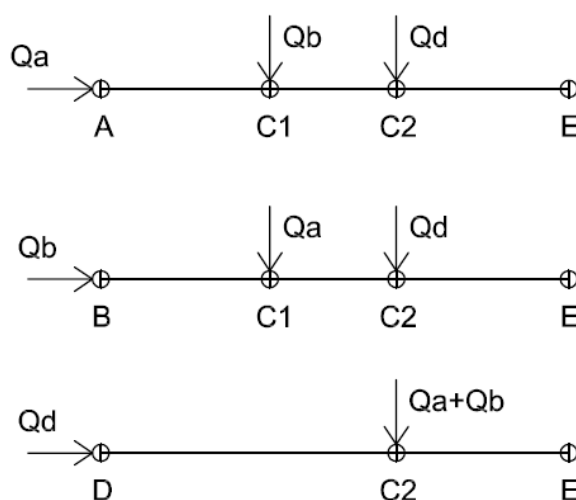
**Figura 3.7 – Confluência múltiplas em um canal principal**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com efeito, pode-se perceber um aumento no número de canais isolados resultando em um estudo mais detalhado como mostra a Figura 3.8.

**Figura 3.8 – Representação para múltiplos canais isolados**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma característica importante da Técnica de Canais Paralelos (TCP) é a de não precisar necessariamente que os pontos de injeção lateral estejam em trechos diferentes do canal principal, como é comum na configuração dos rios. É possível que em um mesmo ponto do canal principal possa existir mais de uma vazão lateral entrando ao mesmo tempo, essa situação é muito comum no caso de galerias que depositam suas vazões em um rio.

### 3.5 PREPARAÇÃO DOS CANAIS

A etapa de preparação consiste no detalhamento das coordenadas dos canais, na filtragem das cotas altimétricas e no ajuste das seções que serão iguais para os canais depois da confluência. A seguir pode-se analisar cada etapa.

- a) **Tabelar os pontos coordenados dos canais em confluência**- As coordenadas devem estar relacionadas em planilha, tanto do canal A como do canal B e do modelo numérico de terreno proposto para serem usadas nas planilhas posteriormente.
- b) **Filtragem dos pontos de cada canal com o programa MTDHC** – O MTDHC é um programa em VBA utilizado para suavização das cotas ( $Z_{\text{suavizado}}$ ) dos canais e melhor adequação ao terreno, isso se deve ao mapeamento que geralmente possui uma quantidade de números de coordenadas reduzidas dos canais coletadas em campo.
- c) **Fazer o ajuste dos canais A e B** - Essa etapa consiste em tabelar as coordenadas ( $X;Y;Z_{\text{suavizado}}$ ) dos canais que estarão dispostos lado a lado para poder gerar um gráfico desses pontos e assim determinar o melhor ponto de encontro para a confluência.

Depois disso, os canais estão prontos para serem empregados no programa FLOODZ.

### 3.6 PROGRAMA FLOODZ

O programa FLOODZ é um consolidado de ações que se baseia nos códigos computacionais em VBA e planilhas em Excel de cálculo visando fornecer informações e mapear a região de previsão de inundação. A partir desse ponto, segue uma sequência de procedimentos com o intuito de chegar ao cálculo dos níveis da água juntamente com outras características como as da velocidade, vazão, tensão de cisalhamento e outras.



Partindo dessa situação, segue uma série de ações a serem realizadas no FLOODZ:

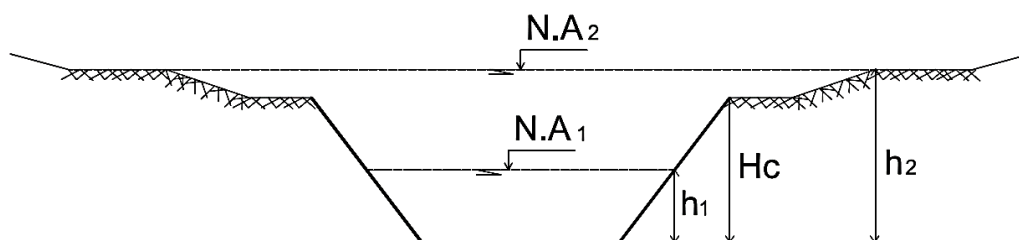
- ✚ **Calcular o comprimento de cada canal-** O programa FLOODZ possui um código de cálculo em uma de suas etapas que calcula o comprimento total de cada canal partindo de dados amostrais. Como dado de saída esse programa de comprimento também gera as declividades nos pontos analisados.
- ✚ **Determinar os valores de Manning para área lateral de cada canal-** É preciso alimentar a planilha do programa FLOODZ com os coeficientes de Manning para cada canal envolvendo a calha e a área lateral do mesmo, posteriormente o código faz a leitura utilizando-os nos cálculos de inundação.
- ✚ **Inserir as coordenadas do modelo numérico do terreno (MNT)** - A malha de vizinhança também é de extrema importância uma vez que serão dela os pontos coordenados discretizados, formando toda a região em que estão os canais.
- ✚ **Fazer a discretização da região** - A linguagem computacional possui um código que discretiza toda a região tendo como dados de saída: características geométricas de cada canal, coeficientes de Manning (da calha e das laterais), comprimentos, coordenadas e cotas ao longo dos canais.
- ✚ **Determinar as vazões de cada bacia do canal-** Deve ser inserida a vazão de cada canal baseada nas tabelas de contribuição de cada canal que fornece o valor acumulado até aquele ponto da confluência.
- ✚ **Gerar as curvas-chave-** As curvas-chave são tabelas que possuem os valores da área molhada ( $A_m$ ), perímetro molhado ( $P_m$ ) e coeficiente de Manning ( $n$ ) variando conforme a profundidade ( $h$ ). Estas são geradas pelo código curva-chave que também é uma parte do programa FLOODZ.
- ✚ **Rodar o *Standard Step Method* (STM)-** Pelo do esquema numérico *Standard Step Method* (STM) são feitas as iterações partindo das vazões conhecidas usando o valor da profundidade a jusante ( $h_{jus}$ ).

Para o cálculo da profundidade a jusante foi utilizado uma funcionalidade do Excel, "atingir meta", devido a agilidade e iteratividade na determinação dos valores de saída, cálculo esse baseado na equação de Manning que depois de trabalhada ficam algumas variáveis em função de  $h$ . Assim, as variações dos níveis da água vão sendo calculadas e a superfície livre vai sendo delineada.

### 3.7 ESTIMATIVA DE INUNDAÇÕES LATERAIS

A análise da previsão de inundação lateral é feita por meio da comparação da altura do canal com a altura do nível da água em uma sucessão de iterações que o programa em VBA realiza. Isso juntamente com o incremento de distância lateral na medida em que se verifica se o terreno está abaixo da cota da superfície da água ou não.

**Figura 3.9 – Esquema de inundação lateral de um rio**

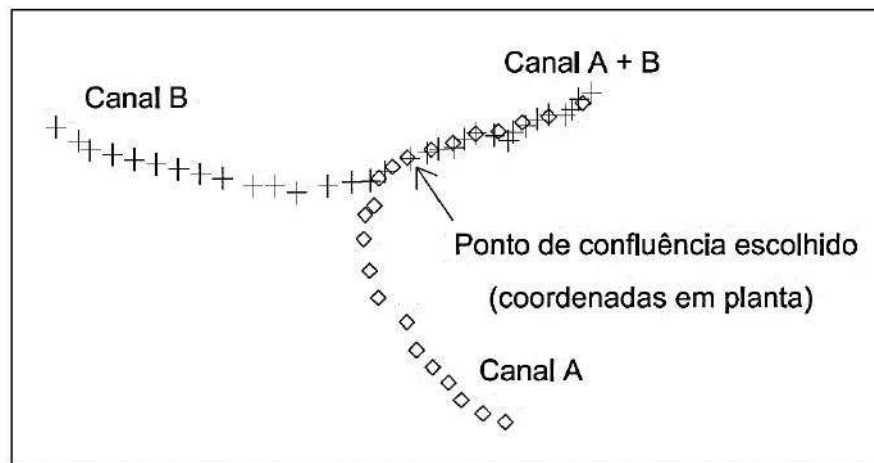


Fonte: Elaborada pelo autor.

O esquema da Figura 3.9 apresenta a condição de transbordamento, tal seja:

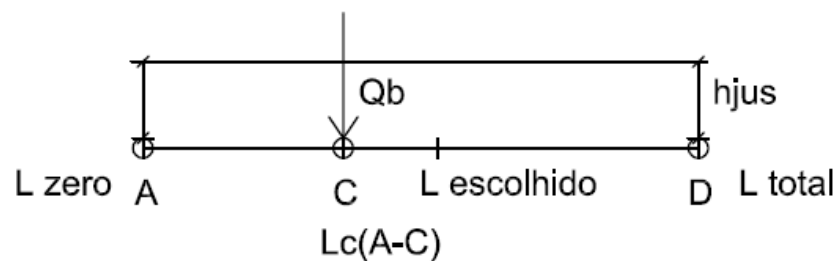
- Para  $h \leq H_c$ , como  $N.A_1 (h_1)$  - o fluxo permanece dentro da calha e não haverá transbordamento.
- Para  $h > H_c$ , como  $N.A_2 (h_2)$  - o fluxo transbordará atingindo a planície de inundação.

Nesse contexto da TCP, primeiramente é preciso fazer o ajuste dos canais em relação ao ponto de encontro da confluência, que por sua vez, devem ser iguais. Isso, em planta, para que o programa interprete a situação como um canal único depois da confluência (Figura 3.10).

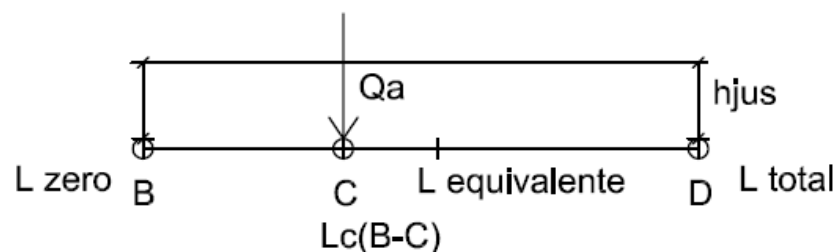
**Figura 3.10 – Representação da confluência em pontos coordenados**

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro cuidado a ser tomado, é que o último ponto do canal A é o último ponto do canal B, isso significa que apesar de possuir o mesmo ponto em planta não afetará o valor do comprimento discretizado de cada canal no cálculo. Cabe agora o ajuste do comprimento para a equiparação do canal afluente após a confluência (Figura 3.11).

**Figura 3.11 – Ajuste dos canais para adequação dos pontos em comum**

$L_{total}$  do canal 1 e  $L_{total}$  do canal 2  
devem coincidir em planta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na ilustração tem-se o desmembramento dos canais mostrando a adição lateral da vazão, o ponto escolhido como base para o trecho coincidente equivalente, os pontos finais dos canais (que deverão ser iguais em planta) e a profundidade a jusante que é a condição de contorno deste modelo.

Para o cálculo desse ajuste foi usado a seguinte fórmula de referência de terreno em comum:

$$L = \text{Ponto de encontro (escolhido da confluência)} \\ - \text{ponto (LA) do canal A} + \text{ponto (LB) do canal B} \quad (3.24)$$

Para a estimativa da inundação lateral foi feito uma sucessão de passos que puderam analisar essa região crítica, a saber:

- Já conhecidas as vazões, na macro (sequência de ações no programa) do Excel o programa STM calcula os valores da profundidade (h) nas seções.
- Com os valores das profundidades é feito um comparativo lateral de incremento ( $d_{lat}$ ).
- Considerando a propriedade do coeficiente angular em relação as retas perpendiculares (dado por,  $m_2 = -1 / m_1$ ) em planta o programa compara a profundidade (h) com a altura da calha ( $H_c$ ).

Diante disso, algumas considerações podem ser feitas:

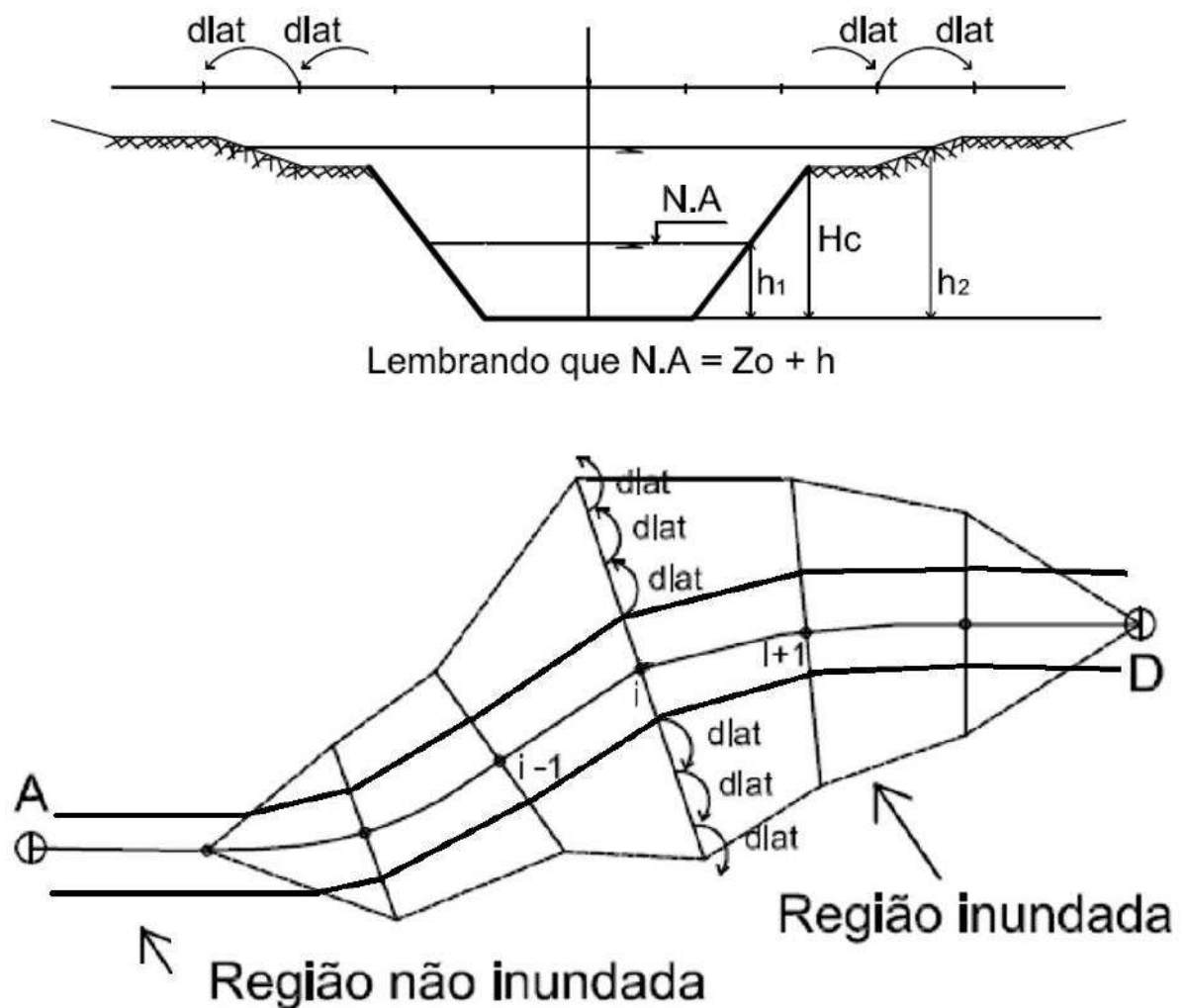
-Enquanto a profundidade (h) for menor que a altura da calha ( $H_c$ ) significa que o fluxo está dentro da calha, compara-se o nível da água com o terreno e se estiver mais alto que a elevação do terreno no ponto analisado o programa avança até superar a altura da calha.

-Caso profundidade (h) for maior que a altura da calha ( $H_c$ ) significa que o fluxo está fora da calha, compara-se o nível da água com o terreno e se estiver mais alto que a elevação do terreno no ponto analisado, então o programa incrementa uma distância lateral ( $d_{lat}$ ).

-Agora, se a profundidade (h) for maior que a altura da calha ( $H_c$ ) com o fluxo fora da calha, compara-se o nível da água com o terreno e se estiver mais baixo que a elevação do terreno no ponto analisado (ou seja, se não possui água no ponto analisado do terreno), então o programa não incrementa a distância lateral ( $d_{lat}$ ).

Então, diante disso o incremento lateral  $dlat$  só é feito quando o escoamento ultrapassa a altura da calha ( $H_c$ ) determinando, assim, a região de inundação. Isso ocorre até que a cota do terreno esteja maior que a cota da superfície livre, onde cessam os incrementos laterais. O esquema da Figura 3.12 mostra essa situação.

**Figura 3.12 – Perfil dlat em corte e em planta de inundação lateral**

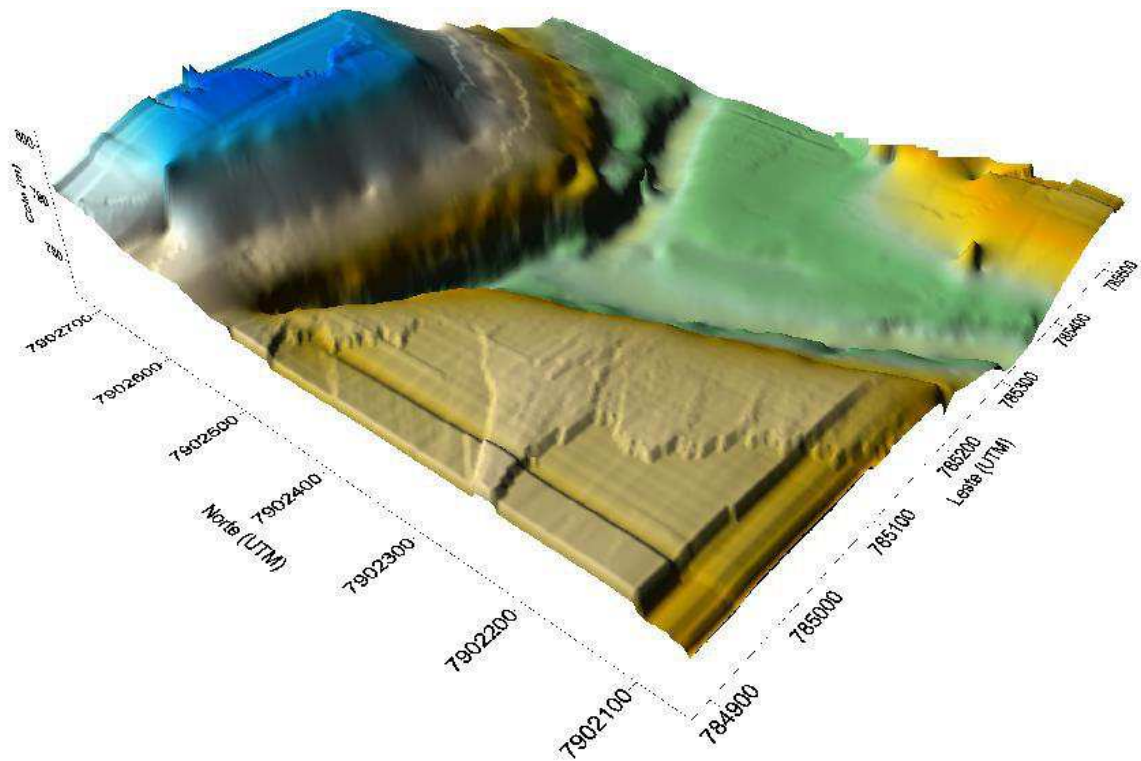


Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando o *Surfer 10* (Programa de visualização de dados) gera-se uma malha de coordenadas com curvas de nível que permitem explorar o terreno em visualização 3D (três dimensões cartesianas), como mostra a Figura 3.13.

A caracterização das áreas de previsão de zonas inundadas deste trabalho utilizando-se coordenadas geográficas em um modelo numérico de terreno (MNT) que possa mostrar melhor como se comportam esses fenômenos.

**Figura 3.13– Exemplo de Modelo Numérico de Terreno (MNT)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

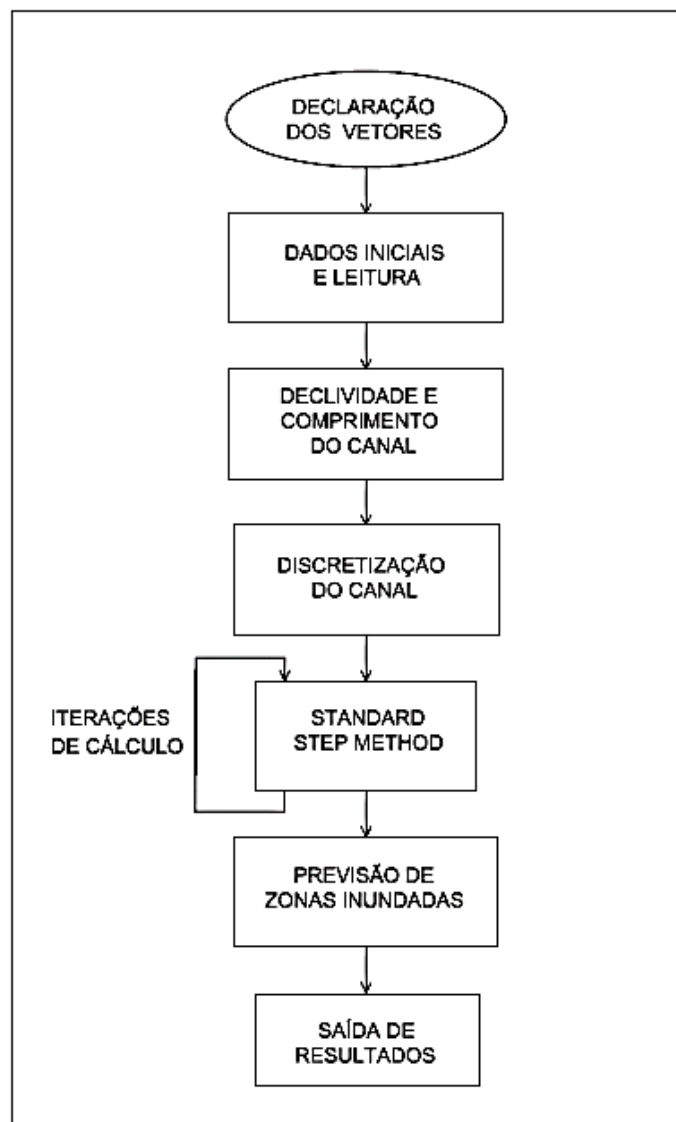
A construção do **Modelo Numérico de Terreno (MNT)** segue o seguinte algoritmo:

- Escolha da região do mapa planimétrico de estudo, feito no AutoCAD 15.
- Delimitam-se as áreas da confluência estudada, feito no AutoCAD 15.
- Importa-se o arquivo delimitado para o *Surfer 10*.
- Digitalizam-se as curvas de nível adjacentes aos canais no *Surfer 10*.
- Exportam-se pontos para o Excel
- Gera-se do MNT no *Surfer 10*.

### 3.8 DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA A IMPLEMENTAÇÃO

O diagrama mostra como é feita a sequência de ações para a execução da linguagem computacional em VBA. Primeiro é feita a declaração dos vetores que representam as variáveis do problema utilizadas no programa, depois realiza-se a leitura dos vetores calculando a declividade e o comprimento do canal trecho a trecho. Continuando o programa discretiza-se todo o canal para que esses dados sejam utilizados pelo STM em cálculos iterativos e após esses resultados encontrados, e por meio dos incrementos das margens laterais do canal são determinadas as áreas de inundação, como mostra na Figura 3.14.

**Figura 3.14 – Diagrama de blocos para confluência**



Fonte: Elaborada pelo autor.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

A elaboração desta etapa consiste essencialmente na análise dos dados e aplicação dos conceitos da Técnica dos Canais Paralelos (TCP) e utilização do *Standard Step Method* (STM). Por sua vez, foi dividida em duas partes: primeiro foi criado um modelo computacional teste em VBA para o cálculo das profundidades do escoamento nas seções analisadas da confluência dos dois canais trapezoidais, que foram verificadas depois pelo *software* HEC-RAS, para depois em um segundo momento usar o programa em duas situações reais de canais confluentes.

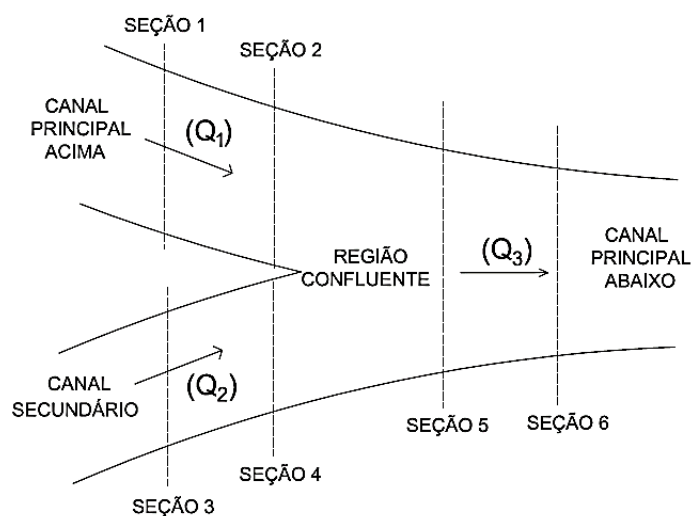
### 4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM CASO TESTE

O caso teste se refere a uma confluência criada experimentalmente para aplicar a Técnica de Canais Paralelos juntamente com o método de cálculo STM e avaliar o comportamento do código computacional.

#### 4.1.1 Modelagem do canal teste

A seguir um esquema que representa uma confluência genérica para dois canais.

**Figura 4.1 – Perfil de um canal genérico confluyente com seções**



Fonte: Elaborada pelo autor.



**Tabela 4.1 – Coordenadas da confluência teste**

CONFLUÊNCIA			
PTO	x(m)	y(m)	z(m) terreno
A	0	500	800
B	499	1000	800
C	500	499	799,5
D	1000	498	799

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.2 – Coordenadas dos canais teste 1 e 2**

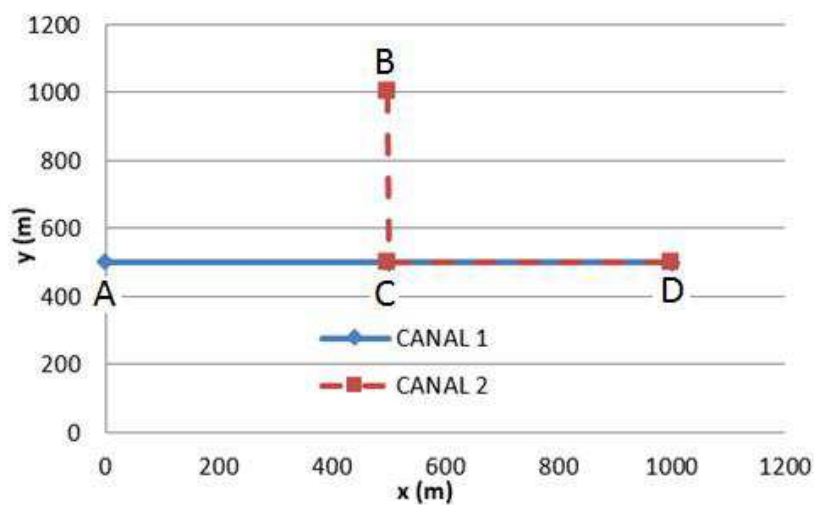
CANAL 1				CANAL 2			
PTO	x (m)	y (m)	z (m) terreno	PTO	x (m)	y (m)	z (m) terreno
A	0	500	800	B	499	1000	800
C	500	499	799,5	C	500	499	799,5
D	1000	498	799	D	1000	498	799

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.2 Esquema geométrico do canal na confluência teste

A representação abaixo mostra a disposição dos canais 1 e 2 em planta.

##### I) Esquema do canal confluyente

**Figura 4.2 – Representação do canal teste com coordenadas**

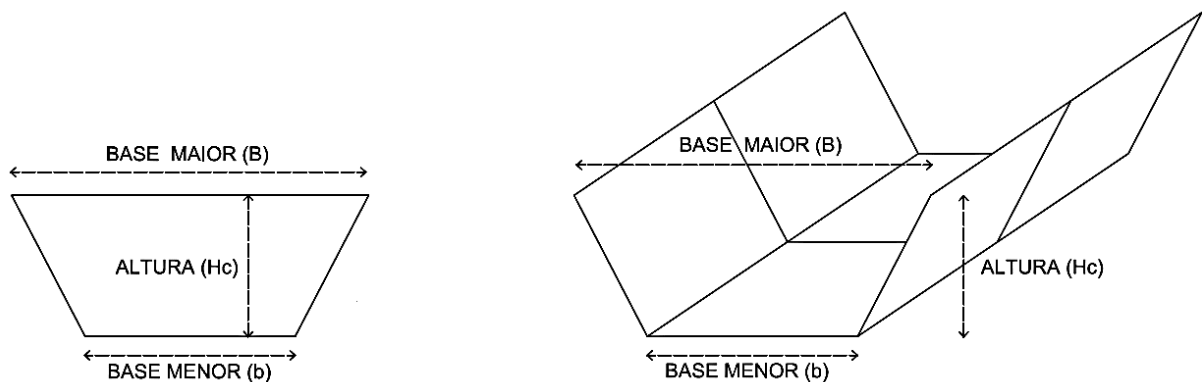
Fonte: Elaborada pelo autor.

## II) Esquema das seções para o canal trapezoidal principal e secundário

O **canal principal** foi determinado como trapezoidal (Figura 4.3) com vazão ( $Q_1$ ) 3  $\text{m}^3/\text{s}$ , base maior ( $B$ ) 5 metros, base menor ( $b$ ) 3 metros, altura da calha ( $H_c$ ) 5 metros, declividade ( $S$ ) igual 0,001 e comprimento ( $L$ ) 1000 metros.

O **canal secundário** foi determinado também como trapezoidal com vazão ( $Q_2$ ) 2  $\text{m}^3/\text{s}$ , base maior ( $B$ ) 1,1 metros, base menor ( $b$ ) 1 metro, altura da calha ( $H_c$ ) 5 metros, declividade ( $S$ ) igual 0,001 e comprimento ( $L$ ) 1000 metros.

**Figura 4.3 – Seções e perfil do canal trapezoidal**

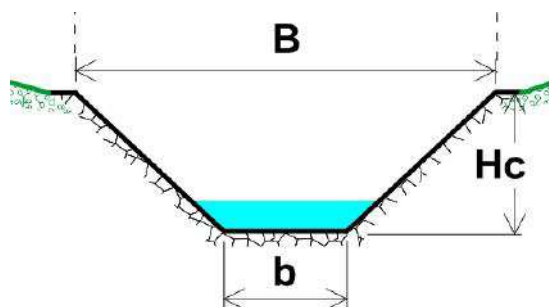


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.1.3 Coeficientes de Manning para o canal

Na Figura 4.4 esta representada a geometria do canal onde serão analisados os coeficientes de Manning.

**Figura 4.4 – Seção do canal com representação esquemática**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.3 – Características geométricas amostrais dos canais 1 e 2**

<b>CANAL 1</b>				
<b>L (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>B (m)</b>	<b>Hc (m)</b>	<b>n<sub>calha</sub></b>
0	3	5	5	0,014
200	3	5	5	0,014
250	3	5	5	0,014
300	3	5	5	0,014
450	3	5	5	0,014
<b>500</b>	3	5	5	0,014
<b>750</b>	3	5	5	0,014
<b>1000,002</b>	3	5	5	0,014

<b>CANAL 2</b>				
<b>L (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>B (m)</b>	<b>Hc (m)</b>	<b>n<sub>calha</sub></b>
0	1	1,1	5	0,014
200	1	1,1	5	0,014
250	1	1,1	5	0,014
300	1	1,1	5	0,014
499	1	1,1	5	0,014
<b>500</b>	3	5	5	0,014
<b>750</b>	3	5	5	0,014
<b>1001,002</b>	3	5	5	0,014

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.4 Condições de contorno para os canais

As condições de contorno se fazem importantes na medida em que é necessário definir o nível da água inicial à montante e à jusante. O programa computacional começa a resolver as equações partindo dessas informações. Existem diferentes situações a serem consideradas quanto ao regime de escoamento, que pode ser caracterizado pelo número de Froude (Fr), sendo o escoamento subcrítico ( $Fr < 1$ ), supercrítico ( $Fr > 1$ ) e crítico ( $Fr = 1$ ).

O contorno utilizado foi o da profundidade inicial a jusante, calculada com base nos dados do canal. São conhecidos: a vazão (Q), base maior (B), base menor (b), declividade inicial ( $S_0$ ), coeficiente de Manning (n) e raio hidráulico (Rh), dados esses que são lidos na planilha inicial do Excel previamente alimentada.

Logo, a profundidade (h) será determinada pela substituição dos valores e calculada pela equação 4.1 de Manning.

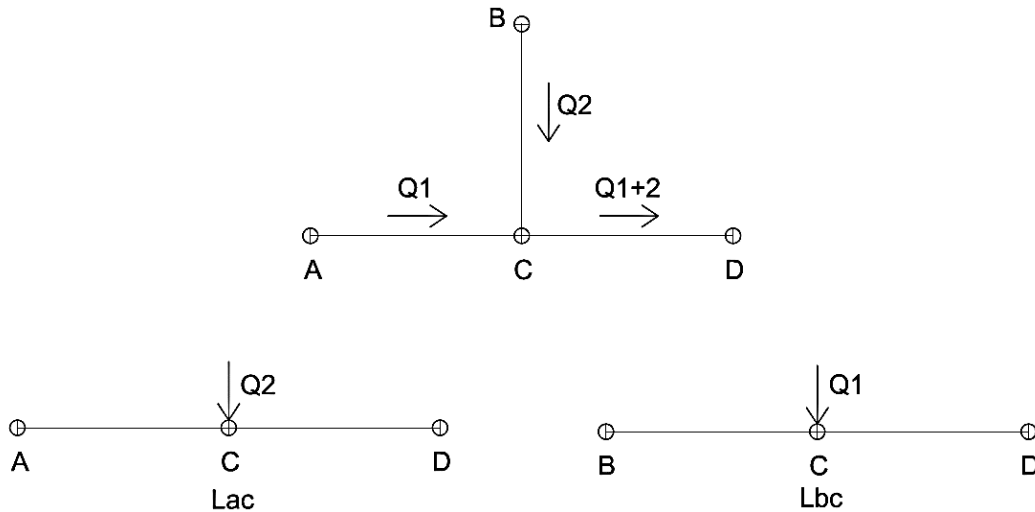
$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{S_0}} = Am \cdot (R_H)^{\frac{2}{3}} \quad , \quad \text{sendo área do trapézio } Am = \frac{(B + b) \cdot h}{2} \quad (4.1)$$

$$\text{Como } Q = V \cdot Am \quad , \quad \text{então tem-se: } V = \frac{Q}{Am} \quad (4.2)$$

#### 4.1.5 Utilização da Técnica de Canais Paralelos

A Técnica dos Canais Paralelos permite simplificar a adição da vazão lateral com a injeção da vazão de um canal no outro e vice-versa. Tratando a confluência como se estivesse dividida em duas partes (Figura 4.5).

**Figura 4.5 – Esquema da Técnica dos Canais Paralelos para o canal teste**



Fonte: Elaborada pelo autor.

No esquema proposto a confluência é o encontro dos canais, representada pelos pontos ABCD. A confluência é visualmente colocada no ponto C e os canais são definidos por um desmembramento em: canal 1 (ACD) e canal 2 (BCD).

Cada canal recebe o ponto de injeção da vazão do seu adjacente, como no modelo teste em que no canal 1 ocorre a entrada de  $Q_2$  e para o canal 2 ocorre a entrada de  $Q_1$ . A confluência por sua vez é a somatória de  $Q_1$  e  $Q_2$  que resulta em uma vazão  $Q_1+2$ .

Essa relação é importante porque o programa trata cada canal independentemente da confluência para depois interpretar os dados conjuntamente. Na malha de discretização do modelo de terreno os canais estarão juntos, mas depois é analisado cada canal com seu ponto de adição de vazão lateral isoladamente.

Dessa maneira, coube trabalhar algumas informações dos canais na seguinte ordem:

- a) As coordenadas foram relacionadas em planilha, tanto do canal 1 como do canal 2 e do modelo numérico de terreno proposto para serem usadas nas planilhas do FLOODZ.
- b) O programa MTDHC foi usado para suavização das cotas ( $Z_{\text{suavizado}}$ ) dos canais e melhor adequação ao terreno.
- c) Tabelou-se as coordenadas ( $X;Y;Z_{\text{suavizado}}$ ) dos canais que estarão dispostos lado a lado para poder gerar um gráfico desses pontos e assim determinar o melhor ponto de encontro para a confluência.

Depois disso, os canais estão prontos para serem empregados no programa FLOODZ.

#### 4.1.6 Aplicação do programa FLOODZ

Partindo dessa situação em que os canais 1 e 2 já foram ajustados e preparados para a alimentação das planilhas de cálculo, segue a aplicação do programa FLOODZ:

- ✚ Utilizando a macro “comprimento” foi calculado o comprimento total de cada canal partindo de dados amostrais. Gerou-se, ainda, as declividades de trecho a trecho de cada canal. Fazendo isso separadamente para o canal 1 e depois para o canal 2.
- ✚ Foi alimentada a planilha do programa FLOODZ com os coeficientes de Manning para cada canal envolvendo a calha e a área lateral do mesmo, posteriormente o código faz a leitura utilizando-os nos cálculos de inundação.

- ✚ Inseriu-se a malha de vizinhança da respectiva região confluyente para que os pontos coordenados fossem discretizados, construindo toda a área regularmente espaçada em que estão os canais.
- ✚ Por meio da macro “discretização” detalhou-se toda a região tendo como dados de saída: características geométricas de cada canal, coeficientes de Manning (da calha e das margens laterais), comprimentos dos canais, coordenadas e cotas dos mesmos. Os canais foram discretizados em um comprimento total de 1000 metros cada, para o canal 1 foram usados 100 nós com um espaçamento de 10,101 m, já para o canal 2 foram usados 100 nós com um espaçamento de 10,111 m.
- ✚ Foi também inserida a vazão de cada canal naquele ponto da confluência. Primeiro foi feita a situação do canal 1 em que recebeu a vazão do canal 2 e depois o foi feito a inserção da vazão do canal 2 no canal 1.
- ✚ Gerou-se as curvas-chave utilizando a macro “curvas-chave” das seguintes variáveis: área molhada ( $A_m$ ), perímetro molhado ( $P_m$ ) e coeficiente de Manning ( $n$ ) variando conforme a profundidade ( $h$ ).
- ✚ Por fim usando a macro “*Standard Step Method*” (STM) foram feitas as iterações partindo das vazões conhecidas usando o valor da profundidade a jusante ( $h_{jus}$ ).

Para o cálculo da profundidade a jusante foi utilizado uma funcionalidade do Excel, “atingir meta”, devido a agilidade e iteratividade na determinação dos valores de saída, cálculo esse baseado na equação de Manning que depois de trabalhada ficam algumas variáveis em função de  $h$ . Dessa maneira, com a vazão total ( $Q$ ) igual  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , base maior ( $B$ ) calculada em função de  $h$ , base menor ( $b$ ) igual a 3 m, declividade inicial ( $S_o$ ) igual 0,001, coeficiente de Manning ( $n$ ) igual a 0,014 e raio hidráulico ( $R_h$ ) em função de  $h$ , calcula-se o valor de  **$h_{jus} = 0,960$**  (profundidade a jusante da última seção depois da confluência).

#### 4.1.7 Gráficos analisados com base na planilha resumo

Nessa seção foram desenvolvidos os gráficos dos perfis da profundidade pelo comprimento ( $h \times L$ ), da tensão cisalhante pelo comprimento ( $T_o \times L$ ) e do nível da água pelo comprimento ( $N.A \times L$ ) que representam bem como os dois canais teste se comportam.

Nota-se que na Figura 4.6 a) no gráfico da relação do nível de água pelo comprimento, o canal 1 segue constante até o ponto de encontro na confluência dos dois canais, onde aumenta sua profundidade rapidamente para depois reduzir um pouco novamente e assim permanecer constante até a profundidade de jusante calculada e imposta para os cálculos iniciais.

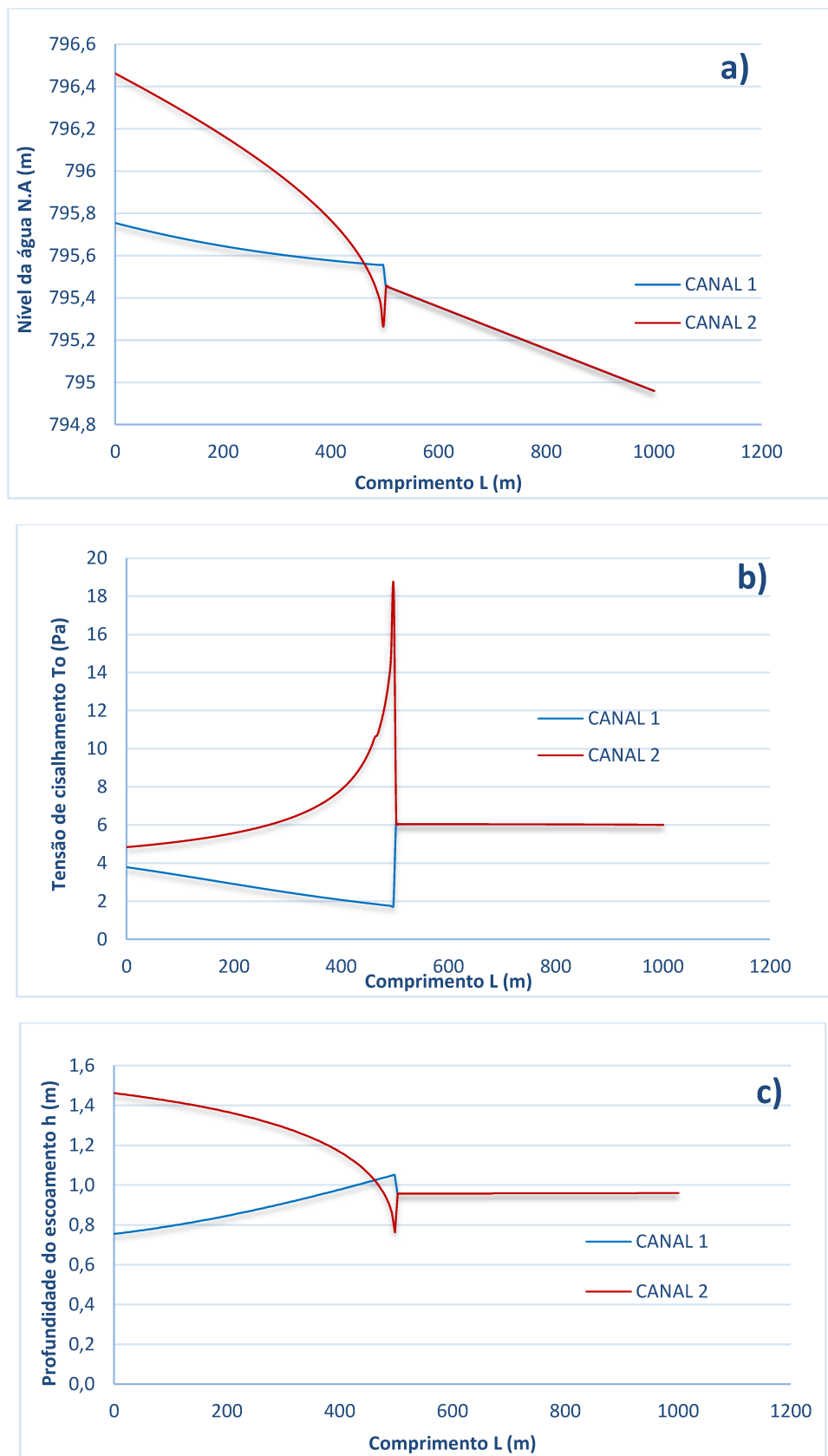
Já no canal 2 no início permanece constante e depois decresce abruptamente até atingir o nível da água depois da confluência e também se manter constante até a profundidade à jusante determinada.

Observando o gráfico da relação da tensão cisalhante pela profundidade também da Figura 4.6 b), é interessante como o canal 1 diminui a tensão cisalhante no ponto de confluência ao passo que o canal 2 eleva-se até um ponto máximo para depois reduzir após a junção dos canais.

No gráfico da relação profundidade do escoamento pelo comprimento, visto na Figura 4.6 c) a cota altimétrica decai para os dois canais devido a declividade e isso proporciona que o canal 1 sofra um aumento de volume na confluência e depois dela se harmonize com o canal 2 na mesma altura.

O canal 2 sofre uma diminuição do nível da água na confluência devido as características da vazão de maior velocidade nessa região que faz com que a água escoe rapidamente diminuído o nível da água nesse local e depois se igual ao canal 1.

Figura 4.6 – Perfis dos canais teste

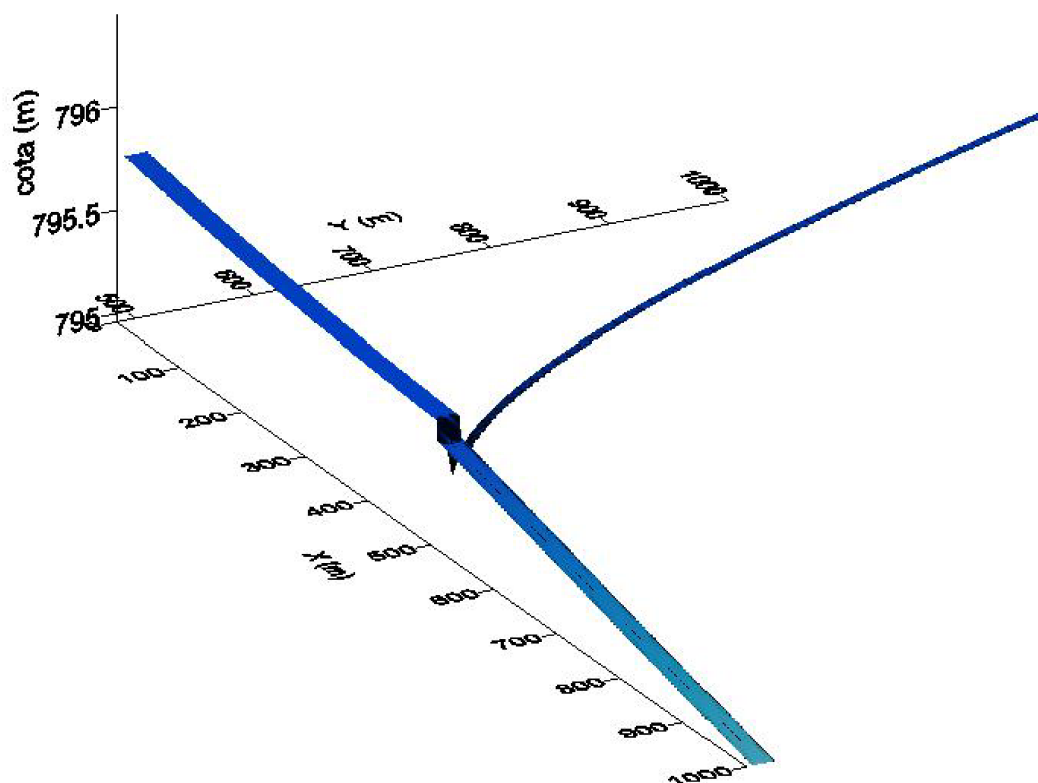
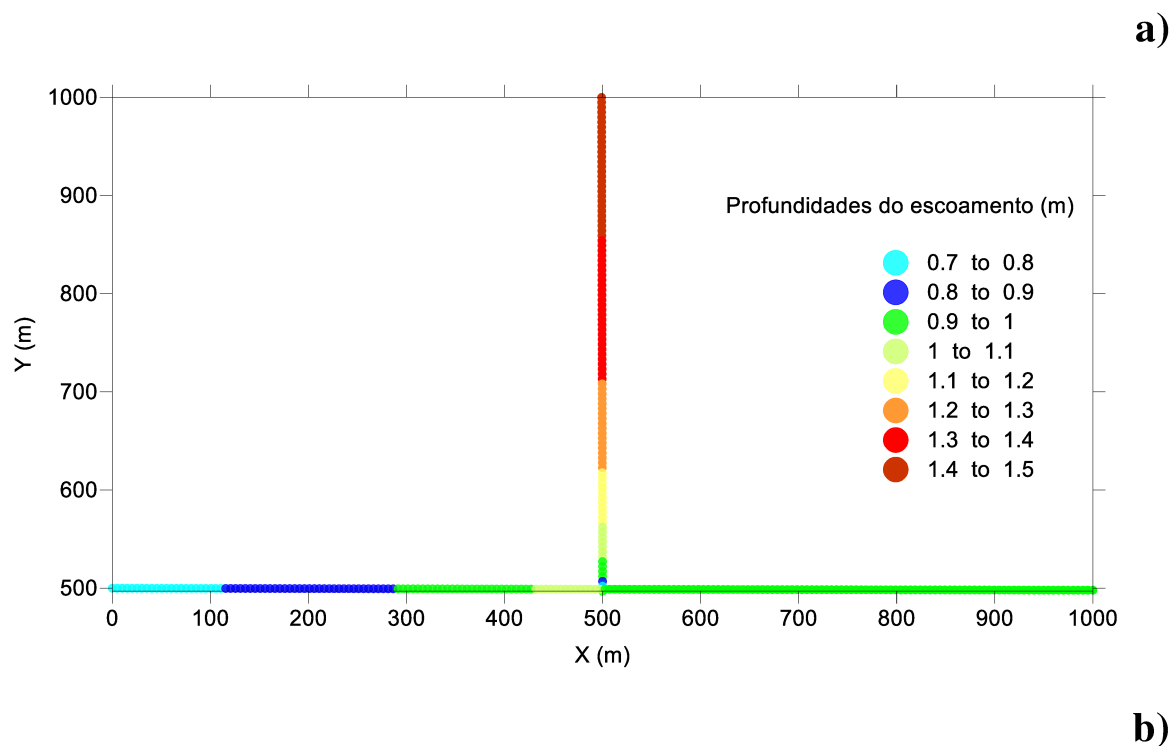


Fonte: Elaborada pelo autor.



A profundidade e o nível da água dos canais 1 e 2 foi exibida de duas maneiras diferentes: a primeira na Figura 4.7 a) que é uma representação em planta e a segunda é construída em 3D (coordenadas x (m), y (m) e a cota altimétrica z) apreciada na Figura 4.7 b).

**Figura 4.7 –Profundidade dos canais em 2D e Superfície livre em 3D**



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.8 Comparação da Técnica de Canais Paralelos com o HEC-RAS

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) foi desenvolvido pelo departamento de defesa, Army Corps of Engineers e basicamente possui uma interface primária de inserção de dados que caracteriza a geometria e os elementos que definem uma região de análise (BRUNNER, 2010). O *software* utilizado é unidimensional e armazena os dados em vários arquivos de forma independente, podendo criar arquivos que podem ser analisados por diferentes combinações de forma a se criar vários planos de análise. A fim de confrontar os dados obtidos pela Técnica de Canais Paralelos é que foi elaborado também um modelo no HEC-RAS com as mesmas informações empregadas para a TCP. Segue na Tabela 4.4 a comparação de resultados encontrados.

**Tabela 4.4 – Comparação do TCP x HEC-RAS**

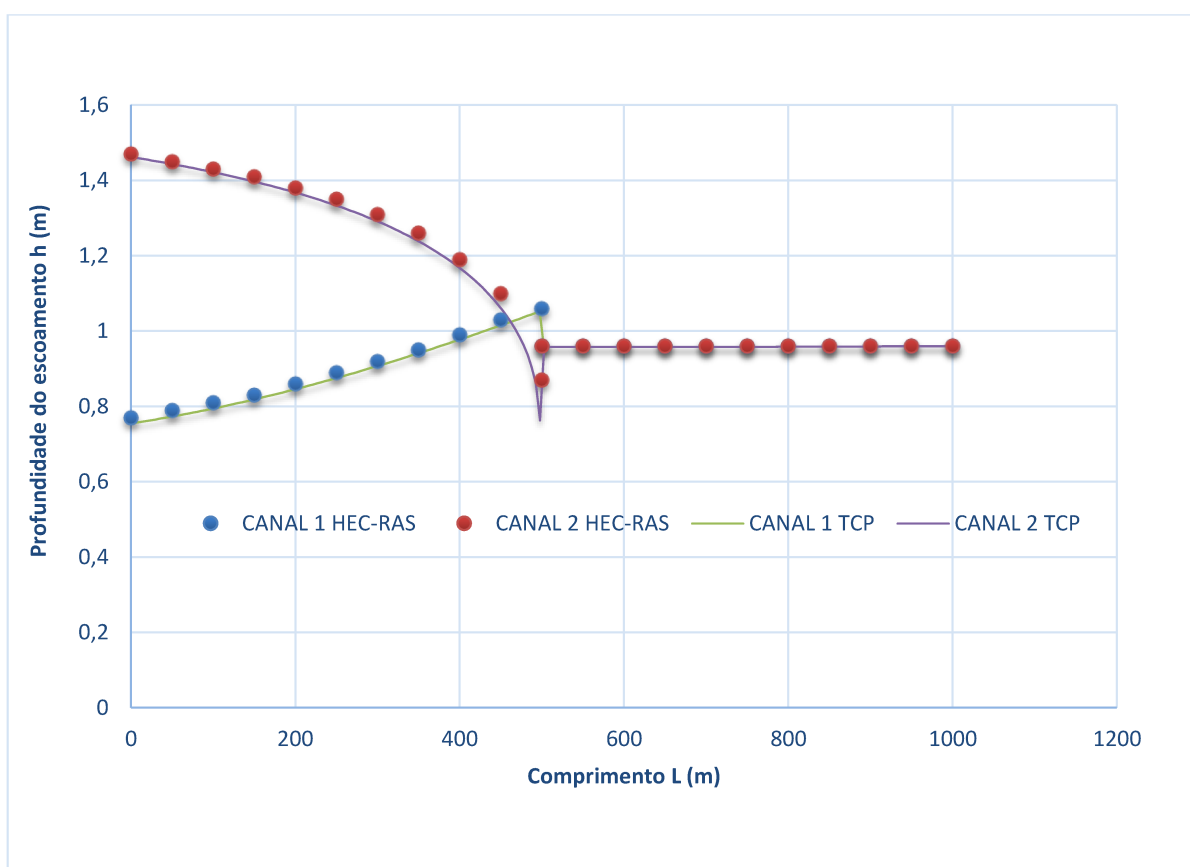
	CANAL 1		
	Profundidade h (m)		
L (m)	TCP	HEC-RAS	ERRO
0	0,755	0,770	0,015
50	0,773	0,790	0,017
100	0,794	0,810	0,016
150	0,819	0,830	0,011
200	0,846	0,860	0,014
250	0,876	0,890	0,014
300	0,908	0,920	0,012
350	0,942	0,950	0,008
400	0,979	0,990	0,011
450	1,017	1,030	0,013
500	0,957	1,060	0,103
500,1	0,957	0,960	0,003
550	0,958	0,960	0,002
600	0,958	0,960	0,002
650	0,958	0,960	0,002
700	0,958	0,960	0,002
750	0,958	0,960	0,002
800	0,958	0,960	0,002
850	0,959	0,960	0,001
900	0,959	0,960	0,001
950	0,959	0,960	0,001
1000	0,960	0,960	0,000

	CANAL 2		
	Profundidade h (m)		
L (m)	TCP	HEC-RAS	ERRO
0	1,462	1,470	0,008
50	1,443	1,450	0,007
100	1,421	1,430	0,009
150	1,396	1,410	0,014
200	1,367	1,380	0,013
250	1,332	1,350	0,018
300	1,289	1,310	0,021
350	1,236	1,260	0,024
400	1,164	1,190	0,026
450	1,054	1,100	0,046
500	0,957	0,870	0,087
500,1	0,957	0,960	0,003
550	0,958	0,960	0,002
600	0,958	0,960	0,002
650	0,958	0,960	0,002
700	0,958	0,960	0,002
750	0,958	0,960	0,002
800	0,958	0,960	0,002
850	0,959	0,960	0,001
900	0,959	0,960	0,001
950	0,959	0,960	0,001
1000	0,960	0,960	0,000

FONTE: Elaborada pelo autor.

O erro obtido é da ordem de  $10^{-3}$ , isso significa a grande maioria das profundidades comparadas foi inferior a 1% de discordância. Para o canal 1 a diferença relativa média geral foi de 0,8122 %, já para o canal 2 a diferença relativa média geral foi de 0,7992 %. Diante disso cabe ressaltar que o comportamento da TCP foi eficiente em comparação com o modelo do HEC-RAS com erro menor que 1% na média geral relativa para os dois canais. Na Figura 4.8 pode-se observar como essas profundidades se sobrepõe nos canais.

**Figura 4.8 – Gráfico de comparação TCP x HEC-RAS**



FONTE: Elaborada pelo autor.

A simulação do HEC-RAS foi feita com as características dos canais usadas na TCP e utilizando a junção dos canais pelo método da energia. Uma vez comprovada a aplicabilidade da Técnica dos Canais Paralelos (TCP) inicia-se a fase do desenvolvimento do modelo para casos práticos encontrados em confluências naturais em campo.

## 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM CASOS PRÁTICOS DE ESTUDO

Para essa etapa foi feita uma análise de duas confluências: A do Rio Uberabinha com Córrego do Óleo e Rio Uberaba com Córrego Lageado. Para a análise foi aplicado a Técnica de Canais Paralelos juntamente com o processo de *Standard Step Method* para determinação dos níveis da superfície da água. Por meio de *softwares* em VBA e planilhas de cálculo foi possível estimar as áreas inundadas e visualizar esses resultados utilizando como ferramenta o programa *Surfer 10*.

### 4.2.1 Confluência do Rio Uberabinha x Córrego do Óleo

O primeiro caso aplicado foi na confluência do Rio Uberabinha com o Córrego do Óleo (Figura 4.9). O córrego do óleo está inserido em um sistema hidrográfico que tem como principal representante o rio Uberabinha. Este rio, afluente da bacia do rio Araguari, nasce ao norte do município de Uberaba, atravessando todo o município de Uberlândia até desembocar no rio Araguari, cumprindo um total de 118 km. Além do córrego aqui estudado, na zona urbana de Uberlândia, o rio Uberabinha tem como afluentes os seguintes córregos: São Pedro, Das tabocas, Jataí, Lagoinha, Salto, Guariba, Moji, Cavalo, Vinhedo e Buritizinho (CARRIJO; BACCARO, 2000).

**Figura 4.9 – Confluência do Rio Uberabinha com Córrego do Óleo (RUxCO)**



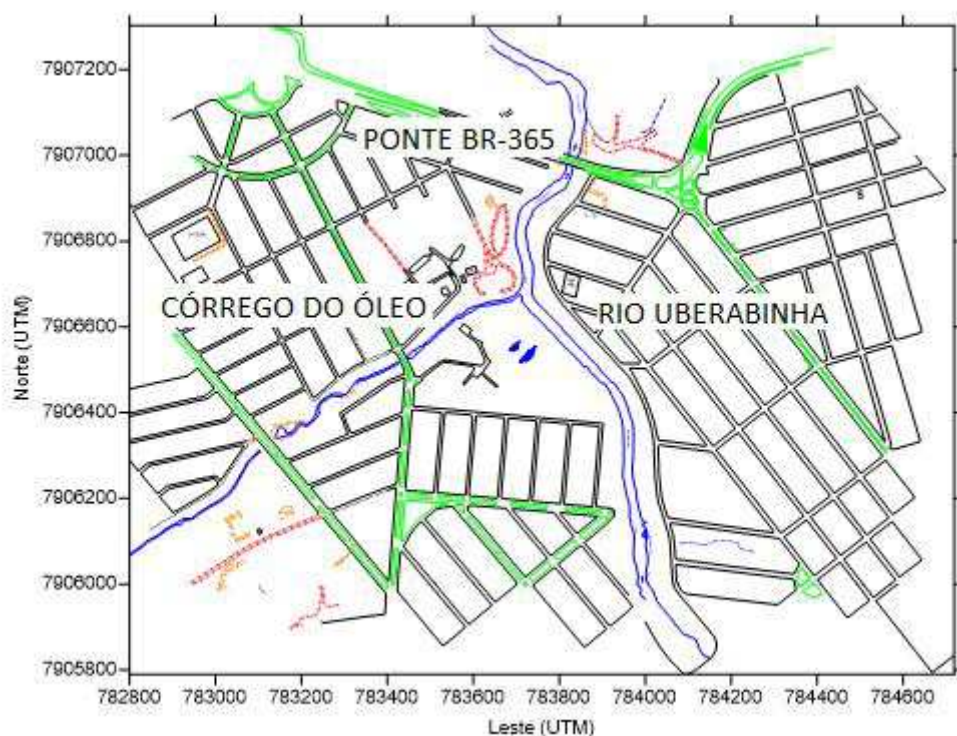
Fonte: Google Earth, 2016

#### 4.2.1.1 Caracterização da região (RU x CO)

Neste item apresenta-se o mapa planimétrico com o Rio Uberabinha (rio maior) passando pela cidade de Uberlândia-MG e recebendo o afluente Córrego do Óleo (córrego menor) formando a confluência que será analisada nas etapas que seguem.

Nota-se que após confluírem, com aumento de volume, vão em direção a uma ponte da BR-365 que representa um ponto de análise por ser onde o rio sofre redução das laterais. Na sequência, são visualizados o mapa planimétrico da confluência, das curvas de nível e os mesmos sobrepostos no mapa da planialtimetria. Todos extraídos do AutoCAD 15 e depois adaptados para melhor apresentação pelo *Surfer 10*. Em primeira análise tem-se a representação planimétrica (Figura 4.10) com a região confluyente e alguns elementos da cidade em torno, dando uma visão ampla do estudo.

**Figura 4.10 – Planimetria da confluência (RUxCO)**

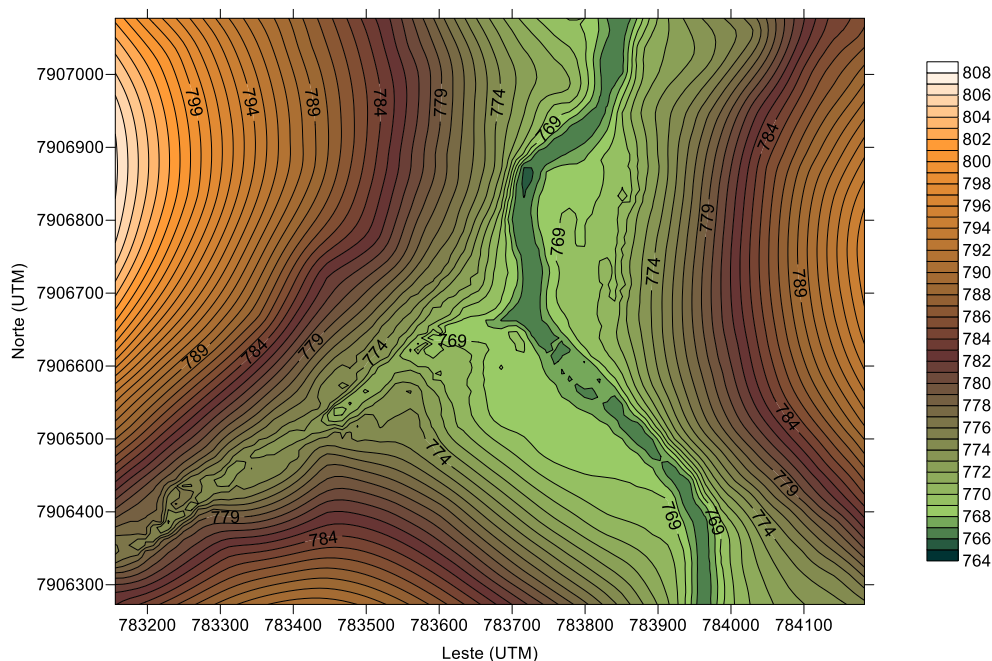


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as curvas de nível cabe ressaltar a utilização do Modelo Numérico de Terreno (MNT), este por sua vez foi feito por meio das coordenadas cartesianas em UTM e das cotas do terreno previamente captadas do AutoCad 15. Com a utilização de comandos que usam os pontos em Excel, extraídos do mapa de origem, o programa *Surfer 10* cria-se uma malha de dados interpolados em X, Y, Z partindo de informações amostrais irregularmente espaçados para gerar uma malha retangular de pontos uniformemente espaçados, dando uma melhor visualização da região de estudo.

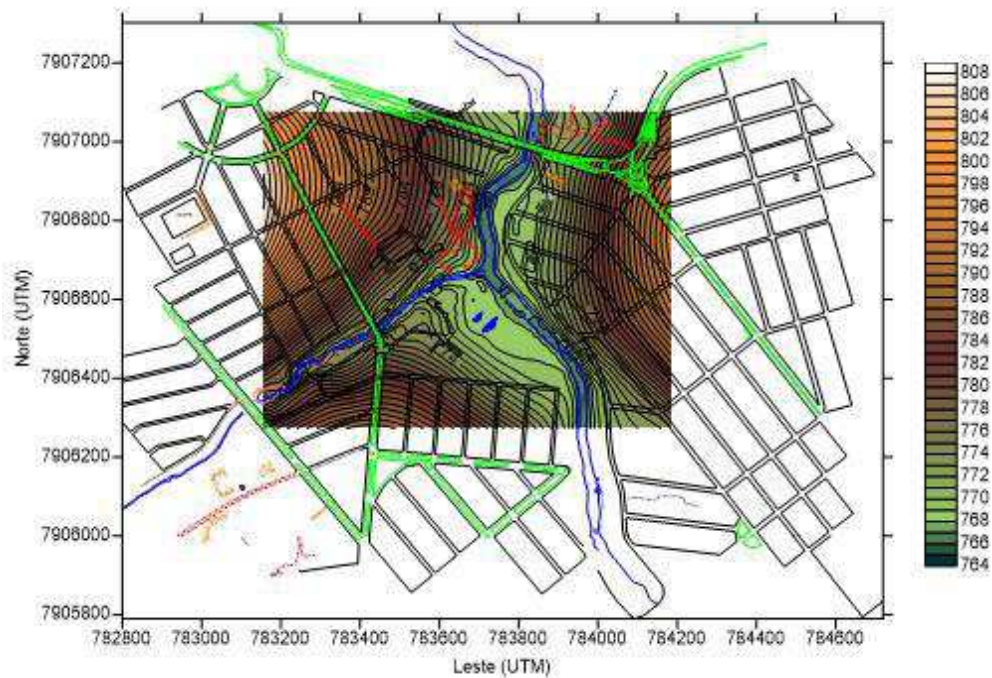
Neste modelo utilizou-se o método de Kriging de interpolação, uma das principais alternativas listadas no programa. Assim, o modelo numérico de terreno foi construído com uma malha de 200 x 200 pontos, delimitados pelas coordenadas das Figuras 4.11 e 4.12, com espaçamentos regulares na direção OESTE-LESTE e na direção NORTE-SUL. Com efeito, cabe salientar que estes espaçamentos determinam o grau de precisão do MNT, pois quanto menores, maior será a precisão de delimitação das áreas inundadas representadas nas imagens ou graficamente.

**Figura 4.11 – Curvas de nível da confluência (m) (RUxCO)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

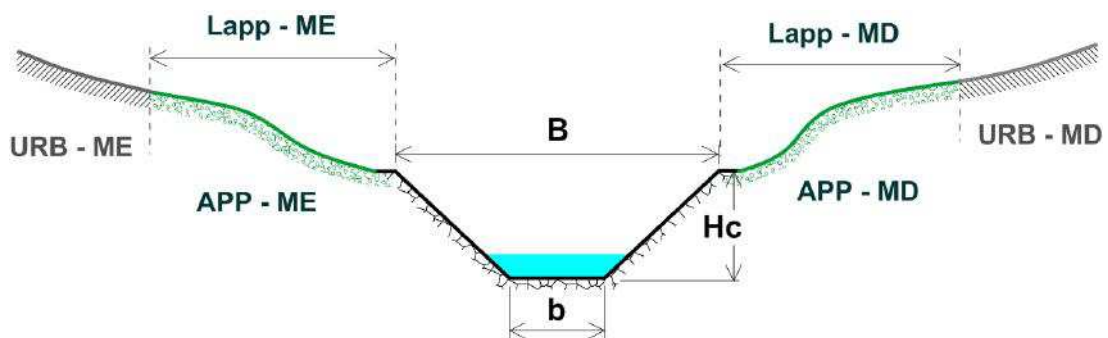


**Figura 4.12 – Planialtimetria da confluência (m) (RUxCO)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.1.2 Análise da zona de previsão de inundação da região (RU x CO)

Para a representação das zonas de inundação tem-se uma série de dados que permitiram os cálculos pelo programa FLOODZ, citado nesse trabalho anteriormente, tais como: a rugosidade (Figura 4.13), as características amostrais geométricas, as vazões, os comprimentos dos canais, os locais de injeção lateral das vazões dentre outras.

**Figura 4.13 – Representação de um canal com planície de inundação**

FONTE: Elaborado pelo autor, 2016

Foram interpolados linearmente as seguintes características: comprimento do canal (L), largura menor da calha (b), largura maior de calha (B), altura da calha (Hc), comprimento da área de preservação permanente da margem direita e esquerda ( $L_{APP-MD} / L_{APP-ME}$ ), coeficiente de rugosidade de Manning para a calha ( $n_{calha}$ ), para a área de preservação permanente da margem da direita e esquerda ( $n_{APP-MD} / n_{APP-ME}$ ) e para a área urbana da margem direita e esquerda ( $n_{URB-MD} / n_{URB-ME}$ ), vistos na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Características amostrais do Rio Uberabinha**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS AMOSTRAIS										
L (m)	b (m)	B (m)	Hc (m)	$L_{APP-MD}$ (m)	$L_{APP-ME}$ (m)	$n_{calha}$	$n_{APP-MD}$	$n_{APP-ME}$	$n_{URB-MD}$	$n_{URB-ME}$
0	13,2	23,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
17	13,2	23,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
106	9,4	19,4	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
128	15,1	25,1	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
142	4,3	14,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
178	6,9	16,9	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
221	4,2	14,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
254	4,7	14,7	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
291	8,8	18,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
324	10,1	20,1	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
354	2,8	12,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
372	9,5	19,5	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
408	15,9	25,9	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
447	14,5	24,5	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
500	14,5	24,5	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
534	6,3	16,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
556	8	18	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
587	10,2	20,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
613	12	22	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
657	12,4	22,4	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
672	9,6	19,6	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
698	15	25	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
720	11,1	21,1	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
729	0,4	10,4	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
743	7	17	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
763	8,8	18,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
797	9,3	19,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
813	12,8	22,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
826	3,3	13,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
845	4	14	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
854	3	13	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
864,29	7,2	17,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

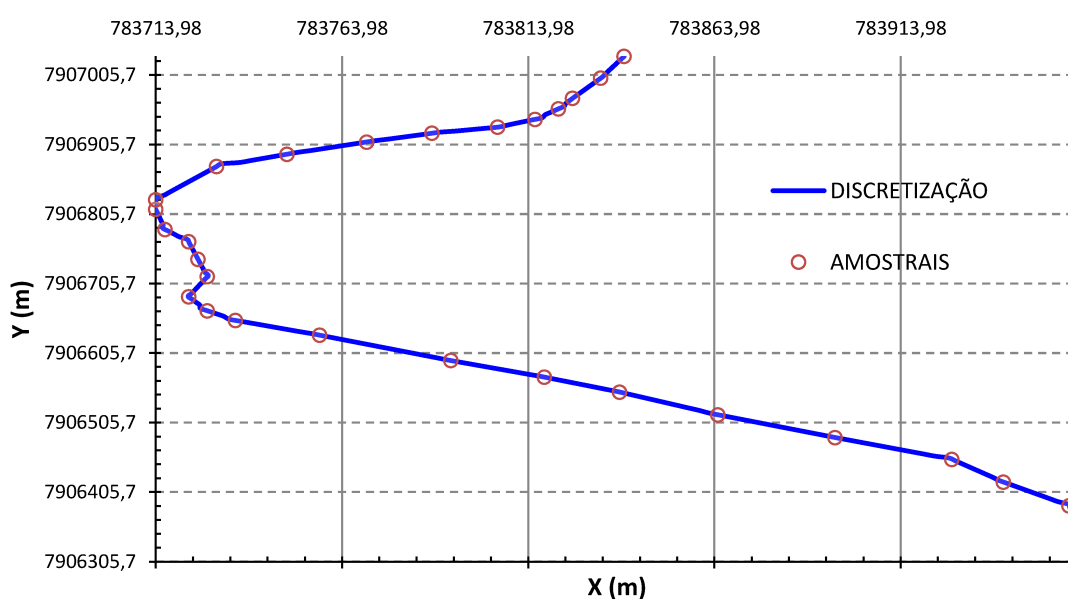


Foram analisadas 32 seções espaçadas irregularmente conforme a necessidade de detalhar melhor cada região, tendo o rio Uberabinha como comprimento total 864,29 metros.

Os resultados da interpolação geram três parâmetros em cada uma das seções intermediárias de cálculo, permitindo a aplicação do modelo de propagação de cheias. Depois são inseridas as coordenadas de vizinhança (X, Y, Z) e calculadas por meio do programa FLOODZ com uma gama de 200 nós e vazão natural ( $Q_{\text{natural}}$ ) igual a  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ , a discretização do Rio Uberabinha gera resultados como: as novas coordenadas discretizadas (X,Y,Z), o comprimento, declividade do terreno, base menor, base maior, altura da calha, e os coeficiente de Manning na planície de inundação da margem direita e esquerda.

A vazão do Córrego do Óleo é aproximadamente  $2,26 \text{ m}^3/\text{s}$  (baseada na contribuição dos afluentes até o ponto analisado) quando está a 468 metros de comprimento da sua origem, e a inserção da vazão citada se deu no ponto 667 metros no Rio Uberabinha. Com essas informações é possível gerar as curvas-chave da área molhada (Am), perímetro molhado (Pm) e os coeficientes de Manning (n) também calculadas pela linguagem computacional em VBA. Na Figura 4.14 o gráfico resultante da discretização mostrando os dados amostrais e os discretizados sendo conectados pelas seções definidas pelo cálculo do programa FLOODZ com espaçamentos iguais a 4,3431 (dL).

**Figura 4.14 –Discretização do Rio Uberabinha com dados amostrais**



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Córrego do Óleo foram analisadas 22 seções (Tabela 4.6) espaçadas irregularmente conforme a necessidade de detalhar melhor cada região, tendo o córrego o comprimento total 1062,8 metros.

**Tabela 4.6 – Características amostrais do Córrego do Óleo**

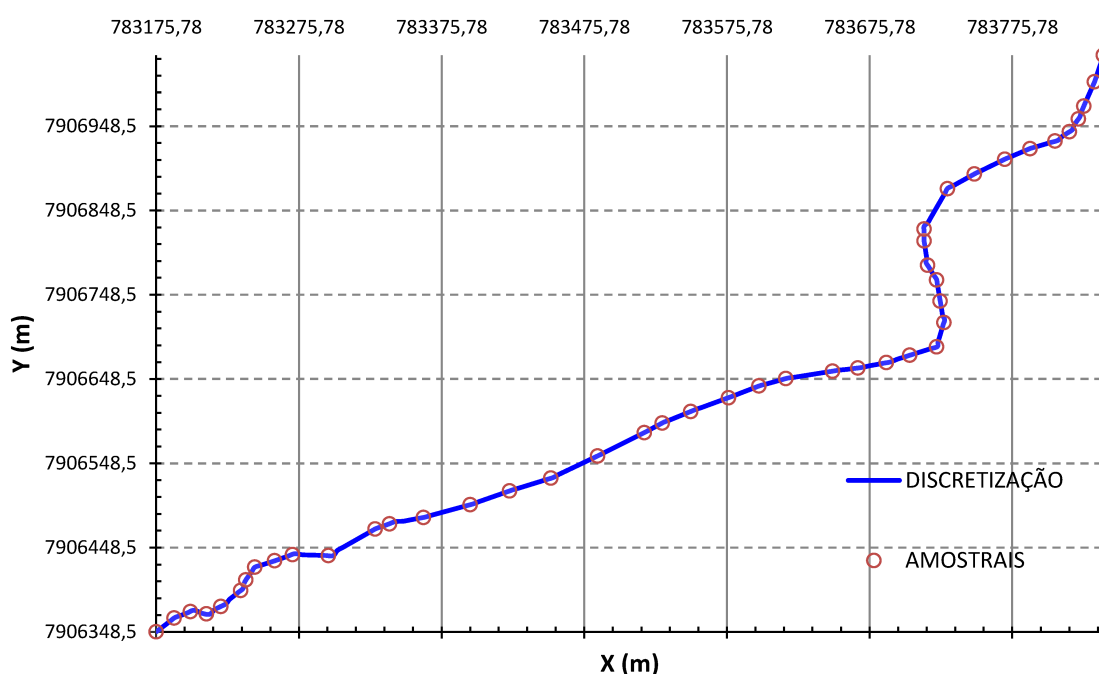
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS AMOSTRAIS										
L (m)	b (m)	B (m)	Hc (m)	L <sub>APP - MD</sub> (m)	L <sub>APP - ME</sub> (m)	n <sub>calha</sub>	n <sub>APP-MD</sub>	n <sub>APP-ME</sub>	n <sub>URB-MD</sub>	n <sub>URB-ME</sub>
0	0,5	1	2	0,5	0,5	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
50	0,5	1	2	0,5	0,5	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
200	0,5	1	2	0,5	0,5	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
400	0,5	1	2	0,5	0,5	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
699	14,5	24,5	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
733	6,3	16,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
755	8	18	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
786	10,2	20,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
812	12	22	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
856	12,4	22,4	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
871	9,6	19,6	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
897	15	25	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
919	11,1	21,1	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
928	0,4	10,4	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
942	7	17	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
962	8,8	18,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
996	9,3	19,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1012	12,8	22,8	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1025	3,3	13,3	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1044	4	14	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1053	3	13	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1062,8	7,2	17,2	2	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados da interpolação, novamente, geram três parâmetros em cada uma das seções intermediárias de cálculo, permitindo a aplicação do modelo de propagação de cheias. Após isso, são inseridas as coordenadas de vizinhança (X, Y, Z) e calculadas por meio do programa FLOODZ com uma gama de 200 nós e vazão natural ( $Q_{\text{natural}}$ ) igual a 0,001 m<sup>3</sup>/s, a discretização do Córrego do Óleo gera resultados como: as novas coordenadas discretizadas (X,Y,Z), o comprimento, declividade do terreno, base menor, base maior, altura da calha, e os coeficiente de Manning na planície de inundação da margem direita e esquerda.

A vazão de injeção do Rio Uberabinha é aproximadamente  $58,98 \text{ m}^3/\text{s}$  (baseada nas contribuições dos afluentes até o ponto analisado) quando está a 667 metros de comprimento da sua origem, e a inserção da vazão citada se deu no ponto 468 metros no Córrego do Óleo. Assim, como antes, com essas informações é possível gerar as curvas-chave da área molhada (Am), perímetro molhado (Pm) e os coeficientes de Manning (n) também calculadas pela linguagem computacional em VBA. Na Figura 4.15 o gráfico resultante da discretização mostrando os dados amostrais e os discretizados sendo conectados pelas seções definidas pelo cálculo do programa FLOODZ com espaçamentos iguais a 5,3411 (dL).

**Figura 4.15 –Discretização do Córrego do Óleo com dados amostrais**

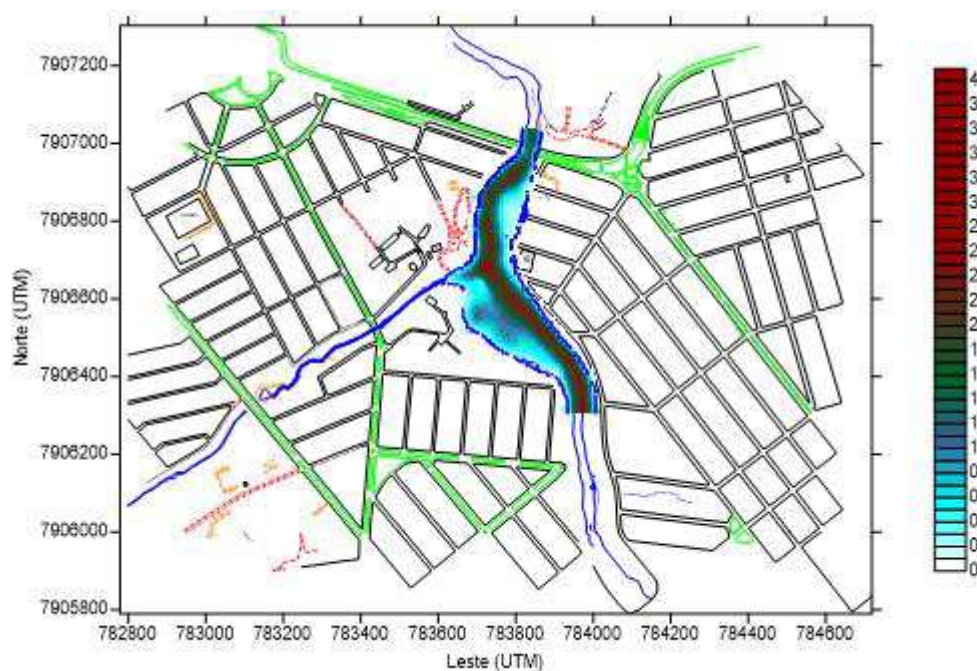


Fonte: Elaborado pelo autor.

A planície de inundação por sua vez depende desses dados anteriores que serão base para a alimentação da planilha que implementará o programa *Standard Step Method* (STM). O referido programa que está inserido dentro do FLOODZ será responsável em gerar as áreas de inundação avaliando pelo código o quanto de área lateral será atingida. Nessa planilha também estão informações como tensão cisalhante, velocidade, nível da água dentre outras que caracterizam essas zonas de inundação.

Na Figura 4.16 pode-se observar o comprimento adjacente atingido pela água em uma situação de inundação, extravasando para fora do Rio Uberabinha e também para fora do Córrego do Óleo. A falta de permeabilização das cidades pode acentuar esse tipo de problema uma vez que as águas pluviais tendem a aumentar ainda mais o volume nessas regiões críticas.

**Figura 4.16 – Inundação da confluência (m) para  $Q_5$  (RUxCO)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

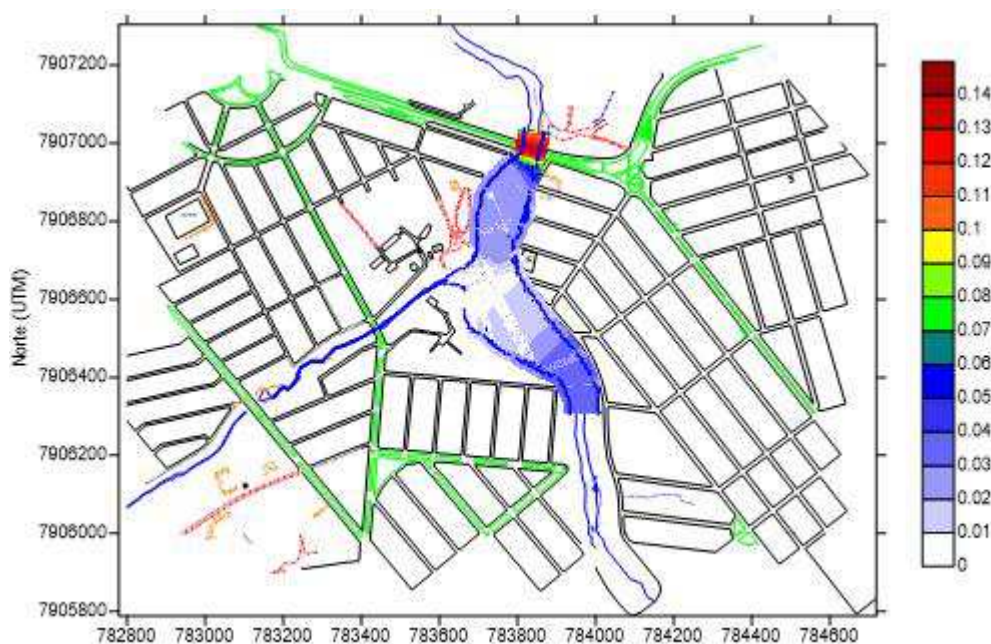
Observa-se que nas regiões mais escuras, avermelhadas, estão as maiores profundidades. Ao passo que, nas regiões mais claras estão as áreas menos profundas e que estão atingindo a planície de inundação, ou seja, pelo mapa de inundação pode-se perceber as possíveis regiões que serão atingidas com o aumento do volume das águas em períodos chuvosos.

O termo  $Q_5$  significa que, segundo a curva de permanência de vazões médias obtidas da estação Letreiro, se tem 5% de chance de igualar ou superar a vazão determinada pela soma dos afluentes antes da confluência analisada.

#### 4.2.1.3 Tensão cisalhante e da velocidade do escoamento (RU x CO)

No mapa da tensão cisalhante (Figura 4.17) pode-se perceber que nas regiões mais escuras, avermelhadas, estão os pontos de maior contato causando maior tensão entre a água e a margem do canal. Bem abaixo da rodovia BR-365 se concentram esses locais mais atingidos pela tensão, elevadas tensões acarretam erosões que certamente com o tempo danificam as laterais onde se encontram. Já nas regiões mais claras, azuladas, estão os pontos de menor tensão cisalhante que por sua vez apresentam menor tensão nas regiões de contato.

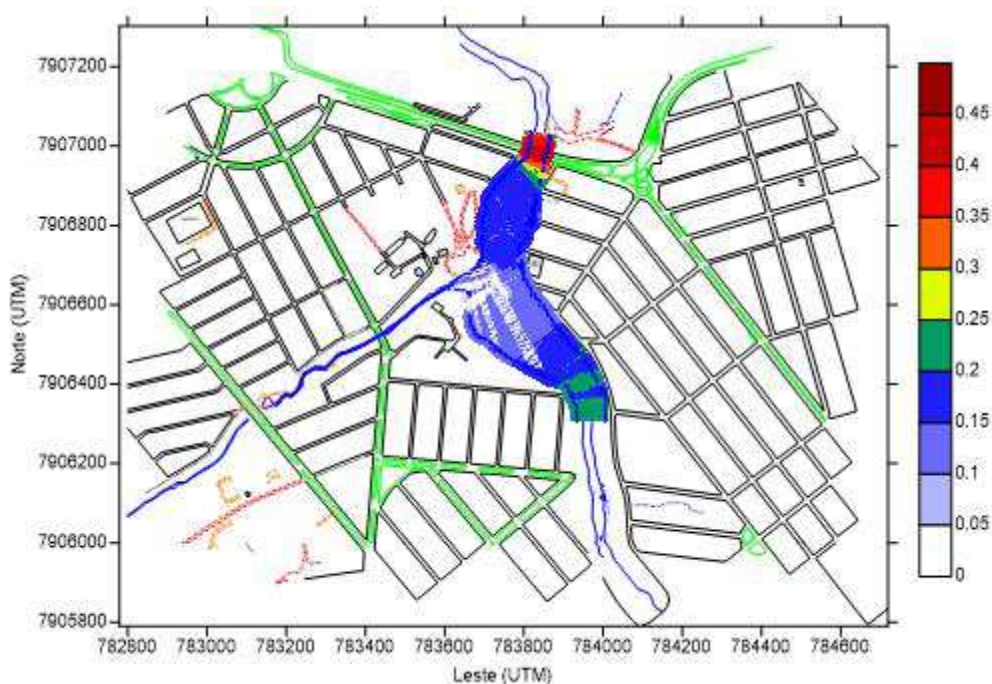
**Figura 4.17 – Tensão cisalhante (Pa) na confluência para  $Q_5$  (RUxCO)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A velocidade do fluxo (Figura 4.18) é de suma importância para detectar a potencialidade das regiões de assoreamento (formação de depósitos) causando a elevação da cota de fundo do canal pelo acúmulo de sedimentos elevando o nível da água na região. Então, velocidades altas como visto no mapa de velocidades são representadas pelas cores mais escuras, avermelhadas, que indicam que não é previsto que haja acúmulo de areia ou outros sedimentos nesses locais. No entanto, nas partes do mapa que estão em cores mais claras, azuladas, certamente ocorrerão depósitos ocasionando o assoreamento.



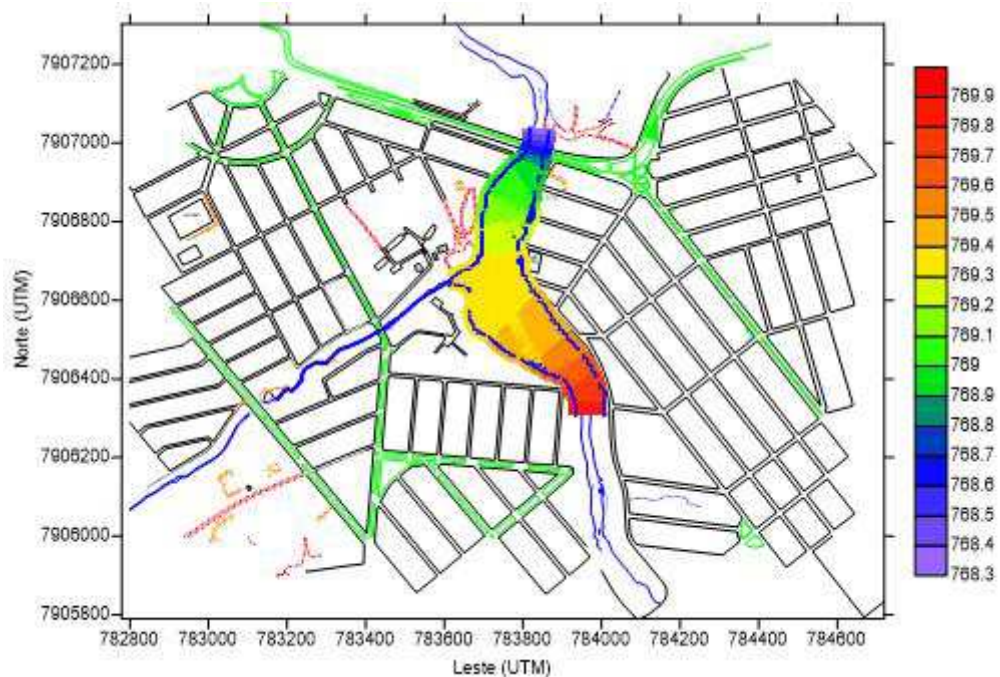
**Figura 4.18 – Velocidade médias (m/s) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCO)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

Isso mostra que possivelmente serão necessárias medidas de desassoreamento ou aumento das laterais do canal a fim de não haver problemas com a elevação rápida no nível da água em épocas de chuvas mais intensas. Percebe-se então, a relevância de se avaliar o comportamento da velocidade do fluxo nos canais, essa previsibilidade atinge não só características econômicas, mas também de planejamento do meio ambiente tendo em vista a sustentabilidade ambiental.

#### **4.2.1.4 Representação do nível da água e da planície de inundação (RU x CO)**

Quanto ao nível da água cabe salientar que as regiões mais avermelhadas indicam uma cota mais alta e que a medida em que vai clareando a escala tendendo a uma cor mais azulada encontram-se as cotas mais baixas (Figura 4.19). Dessa forma, partes mais altas demandam maior atenção no que tange aos cuidados a respeito do planejamento urbano para não atingirem áreas habitadas.

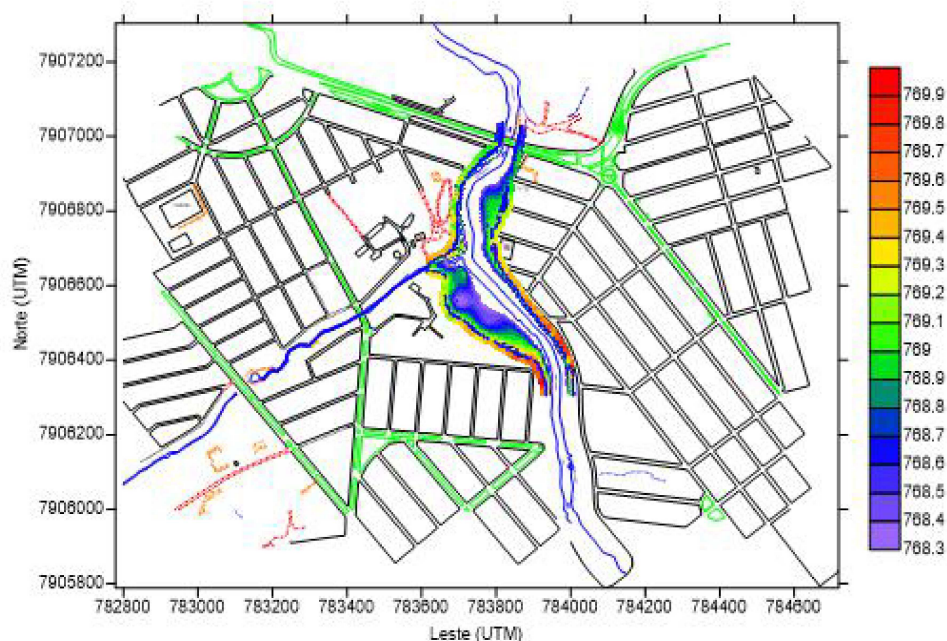
**Figura 4.19 – Nível da água (m) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCO)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

A planície de inundação é toda região que vai além da calha do Rio Uberabinha, que nesse caso está demonstrando as cotas atingidas em cores da escala. A importância é análise mais detalhada dessas regiões inundadas e prevenir com medidas para esses locais em específico.

Na figura 4.20 o fato da malha de inundação estar sobreposta sobre o mapa da cidade influencia diretamente na determinação de áreas de construção, os chamados zoneamentos urbanos, alertando quanto à possibilidade ou não de ocupação dessas áreas.

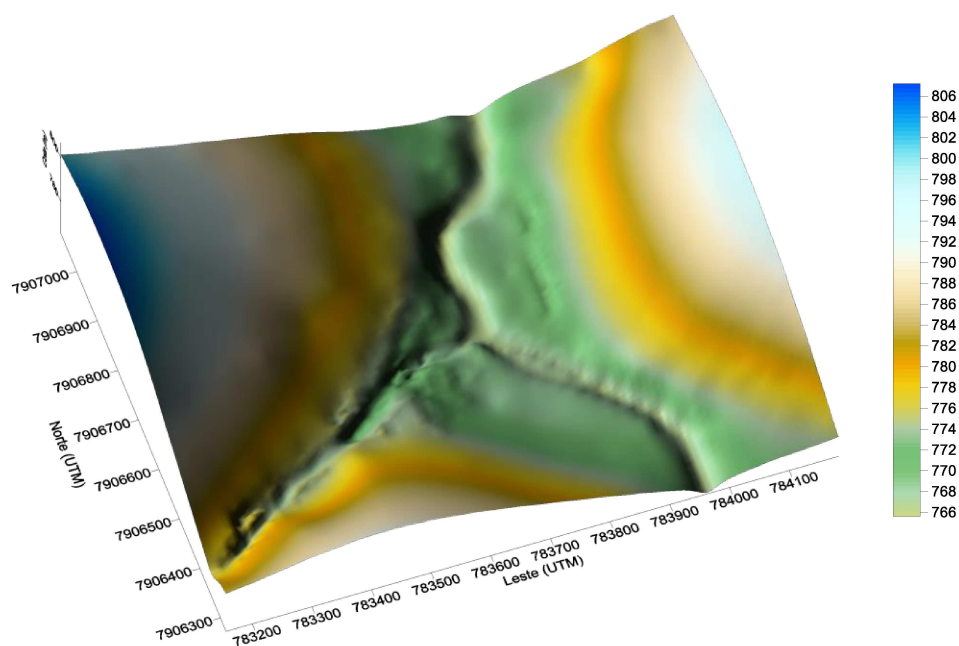
Outro fator existente, é a distância de área de preservação a ser considerada, ditas APPs (áreas de preservação permanente), quanto maior a área de inundação prevista maior será também a área de reserva a ser determinada pelos órgãos ambientais.

**Figura 4.20 – Planície de inundação (m) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCO)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.1.5 Modelo Numérico do Terreno e do escoamento em 3D (RU x CO)

A modelagem espacial em 3D do terreno é uma interpretação mais robusta dessas áreas permitindo ter uma visão mais ampla do ambiente estudado (Figura 21).

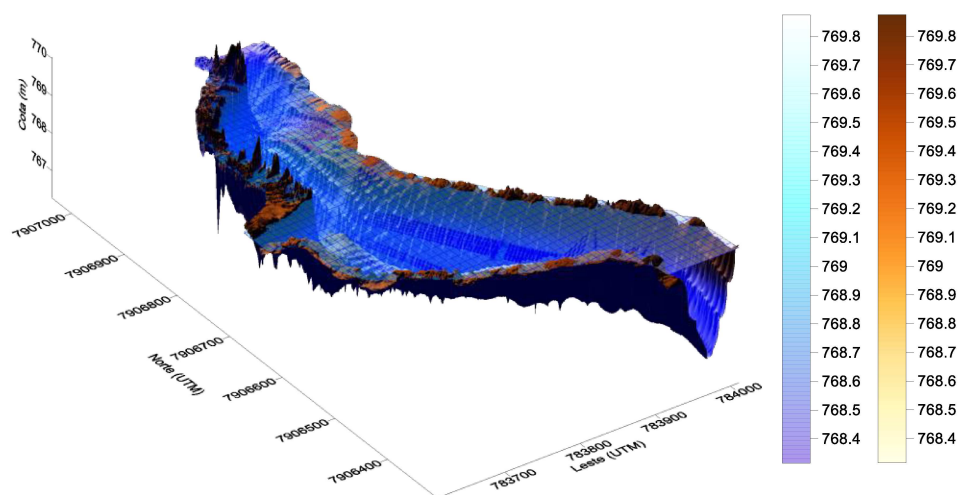
**Figura 4.21 – Terreno em 3D (m) na confluência (RUxCO)**

Fonte: Elaborada pelo autor.



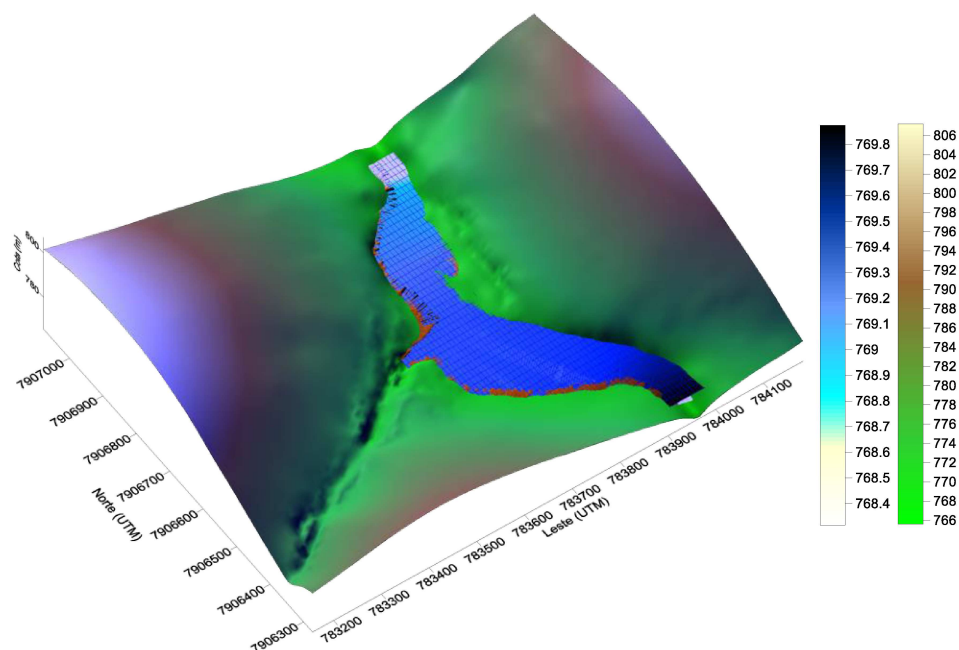
Na determinação do modelo 3D foi usado o programa *Surfer 10*, que captando os valores da malha criada de dados do MNT gera um gráfico espacial que pode ser editado possibilitando avaliar melhor as zonas de impacto do escoamento (Figuras 4.22 e 4.23). A escala dá uma referência de cotas altimétricas, que permitem saber onde é determinado o talvegue (maior profundidade do rio).

**Figura 4.22 – Escoamento em 3D (m) na confluência (RUxCO)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 4.23 – MNT da inundação em 3D (m) na confluência (RUxCO)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.2 Confluência do Rio Uberaba x Córrego Lageado

O Segundo caso aplicado foi na confluência do Uberabinha como o Córrego do Lageado (Figura 4.24), a microbacia do córrego Lageado possui área total de 6.640,75 ha correspondendo a 12,58% da área da APA do rio Uberaba, sendo a terceira maior microbacia desta APA, estando parcialmente dentro do perímetro urbano. O ponto mais baixo, foz com o rio Uberaba, está na altitude 717m, e o ponto mais alto possui altitude 851m na área do chapadão (ALAMY, SALLA, 2015).

Dentro dessa microbacia estão localizados dois bairros: Amoroso Costa e Lageado, que formam um conjunto de vários loteamentos, com uma população total urbana aproximada de 11.433 habitantes (CASTRO, 2005). A rodovia MG-190 e o anel viário cortam a área da microbacia, tendo três pontos de cruzamento com os cursos d'água.

**Figura 4.24 – Confluência do Rio Uberaba com Córrego Lageado (RUxCL)**

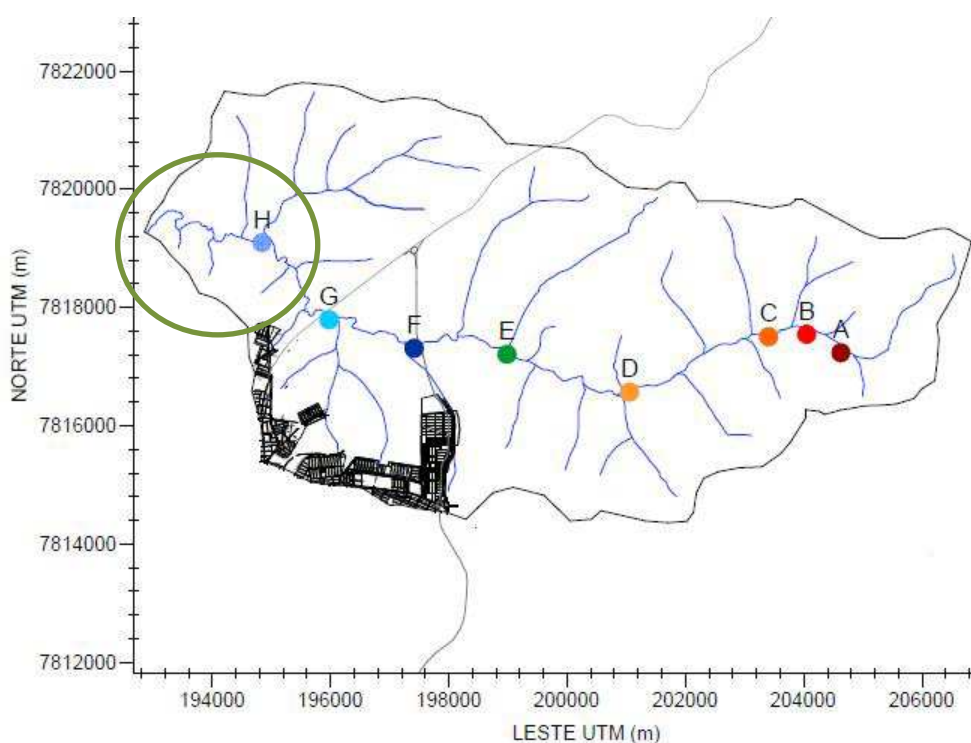


Fonte: Google Earth, 2016.

#### 4.2.2.1 Caracterização da região (RU x CL)

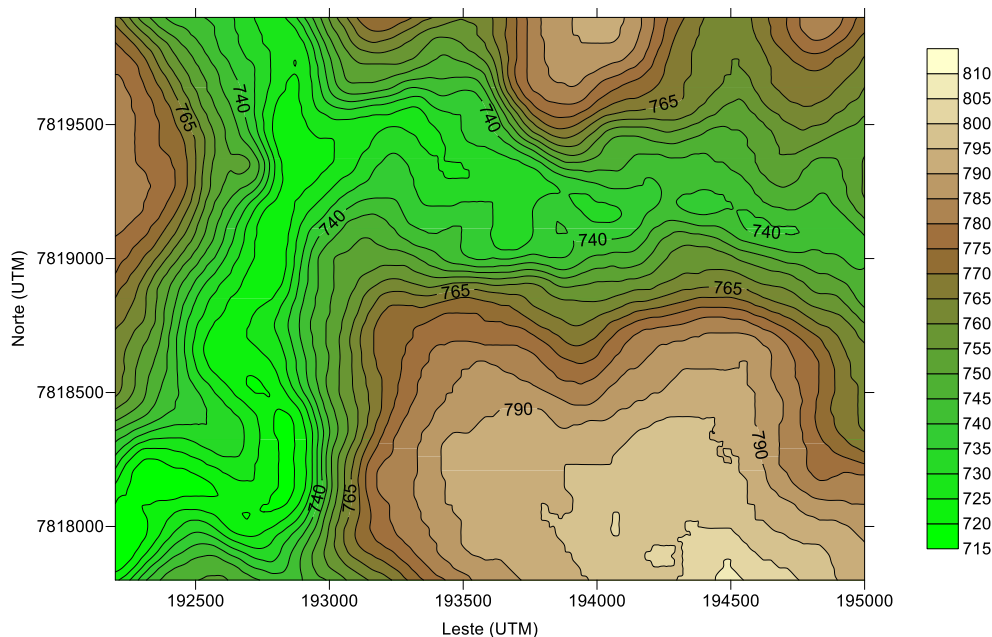
A caracterização dessa situação foi feita por meio da bacia da região que contém os Rios Uberaba e o Córrego Lageado, os mapas planimétricos constituem uma das principais ferramentas para gerenciamento de bacias hidrográficas. Nesse caso, delimitando a região de estudo e dando uma visão ampla da área a ser analisada conforme a Figura 4.25.

**Figura 4.25 – Planimetria da confluência (RUxCL)**



Fonte: ALAMY FILHO, SALLA, 2015.

A partir das curvas de nível também podem-se localizar zonas planas adjacentes ao leito menor dos canais e, portanto, mais vulneráveis a inundações ribeirinhas (Figura 4.26). Além disto, em termos de modelagem hidráulica, os mapas planialtimétricos sustentam a construção de modelos numéricos de terreno (MNT), os quais estabelecem relações numéricas entre coordenadas e cotas e que auxiliam a delimitação lateral das inundações (ALAMY, SALLA, 2015).

**Figura 4.26 – Curvas de nível (m) da confluência (RUxCL)**

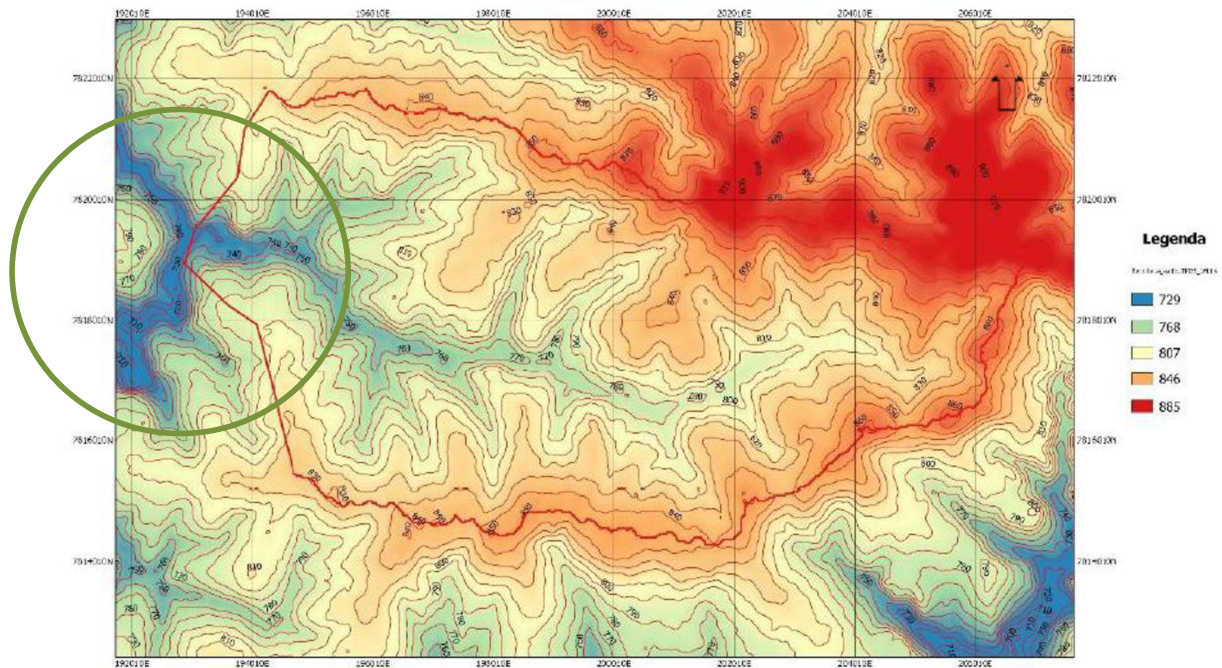
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os mapas planialtimétricos são muito além da delimitação dos divisores de água, estes mapas permitem identificar talvegues, tributários e áreas de contribuição difusas, zonas de maior ou menor declividade e, portanto, mais ou menos propícias à geração de escoamento superficial (Figura 4.27).

Esse mapa foi obtido a partir do programa TOPODATA, que oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM (*shuttle radar topographic mission*) do USGS (Serviço Geográfico Americano).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizou o processamento e refinamento por krigagem dos dados originais e obteve modelos digitais de elevação (MDE) compatíveis com escala de 1:50.000, apresentando *pixels* de 30 m de cobertura nacional. Essa escala permite a realização da extração de curvas de nível com equidistância de 20 m. Os dados podem ser acessados via *website* com índice das cartas no endereço do programa Topodata.



**Figura 4.27 – Planialtimetria da confluência (m) (RUxCL)**

Fonte: ALAMY FILHO, SALLA, 2015.

Foi utilizado também o *software* de SIG QGIS (antigo QuantumGIS), de livre licença, para recorte, reprojeção dos dados e mudança de referencial. Os dados originais são disponibilizados em SIRGAS 2000, sem projeção cartográfica associada e, após o recorte da área da bacia, os dados foram reprojutados para SIRGAS 2000 UTM fuso 22S.

A partir dos dados preparados, foram extraídas as curvas de nível com equidistâncias de 20 m e 10 m. Posteriormente, os mapas foram construídos através da ferramenta *Map Composer* para apresentação (ALAMY FILHO, SALLA, 2015).

#### 4.2.2.2 Análise da zona de previsão de inundação da região (RU x CL)

As zonas de inundação dependem dos cálculos resolvidos pelo programa FLOODZ, já comentado anteriormente, onde utiliza os dados amostrais e as características geométricas para a determinação das áreas inundadas. Foram interpolados linearmente as seguintes características: comprimento do canal (L), largura menor da calha (b), largura maior de calha (B), altura da calha (Hc), comprimento da área de preservação permanente da margem direita e esquerda ( $L_{APP-MD} / L_{APP-ME}$ ), coeficiente de rugosidade de Manning para a calha ( $n_{calha}$ ), para a área de preservação permanente da margem da direita e esquerda ( $n_{APP-MD} / n_{APP-ME}$ ) e para a área urbana da margem direita e esquerda ( $n_{URB-MD} / n_{URB-ME}$ ), vistos na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 – Características amostrais do Rio Uberaba**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS AMOSTRAIS										
L (m)	b (m)	B (m)	Hc (m)	$L_{APP-MD}$ (m)	$L_{APP-ME}$ (m)	$n_{calha}$	$n_{APP-MD}$	$n_{APP-ME}$	$n_{URB-MD}$	$n_{URB-ME}$
0	0,1	12,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
18	0,1	13,6	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
58,7	0,1	16,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
84,7	0,1	10,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
136,7	0,1	19,1	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
165,7	0,1	17,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
196,7	0,1	13,7	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
429,7	0,1	13,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
459,7	0,1	22	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
501,7	0,1	14,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
816,7	0,1	15,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
906,7	0,1	16,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1146,7	0,1	14,3	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1176,7	0,1	13,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1216,7	0,1	15,6	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1316,7	0,1	10,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1366,7	0,1	19,7	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1456,7	0,1	11,5	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1776,7	0,1	18,1	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1816,7	0,1	25,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1866,7	0,1	13,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2067,7	0,1	13	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35

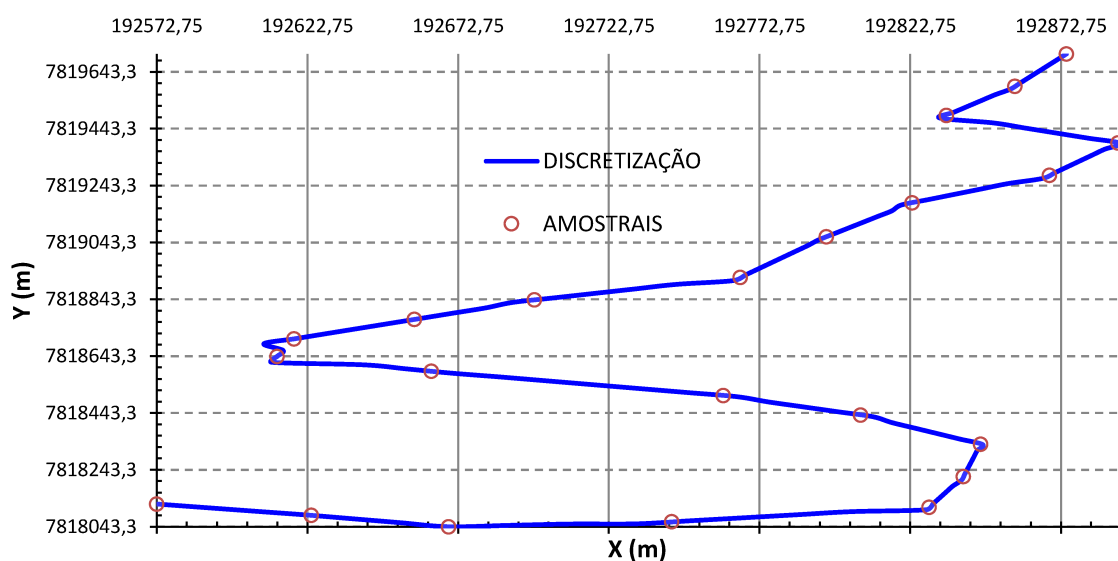
Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram analisadas 22 seções espaçadas irregularmente conforme a necessidade de detalhar melhor cada região, tendo o rio Uberaba como comprimento total 2067,77 metros.

Do mesmo modo anterior, os resultados da interpolação geram três parâmetros em cada uma das seções intermediárias de cálculo, permitindo a aplicação do modelo de propagação de cheias. Depois são inseridas as coordenadas de vizinhança (X, Y, Z) e calculadas por meio do programa FLOODZ com uma gama de 100 nós e vazão natural ( $Q_{\text{natural}}$ ) igual a  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ , a discretização do Rio Uberaba gera resultados como: as novas coordenadas discretizadas (X,Y,Z), o comprimento, declividade do terreno, base menor, base maior, altura da calha, e os coeficiente de Manning na planície de inundação da margem direita e esquerda.

A vazão de injeção do Córrego Lageado é aproximadamente  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  quando está a 448,70 metros de comprimento da sua origem, e essa adição lateral se deu no ponto 1865,78 metros do Rio Uberaba. Assim, como antes, com essas informações é possível gerar as curvas-chave da área molhada ( $A_m$ ), perímetro molhado ( $P_m$ ) e os coeficientes de Manning ( $n$ ) também calculadas pela linguagem computacional em VBA. Na Figura 4.28 o gráfico resultante da discretização mostrando os dados amostrais e os discretizados sendo conectados pelas seções definidas pelo cálculo do programa FLOODZ com espaçamentos iguais a 20,8865 (dL).

**Figura 4.28 – Discretização do Rio Uberaba com dados amostrais**



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Córrego Lageado foram analisadas 16 seções espaçadas irregularmente conforme a necessidade de detalhar melhor cada região, tendo o córrego o comprimento total 3464,89 metros (Tabela 4.8).

**Tabela 4.8 – Características amostrais do Córrego Lageado**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS AMOSTRAIS										
L (m)	b (m)	B (m)	Hc (m)	L APP - MD (m)	L APP - ME (m)	n <sub>calha</sub>	n APP- MD	n APP- ME	n URB- MD	n URB- ME
0	3	10	1,5	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1865,78	3	10	1,5	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1876,78	0,1	22	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
1918,78	0,1	14,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2233,78	0,1	15,2	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2323,78	0,1	16,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2563,78	0,1	14,3	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2593,78	0,1	13,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2633,78	0,1	15,6	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2733,78	0,1	10,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2783,78	0,1	19,7	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
2873,78	0,1	11,5	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
3193,78	0,1	18,1	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
3233,78	0,1	25,9	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
3283,78	0,1	13,8	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35
3464,89	0,1	13	3	1	1	0,033	0,35	0,35	0,35	0,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

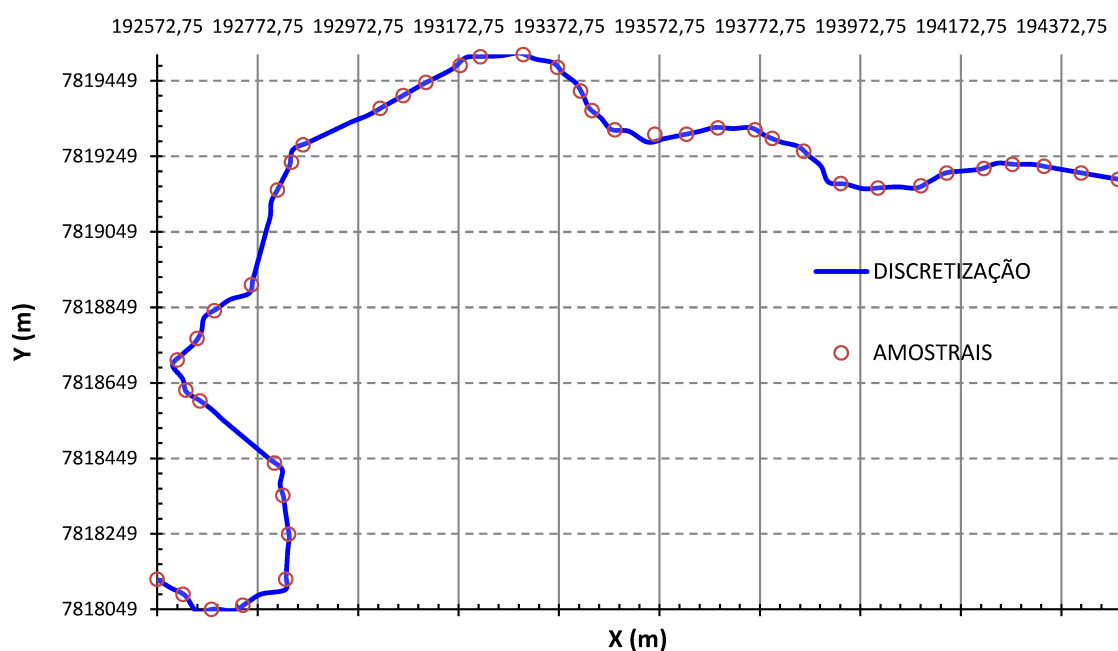
Dessa maneira, os resultados da interpolação geram três parâmetros em cada uma das seções intermediárias de cálculo, permitindo a aplicação do modelo de propagação de cheias. Após isso, são inseridas as coordenadas de vizinhança (X, Y, Z) e calculadas por meio do programa FLOODZ com uma gama de 100 nós e vazão natural ( $Q_{\text{natural}}$ ) igual a  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ , a discretização do Córrego Lageado gera resultados como: as novas coordenadas discretizadas (X,Y,Z), o comprimento, declividade do terreno, base menor, base maior, altura da calha, e os coeficiente de Manning na planície de inundação da margem direita e esquerda.

A vazão de injeção do Rio Uberaba é aproximadamente  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  quando está a 1865,78 metros de comprimento da sua origem, e essa adição lateral se deu no ponto 448 metros do Córrego Lageado.



Assim, como antes, com essas informações é possível gerar as curvas-chave da área molhada ( $A_m$ ), perímetro molhado ( $P_m$ ) e os coeficientes de Manning ( $n$ ) também calculadas pela linguagem computacional em VBA. Na Figura 4.29 o gráfico resultante da discretização mostrando os dados amostrais e os discretizados sendo conectados pelas seções definidas pelo cálculo do programa FLOODZ com espaçamentos iguais a 34,9988 (dL).

**Figura 4.29 – Discretização do Córrego Lageado com dados amostrais**

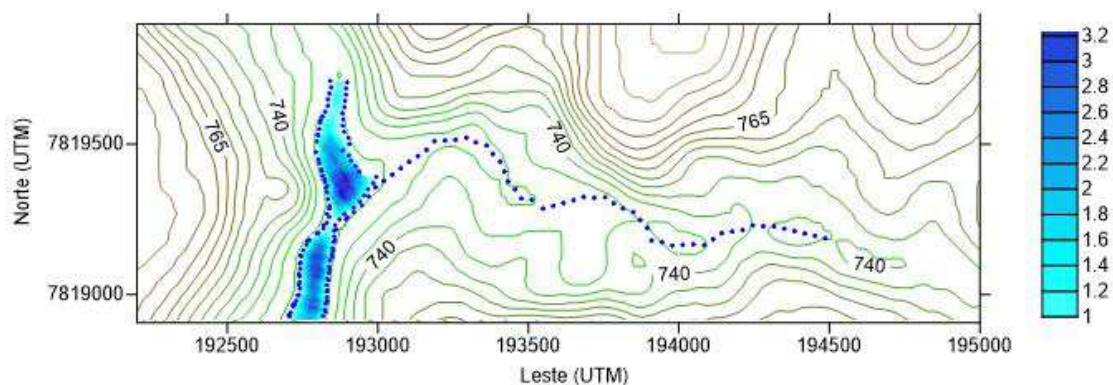


Fonte: Elaborada pelo autor.

Lembrando que a planície de inundação por sua vez depende desses dados anteriores que serão base para a alimentação da planilha que implementará o programa *Standard Step Method* (STM). Como já dito, o referido programa que está inserido dentro do FLOODZ será responsável em gerar as áreas de inundação avaliando pelo código o quanto de área lateral será atingida. Nessa planilha também estão informações como tensão cisalhante, velocidade, nível da água dentre outras que caracterizam essas zonas de inundação.

Na Figura 4.30 pode-se observar o comprimento adjacente atingido pela água em uma situação de inundação, extravasando para fora do Rio Uberaba e também para fora do Córrego Lageado.

**Figura 4.30 – Inundação da confluência (m) para  $Q_5$  (RUxCL)**



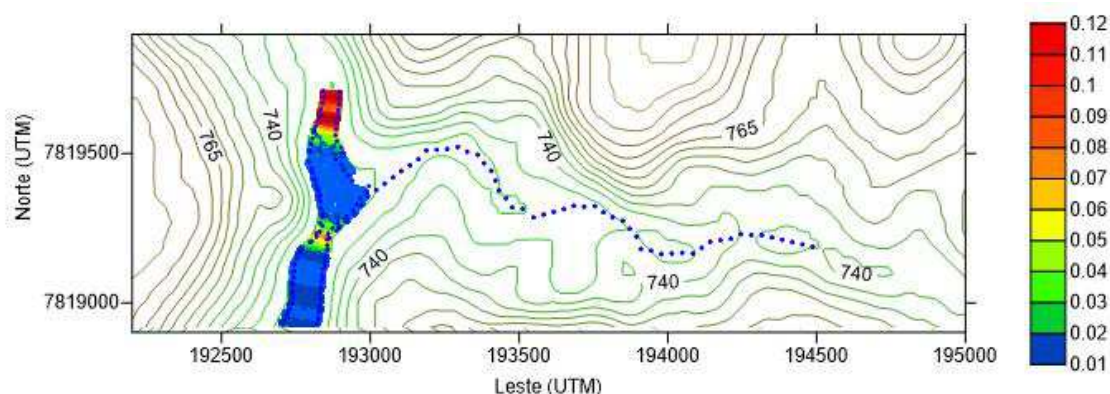
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que os valores em azul escuro indicam as maiores profundidades, ao passo que os azuis claro são as áreas de extensão lateral de inundação com menores valores de profundidades. Lembrando que, a vazão  $Q_5$  (retirados da curva de permanência de vazões médias da estação Letreiro) significa que existe 5% de chance de igualar ou superar o valor de vazão, estipulada pela soma das vazões anteriores dos seus afluentes até aquele ponto.

#### 4.2.2.3 Tensão cisalhante e da velocidade do escoamento (RU x CL)

A tensão cisalhante segue o mesmo raciocínio ao longo deste trabalho, nas regiões mais escuras e avermelhadas estão os locais de maior atrito com as paredes do canal. As cores mais claras, por seu turno, os locais de menor valor da tensão de cisalhamento (Figura 4.31).

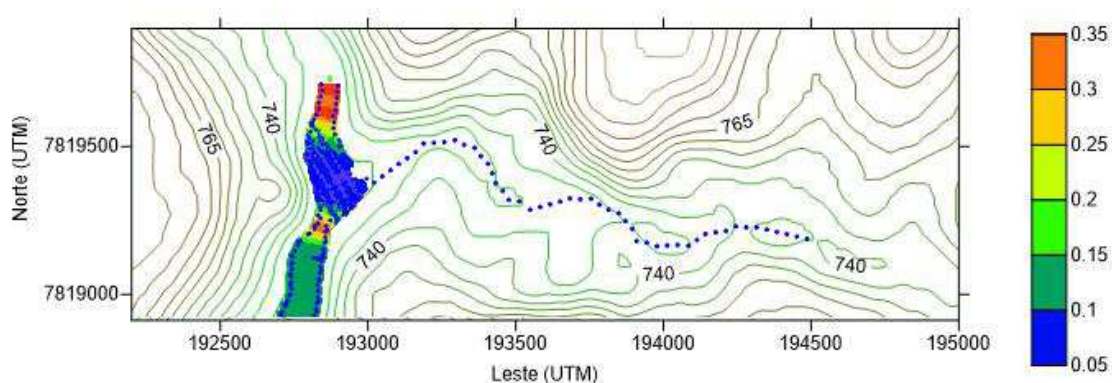
Essa inundação se dá mais visível no Rio Uberaba, quase não se nota a inundação do Córrego Lageado, mostrando claramente os efeitos da tensão de cisalhamento maiores no Rio Uberaba. Nota-se ainda que regiões de estreitamento do canal levam a tensões das margens com o escoamento, possivelmente regiões onde a vegetação diminui a seção do canal ou até mesmo regiões rochosas com quedas, declives entre outros.

**Figura 4.31 – Tensão cisalhante (Pa) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCL)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

As regiões de menor velocidade (Figura 4.32) certamente vão depositar mais sedimentos e assorear mais rápido. Já nas regiões de maior velocidade podem ocorrer afundamento do canal pela retirada das partículas que ficam paradas no fundo do rio.

A velocidade maior segue a escala com cores mais fortes, amarelas e alaranjadas, já as cores verdes e azuis tendem a regiões de baixa velocidade onde pode existir o represamento dos sedimentos e possivelmente se tornarem áreas propícias a inundações.

**Figura 4.32 – Velocidades médias (m/s) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCL)**

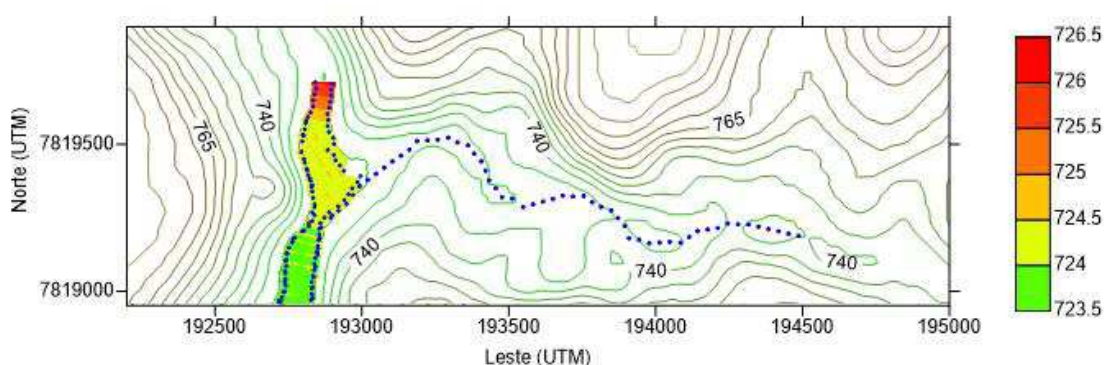
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que nas regiões de menor seção do canal, vistas em dois pontos do mapa, fazem com que haja maior velocidade do escoamento e as regiões de maior seção diminuem essa velocidade. Basicamente essas regiões de seções maiores são as áreas de maior volume e contribuem para o acúmulo dos depósitos de areia.

#### 4.2.2.4 Representação do nível da água e da planície de inundação (RU x CL)

O nível da água nessa região é maior em apenas um ponto do mapa indicando, quando vai de amarelo para vermelho, tem-se a região de maior elevação (Figura 4.33). Observa-se que essa cota maior fica depois da confluência. Já nas áreas de cor mais azul escuro e claro encontramos os níveis menores da altura da água, indicando possíveis represamentos nessa zona.

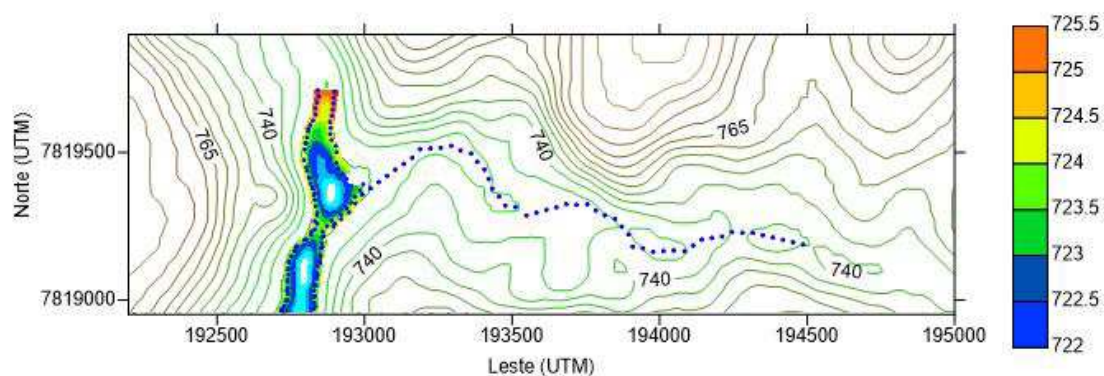
**Figura 4.33 – Nível da água (m) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCL)**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A planície de inundação representada (Figura 4.34), mostra em sua maioria pequenas elevações, isso porque já está fora da calha do rio e a água se espalha diminuindo os níveis nesses locais. Em um ponto somente, logo depois da confluência é que esse nível se eleva rapidamente indicando ser um setor grande vazão.

**Figura 4.34 – Planície de inundação (m) na confluência para Q<sub>5</sub> (RUxCL)**

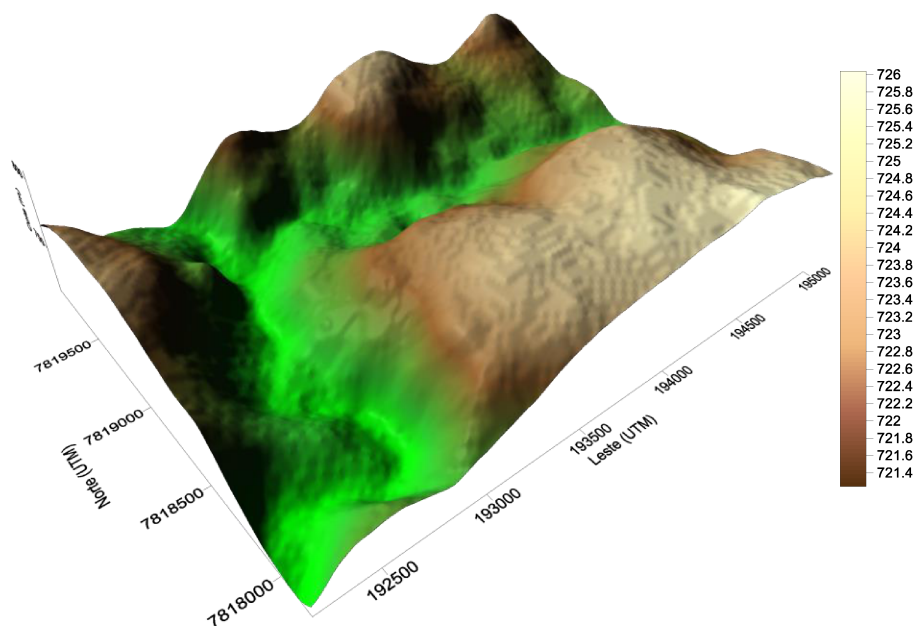


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.2.5 Modelo Numérico do Terreno e do escoamento em 3D (RU x CL)

Na Figura 4.35 a representação do modelo numérico de terreno com confluência onde as cavidades mais profundas estão em verde mais claro, e os tons mais amarronzados estão mostrando as partes mais altas do terreno.

**Figura 4.35 – Terreno em 3D (m) na confluência (RUxCL)**

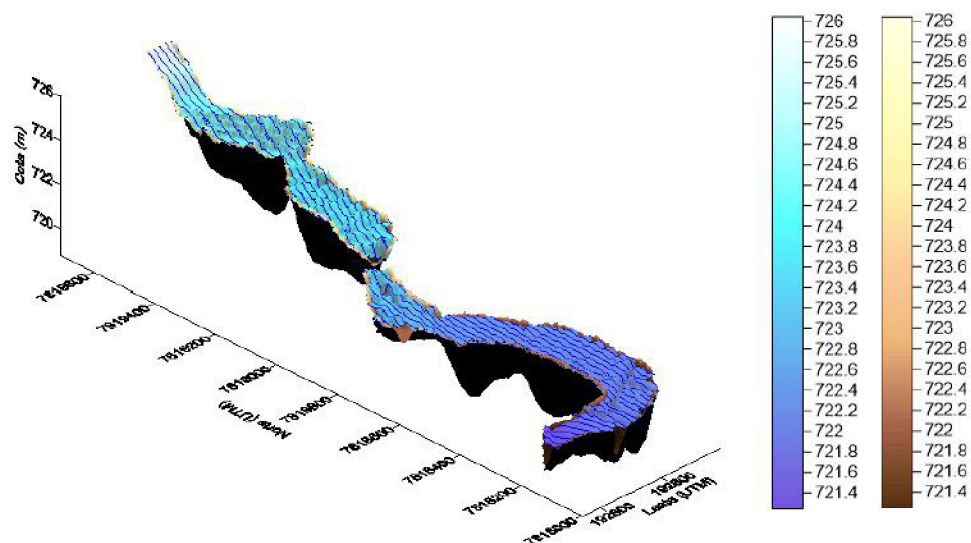


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os modelos em 3D certamente dão uma visão mais apurada do objeto analisado, para tanto foi representado o escoamento (Figura 4.36) mostrando como se comportam as cotas de fundo do canal e também se dá uma noção de quantidade sobre o volume exposto.

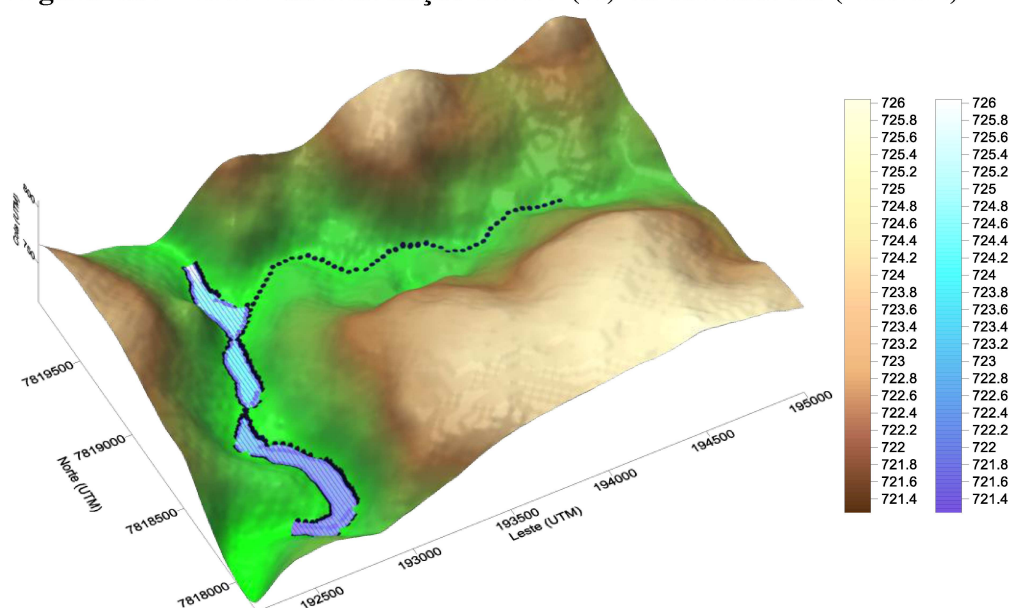
Ao lado seguem duas cotas em escala, uma da calha e outra do fluxo corrente. Constata-se que as regiões mais profundas estão a jusante, enquanto as mais rasas em cor azul claro estão a montante.



**Figura 4.36 – Escoamento em 3D (m) na confluência (RUxCL)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

A região inundada é representada na Figura 4.37 que avalia até onde o nível da água atinge, em tons azuis a água dentro da calha do Rio com uma leve inundação lateral uma vez que o terreno é bem acentuado conseguindo conter melhor a essa elevação.

**Figura 4.37 – MNT da inundação em 3D (m) na confluência (RUxCL)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÃO

O estudo deste trabalho proporcionou empregar a Técnica de Canais Paralelos (TCP) por intermédio do *Standard Step Method* (STM) aplicada às confluências de canais e rios. O comportamento dos escoamentos permanentes variados foi avaliado nas regiões de junção dos canais apontando para uma série de informações relevantes. Com os dados obtidos na confluência teste de canais trapezoidais, observou-se que os valores das profundidades ( $h$ ) mostraram um bom desempenho para o código implementado em *Visual Basic* (VBA).

Algumas características como as vazões permanentes para as seções e a condição de contorno a jusante foram facilitadoras nesse processo. Já, por sua vez, a linguagem computacional em VBA e os cálculos numéricos empregados foram os principais entraves dessa pesquisa, trazendo em si uma série de tentativas e estudos a fim de resolver as situações desafiadoras que apareceram ao longo de cada metodologia. Os gráficos de profundidade, das tensões cisalhantes, da velocidade e do nível da água obtidos foram de extrema relevância para detectar o comportamento dos canais e consequentemente das confluências.

A comparação da TCP com o programa HEC-RAS se mostrou bem similar, nota-se que foram usadas técnicas diferentes e mesmo assim o erro obtido foi da ordem de  $10^{-3}$  quando confrontadas as profundidades encontradas. Outra constatação foi que a diferença relativa média geral na ordem de 0,8122 % para o canal 1, e para o canal 2 a diferença relativa média geral foi de 0,7992 %, ou seja, a TCP ficou bem próxima na comparação com o modelo do HEC-RAS com erro menor que 1% na média geral relativa para os dois canais.

Os dois casos de confluências analisados no estudo prático (Rio Uberabinha x Córrego do Óleo e Rio Uberaba x Córrego Lageado) apresentaram resultados satisfatórios, as imagens dos mapas puderam mostrar as zonas de transbordamento dos canais, as áreas de assoreamento com baixas velocidades do fluxo, as regiões onde podem ocorrer erosões pela tensão cisalhante do escoamento e os níveis atingidos pela variação de altura da superfície da água.

Enfatiza-se ainda que um modelo numérico de terreno bem refinado na vizinhança do canal amplia a precisão do método. Em termos, de análises empregadas, esta precisão requer levantamentos topográficos dentro da planície de inundação, melhorando as curvas de nível que margeiam o canal.

Em síntese, a Técnica de Canais Paralelos adotada para simular e delimitar áreas inundadas foi verificada e mostrou-se válida. Essa temática servirá para futuras pesquisas que poderão ser estudadas com essa metodologia numérica em outras confluências. O modelo desenvolvido nesse trabalho pode ser executado para qualquer canal confluyente, desde que os valores e os parâmetros estejam determinados para escoamentos permanentes variados. Trabalhos posteriores podem em uma nova etapa abranger os escoamentos transientes com o uso das equações de Saint Venant, ampliando ainda mais a aplicabilidade da Técnica de Canais Paralelos tão detalhadamente apresentada ao longo dessa obra.



## REFERÊNCIAS

A BÍBLIA SAGRADA: **Antigo e Novo Testamento**. Rio de Janeiro: Sociedade Bíblica do Brasil, 1960.

ALAMY FILHO, J. E. **Simulação numérica de escoamento em Aquífero semiconfinado, utilizando ferramentas do Excel** – XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió – AL, 2011.

ALAMY FILHO, J. E.; MIRANDA, M.C.; SALLA, M. R. **Um modelo para simulação de escoamento em aquíferos subjacentes a zonas urbanas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n.4, p. 255-265, 2013.

ALAMY FILHO, J. E.; SALLA, M. R. **Estudo de impactos ambientais em curso de água natural pela urbanização na bacia do Córrego Lageado**. Relatório –CODAU, 2015.

BEST J.L, REID I. **Separation zone at open-channel junctions**. ASCE J Hydr Eng 1984;110 (11):1588–94.

BLADÉ E.; VALENTÍN G. M.; DOLZ J.; HERNÁNDEZ A. J. L. A.; CORESTEIN G.; JUNY M. S. **Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels**. Revista Advances in Water Resources 42, 17–29, 2012.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS, **River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. P.417 Computer program documentation. Version 4.1, 2010.

CAIXETA, A. C. M. - **Simulações computacionais para estimativa da influência do crescimento urbano na formação de zonas inundáveis adjacentes ao córrego do monjolo, em Patos de Minas, MG**. 226f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARBALLA, B. L. - **Combining flow in open channel and blockage phenomenon**, Internal report RSH 43-79-49, Hydraulic Division, Hydro-Quebec, Montreal, 1979.

CARRIJO, B. R.; BACCARO, C. A. D. **Análise sobre a erosão hídrica na área urbana de Uberlândia (MG)**. Revista Caminhos da Geografia, Uberlândia, n. 1, v. 2, dez. 2000. p. 70-83.  
CASTRO A.L.C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. Civil SEDEC. 5ª edição, editado em 2005.

CHANSOON, H. - **The hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**. Second Edition. Department of Civil and Environmental Engineering University of Queensland, Austrália. Elsevier, 2004.

CHAUDHRY, M. H. - **Open Channel Flow**. Second Edition. Department of Civil and Environmental Engineering University of South Carolina. Springer Science Business Media, LLC, 2008.

CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: Editora McGraw-Hill Book Company. Editado em 1959.

CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: Editora McGraw-Hill Book Company. Reeditado em 1988.

GRIBBIN, J. E. - **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. 3ªed. São Paulo. Ed. Cengage Learning, 2009.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**, London: MacMillan, 522 pg, 1966.

KESSERWANI, G. *et al.* **Simulation of subcritical flow at a combining junction**. Novatech. Institut National des Sciences Appliques, France 2008.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.DE O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.S.F.; RUDORFF, F.M.; **Prevenção de desastres naturais- Conceitos básicos**; Ed. Organic Trading, 1ª Edição, Curitiba, PR, pp109, 2006

LIMA, G; VELASQUEZ J. A. **Modelagem Numérica Bidimensional Aplicada a Hidráulica de Pontes**. Artigo 20 p. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

MELO, E. F. **Considerações sobre a hidráulica de canais fluviais e de canais de maré**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 3 n.2 Abr/Jun 1998, 95-107.

MODI P.N, ARIEL P.D, DANDEKAR M.M. **Conformal mapping for channel junction flow**. ASCE J Hydr Div 1981;107(12): 1713–33.

MOGLEN, G. E... Editora CRC Press. Editado em 24 abril de 24, 2013.

NEVES, L. A. **A comparação entre duas condições de contorno num modelo não permanente unidimensional, aplicado ao esvaziamento de um canal retangular**. Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo na Área Hidráulica e Saneamento, 1999.

PAIVA, R.C.D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação de Mestrado, IPH-UFRGS. p.182. 2009.

PORTO, R. M. - **Hidráulica Básica**. 2ª ed. São Carlos-SP. Projeto REENGE. Ed. EESC-USP, 1999.

RAMAMURTHY A.S. CARBALLADA LB, TRAN D.M. **Combining open-channel flow at right angled junctions**. ASCE J Hydr Eng 1988;114(12):1449–60.

RASHWAN, I.M.H. - **Dynamic Model for Subcritical dividing Flows Open Channel Junction**. Alexandria, Egypt, 2004.

REZENDE G. B. M. **Modelo Hidrológico e hidráulico para estimativa e delimitação de áreas inundadas: uma ferramenta de auxílio à elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana.** Dissertação de mestrado, fevereiro 2012.

ROCHA, H. L. **Propagação de onda de cheia em canais simplificados: estudo comparativo de modelo hidrodinâmico e Muskingum-Cunge.** Trabalho de conclusão do curso de engenharia sanitária ambiental, Florianópolis –SC, 2008.

SOUSA M. M. **comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

SULEIMAN, H, C. - **Mapeamento preliminar de áreas urbanas de inundação.**162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos-UFSCAR. São Carlos, 2006.

TAYLOR, E. H. - **Flow characteristics at rectangular open chanel junctions**, transactions, ASCE, Vol. 109, pp. 893-912. 1944.

TORRES. J. L. R. et. al. **Avaliação das Características Morfológicas e Hidrológicas da Microbacia Do Córrego Buracão, Afluente do Rio Uberaba.** Instituto de Geografia da UFU, editado em 2009.

TRAN, D. M. - **Junction Flow in Open Channel.** 145f. Thesis of Doctor of Philosophy. The Department of Civil Engineering. Montreal, Quebec, Canada, 1988.

THOMAZ, P. - **Junção, Derivação em Canais e Canais Laterais.** 93f. Curso de Manejo de Águas Pluviais. Brasil, 2012.

TUCCI, C.E.M. **Hydraulic and Water Quality Model for a River Network.** PhD dissertation, Colorado State University, Fort Collins, USA. 1978.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. Universidade: UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. p. 669, 2005.

VASQUEZ, J.A.; WALSH, B.W. (2009). “**CFD Simulation of Local Scour in Complex Piers Under Tidal Flow**”, IAHR Conference, Vancouver, Canada 2009.

WEBBER N.B. GREATER C.A. **An investigation of flow behaviour at the junction of rectangular channels.** Proc Inst Civil Eng 1966;34:321–34 (London).

# APÊNDICE

## Apêndice A

### CÓDIGO EM VISUAL BASIC PARA O CÁLCULO DO MDTHC SUAVIZAÇÃO DO CANAL ANALISADO

```

Sub MDTHC1()
'=====
' FILTRAGEM PARA CORREÇÃO DO MODELO DIGITAL DE TERRENO
' Filtro 1: média de 2 pontos
'=====

'VETORES E MATRIZES:
'~~~~~
Dim x(5000), y(5000), z(5000), zf(5000) As Double

'LEITURA DO MDT ORIGINAL (SEM CORREÇÕES):
'~~~~~
Sheets("1").Range(Cells(2, 7), Cells(65500, 9)).ClearContents
Sheets("1").Range(Cells(2, 5), Cells(65500, 5)).ClearContents
Sheets("1").Activate
For i = 1 To 10000
    If (Cells(i + 2, 3) = "") Then
        Exit For
    End If
Next
Nx = i - 1

k = 1

For j = 1 To Nx
    x(j) = Sheets("1").Cells(k + 1, 2)
    y(j) = Sheets("1").Cells(k + 1, 3)
    z(j) = Sheets("1").Cells(k + 1, 4)
    k = k + 1
Next
'FILTRAGEM:
'~~~~~
iterações = 1000
tolerância = 0.005      ' 5 mm
k = 1
Do
    ocorrências = 0
    norma = 0
    For j = 1 To Nx
        If (j > 1 And j < Nx) Then
            If (z(j) > z(j - 1)) Then
                zf(j) = 0.5 * (z(j - 1) + z(j + 1))
                ocorrências = ocorrências + 1
                dife = Abs(zf(j) - z(j))
                z(j) = zf(j)
                norma = norma + dife
            End If
        End If
    Next
    Sheets("1").Cells(k + 1, 7) = k
    Sheets("1").Cells(k + 1, 8) = ocorrências
    Sheets("1").Cells(k + 1, 9) = norma

```

```
k = k + 1
ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 9").Activate
Range("G2").Select
DoEvents
Loop Until (k > iterações Or ocorrências = 0 Or norma < tolerância)

'MODELO DIGITAL DE TERRENO HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO:
'~~~~~
k = 1
For i = 1 To Nx
    Sheets("1").Cells(k + 1, 5) = z(i)
    k = k + 1
Next

End Sub
```

# Apêndice B

## CÓDIGO EM VISUAL BASIC PARA O CÁLCULO DO COMPRIMENTO DO CANAL ANALISADO

```
Sub Comprimento1()  
'=====   
' CÁLCULO DO COMPRIMENTO TOTAL DO CANAL A PARTIR DE DADOS AMOSTRAIS  
'=====   
Dim xa(500), ya(500), za(500), La(500), Sa(500) As Double  
Sheets("1").Activate  
ind = 1  
  
'LEITURA DOS DADOS AMOSTRAIS:  
While (Cells(2 + ind, 4) <> "")  
    xa(ind) = Cells(2 + ind, 4)  
    ya(ind) = Cells(2 + ind, 5)  
    za(ind) = Cells(2 + ind, 6)  
    ind = ind + 1  
Wend  
NA = ind - 1  
  
'COMPRIMENTOS E DECLIVIDADES ENTRE AMOSTRAS:  
soma = 0  
For i = 1 To NA  
    If (i > 1) Then  
        La(i) = Sqr((xa(i) - xa(i - 1)) ^ 2 + (ya(i) - ya(i - 1)) ^ 2)  
        dist = Sqr((xa(i) - xa(i - 1)) ^ 2 + (ya(i) - ya(i - 1)) ^ 2)  
        Sa(i) = (za(i) - za(i - 1)) / dist  
    Else  
        La(i) = 0  
        dist = Sqr((xa(i + 1) - xa(i)) ^ 2 + (ya(i + 1) - ya(i)) ^ 2)  
        Sa(i) = (za(i + 1) - za(i)) / dist  
    End If  
    soma = La(i) + soma  
  
    'SAÍDA:  
    Cells(2 + i, 7) = soma  
    Cells(2 + i, 8) = Sa(i)  
Next  
Cells(1, 8) = soma  
End Sub
```

# Apêndice C

## CÓDIGO EM VISUAL BASIC PARA DISCRETIZAÇÃO DO CANAL ANALISADO

```

Sub Discretizaçãool()
'=====
' DISCRETIZAÇÃO DO CANAL: cálculos para canal de seção TRAPEZOIDAL
'=====
Dim La(500), Sa(500), Ba(500), Hca(500), NA(500), Bsa(500) As Double
Dim naM2md(500), naM3md(500), naM2me(500), naM3me(500) As Double
Dim Laappmd(500), Laappme(500), Lappmd(10000), Lappme(10000) As Double
Dim xa(500), ya(500), za(500) As Double
Dim L(10000), s(10000), b(10000), Hc(10000), n(10000), Bs(10000) As Double
Dim nM2md(10000), nM3md(10000), nM2me(10000), nM3me(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000) As Double
Dim La_(500) As Double
Pi = 3.141593
Sheets("1").Activate
N1 = Cells(3, 26)
Range(Cells(3, 27), Cells(60000, 42)).ClearContents

'LEITURAS DE COORDENADAS E DECLIVIDADES:
i = 1
xamin = 100000000000#
yamin = 100000000000#
yamax = -100000000000#
xamax = -100000000000#
While (Sheets("1").Cells(2 + i, 4) <> "")
    xa(i) = Cells(2 + i, 4)
    ya(i) = Cells(2 + i, 5)
    za(i) = Cells(2 + i, 6)
    La(i) = Cells(2 + i, 7)
    Sa(i) = Cells(2 + i, 8)
    If (xa(i) < xamin) Then
        xamin = xa(i)
    End If
    If (ya(i) < yamin) Then
        yamin = ya(i)
    End If
    If (xa(i) > xamax) Then
        xamax = xa(i)
    End If
    If (ya(i) > ymax) Then
        ymax = ya(i)
    End If
    i = i + 1
Wend
Nal = i - 1

'LEITURAS DE DADOS GEOMÉTRICOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS:
i = 1
While (Sheets("1").Cells(i + 16, 10) <> "")
    La_(i) = Cells(16 + i, 10)
    Ba(i) = Cells(16 + i, 11)
    Hca(i) = Cells(16 + i, 13)
    NA(i) = Cells(16 + i, 16)
    Bsa(i) = Cells(16 + i, 12)
    naM2md(i) = Cells(16 + i, 17)
    naM2me(i) = Cells(16 + i, 18)
    naM3md(i) = Cells(16 + i, 19)
    naM3me(i) = Cells(16 + i, 20)
    Laappmd(i) = Cells(16 + i, 14)
    Laappme(i) = Cells(16 + i, 15)
    i = i + 1
Wend

```

```

Na2 = i - 1
Lfinal = Cells(1, 8)
Cells(16 + Na2, 10) = Lfinal

'DETERMINANDO O MENOR ESPAÇAMENTO ENTRE PONTOS AMOSTRAIS:
dLamin = 10000
For j = 1 To (Na1 - 1)
    espaç = La(j + 1) - La(j)
    If (espaç < dLamin) Then
        dLamin = espaç
    End If
Next

'DISCRETIZAÇÃO DE COORDENADAS E COMPRIMENTOS:
dL = Lfinal / (N1 - 1)
Cells(7, 26) = dL
i = 1 'seção discreta
L(1) = 0
j = 1 'seção de leitura
While (L(i - 1) < Lfinal)
    L(i) = dL * (i - 1)
    mr = (ya(j + 1) - ya(j)) / (xa(j + 1) - xa(j))
    numerador = (ya(j + 1) - ya(j))
    denominador = (xa(j + 1) - xa(j))
    If (numerador > 0 And denominador > 0) Then 'primeiro quadrante
        ang = Atn(mr)
    ElseIf (numerador > 0 And denominador < 0) Then 'segundo quadrante
        ang = Pi - Abs(Atn(mr))
    ElseIf (numerador < 0 And denominador < 0) Then 'terceiro quadrante
        ang = Pi + Abs(Atn(mr))
    ElseIf (numerador < 0 And denominador > 0) Then 'quarto quadrante
        ang = 2 * Pi - Abs(Atn(mr))
    End If
    x(i) = xa(j) + (L(i) - La(j)) * Cos(ang)
    y(i) = ya(j) + (L(i) - La(j)) * Sin(ang)
    s(i) = Sa(j)
    Sheets("1").Cells(i + 2, 27) = x(i)
    Sheets("1").Cells(i + 2, 28) = y(i)
    Sheets("1").Cells(i + 2, 30) = L(i)
    Sheets("1").Cells(i + 2, 31) = s(i)
    If (L(i) >= La(j + 1)) Then
        j = j + 1
    End If
    i = i + 1
Wend
Ndis = i - 1
i = 1
j = 1
While (L(i) < Lfinal)
10    If (L(i) < La(j)) Then
        z(i) = za(j) + Sa(j) * (L(i) - La(j))
        Sheets("1").Cells(i + 2, 29) = z(i)
        i = i + 1
    Else
        j = j + 1
        GoTo 10
    End If
Wend
Sheets("1").Cells(i + 2, 29) = za(j)

'DISCRETIZAÇÃO DA GEOMETRIA DAS SEÇÕES:
La_(Na2) = Lfinal
i = 1
j = 1
While (L(i) < Lfinal)
20    If (L(i) < La_(j + 1)) Then
        b(i) = (L(i) - La_(j)) / (La_(j + 1) - La_(j)) * (Ba(j + 1) - Ba(j)) + Ba(j)
        n(i) = NA(j)
        nM2md(i) = naM2md(j)
        nM2me(i) = naM2me(j)
        nM3md(i) = naM3md(j)
        nM3me(i) = naM3me(j)
        Hc(i) = (L(i) - La_(j)) / (La_(j + 1) - La_(j)) * (Hca(j + 1) - Hca(j)) + Hca(j)
        Bs(i) = (L(i) - La_(j)) / (La_(j + 1) - La_(j)) * (Bsa(j + 1) - Bsa(j)) + Bsa(j)
    End If
    i = i + 1
    j = j + 1
Wend

```



```

        Lappmd(i) = (L(i) - La_(j)) / (La_(j + 1) - La_(j)) * (Laappmd(j + 1) - Laappmd(j)) +
Laappmd(j)
        Lappme(i) = (L(i) - La_(j)) / (La_(j + 1) - La_(j)) * (Laappme(j + 1) - Laappme(j)) +
Laappme(j)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 32) = b(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 34) = Hc(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 36) = n(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 35) = z(i) - Hc(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 33) = Bs(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 37) = nM2md(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 38) = nM2me(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 39) = nM3md(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 40) = nM3me(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 41) = Lappmd(i)
        Sheets("1").Cells(i + 2, 42) = Lappme(i)
        i = i + 1
    Else
        j = j + 1
    GoTo 20
End If
Wend
Sheets("1").Cells(i + 2, 32) = Ba(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 34) = Hca(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 35) = za(Na1) - Hca(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 36) = NA(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 33) = Bsa(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 37) = naM2md(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 38) = naM2me(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 39) = naM3md(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 40) = naM3me(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 41) = Laappmd(Na2)
Sheets("1").Cells(i + 2, 42) = Laappme(Na2)

'AJUSTE DA ESCALA DOS GRÁFICOS:
'PLANTA:
    ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 15").Activate
    ActiveChart.Axes(xlCategory).Select
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MinimumScale = xamin
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MaximumScale = xamax
    ActiveChart.Axes(xlValue).MinimumScale = yamin
    ActiveChart.Axes(xlValue).MaximumScale = yamax
'PERFIL:
    ActiveSheet.ChartObjects("Gráfico 16").Activate
    ActiveChart.Axes(xlCategory).Select
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MinimumScale = 0
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MaximumScale = Lfinal
Sheets("1").Cells(4, 1).Select
End Sub

```

# Apêndice D

## CÓDIGO EM VISUAL BASIC PARA RESOLUÇÃO DAS CURVAS-CHAVE

```

Private Sub CommandButton1_Click()
'=====
' CONSTRUÇÃO DAS CURVAS: A = f(h), Pm = f (h), n = f(h)
'=====
'DECLARAÇÃO DE MATRIZES E VETORES:
'~~~~~
'Curso de água:
Dim So(10000) As Double
Dim L(10000), Bo(10000), Bos(10000), b(10000), Hc(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000), zo(10000) As Double
Dim n_M1(10000), n_M2_d(10000), n_M3_d(10000), nc(10000) As Double
Dim n_M2_e(10000), n_M3_e(10000), Lapp_d(10000), Lapp_e(10000) As Double

'Malha de vizinhança:
Dim xt(1020, 1020), yt(1020, 1020), zt(1020, 1020) As Double
Dim xdir, ydir, xesq, yesq As Double
Dim zdir, zesq As Double
Dim xdi(10000), ydi(10000), xes(10000), yes(10000) As Double

'Curva-chave A=f(h):
Dim hcc(10000, 300), Acc(10000, 300), ncc(10000, 300), Pcc(10000, 300), KK(10000, 300) As Double
'(seção do canal,nível de profundidade)
Dim Bsc(10000, 300) As Double '(largura superficial)

'Demais parâmetros:
Pi = 3.141593
dlat = 0.1
Ndis = Sheets("1").Cells(3, 26) 'incremento lateral para área de inundação
dL = Sheets("1").Cells(5, 26) 'número de nós da malha
Npcc = 150 'incremento espacial da malha
hccmax = 30 'número de profundidades para construção da curva-chave
dhcc = hccmax / (Npcc - 1) 'profundidade máxima para construção da curva-chave
'incremento vertical de profundidade para construção das
curvas-chaves

'IDENTIFICANDO O TAMANHO DA MALHA DE VIZINHANÇA:
i = 1
Nx = 1
Ny = 1
yprimeiro = Sheets("1").Cells(3, 23)
While (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) = yprimeiro)
    Nx = Nx + 1
    i = i + 1
Wend
i = 1
While (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) <> "")
    If (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) <> Sheets("1").Cells(i + 2, 23)) Then
        Ny = Ny + 1
    End If
    i = i + 1
Wend

'LEITURA DOS DADOS DA DISCRETIZAÇÃO:
'~~~~~
Sheets("1").Activate
i = 1
While (Cells(i + 2, 27) <> "")
    x(i) = Cells(i + 2, 27)
    y(i) = Cells(i + 2, 28)
    z(i) = Cells(i + 2, 29)
    L(i) = Cells(i + 2, 30)
    So(i) = Abs(Cells(i + 2, 31))
    Bo(i) = Cells(i + 2, 32)

```

```

Bos(i) = Cells(i + 2, 33)
Hc(i) = Cells(i + 2, 34)
zo(i) = z(i) - Hc(i)
n_M1(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 36) 'coef. de Manning para calha principal
n_M2_d(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 37) 'coef. de Manning para APP direita
n_M2_e(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 38) 'coef. de Manning para APP esquerda
n_M3_d(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 39) 'coef. de Manning para URB direita
n_M3_e(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 40) 'coef. de Manning para URB esquerda
Lapp_d(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 41) 'comprimento da APP direita
Lapp_e(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 42) 'comprimento da APP esquerda
i = i + 1
Wend

'LEITURA DA MALHA DE VIZINHANÇA:
'~~~~~
ind = 1
xto = 1E+30
yto = 1E+30
For i = 1 To Ny
For j = 1 To Nx
xt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 22)
yt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 23)
zt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 24)
If (xt(i, j) < xto) Then
xto = xt(i, j)
End If
If (yt(i, j) < yto) Then
yto = yt(i, j)
End If
ind = ind + 1
Next
Next
dx = xt(1, 2) - xt(1, 1)
dy = yt(2, 1) - yt(1, 1)

'ELABORAÇÃO DA CURVA-CHAVE PARA AS SEÇÕES DISCRETAS:
'~~~~~
'MsgBox ("CONSTRUINDO AS CURVAS-CHAVE...")
Sheets("3").Activate
Sheets("3").Range(Cells(1, 1), Cells(15000, 256)).ClearContents
Sheets("4").Activate
Sheets("4").Range(Cells(1, 1), Cells(15000, 256)).ClearContents
Sheets("1").Activate
contador = 0
For i = 1 To Ndis
somatório = 0
If (i < Ndis) Then
mr = (y(i + 1) - y(i)) / (x(i + 1) - x(i))
Else
mr = (y(i) - y(i - 1)) / (x(i) - x(i - 1))
End If
m1 = mr
m2 = -1 / mr
ang2 = Atn(m2)
For k = 1 To Npcc
hcc(i, k) = (k) * dhcc
NA = z(i) - Hc(i) + hcc(i, k)
'SEM TRANSBORDAMENTO:
'-----
If (hcc(i, k) <= Hc(i)) Then
alfa = Atn(Hc(i) / (0.5 * (Bos(i) - Bo(i))))
B_ = 2 * hcc(i, k) / Tan(alfa) + Bo(i)
Acc(i, k) = (B_ + Bo(i)) * hcc(i, k) / 2
Pcc(i, k) = Bo(i) + 2 * hcc(i, k) / Sin(alfa)
ncc(i, k) = n_M1(i)
Rh = Acc(i, k) / Pcc(i, k)
KK(i, k) = (ncc(i, k) / (Acc(i, k) * Rh ^ (2 / 3))) ^ -1
b(k) = Bos(i)
If (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no primeiro quadrante
xdi(k) = x(i) + B_ / 2 * Cos(ang2)
ydi(k) = y(i) + B_ / 2 * Sin(ang2)
xes(k) = x(i) - B_ / 2 * Cos(ang2)
yes(k) = y(i) - B_ / 2 * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no segundo quadrante
xdi(k) = x(i) + B_ / 2 * Cos(ang2)
ydi(k) = y(i) + B_ / 2 * Sin(ang2)
xes(k) = x(i) - B_ / 2 * Cos(ang2)

```

```

yes(k) = y(i) - B_ / 2 * Sin(ang2)
ElseIf (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no terceiro quadrante
xdi(k) = x(i) - B_ / 2 * Cos(ang2)
ydi(k) = y(i) - B_ / 2 * Sin(ang2)
xes(k) = x(i) + B_ / 2 * Cos(ang2)
yes(k) = y(i) + B_ / 2 * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no quarto quadrante
xdi(k) = x(i) - B_ / 2 * Cos(ang2)
ydi(k) = y(i) - B_ / 2 * Sin(ang2)
xes(k) = x(i) + B_ / 2 * Cos(ang2)
yes(k) = y(i) + B_ / 2 * Sin(ang2)
End If
End If
'COM TRANSBORDAMENTO:
'-----
If (hcc(i, k) > Hc(i)) Then
'MARGEM DIREITA:
'-----
ind = 1
Do
'Delta = Bos(i) / 2 + ind * dlat
Delta = ind * dlat
If (Delta > 500) Then
GoTo 5
End If
If (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no primeiro quadrante
xdir = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
ydir = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no segundo quadrante
xdir = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
ydir = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no terceiro quadrante
xdir = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
ydir = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no quarto quadrante
xdir = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
ydir = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
End If
'Interpolação por inverso da distância:
indx = Int((xdir - xto) / dx)
indy = Int((ydir - yto) / dy)
somal = 0
soma2 = 0
For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
dist = Sqr((xdir - xt(ky, kx)) ^ 2 + (ydir - yt(ky, kx)) ^ 2)
somal = somal + zt(ky, kx) / dist
soma2 = soma2 + 1 / dist
zdir = somal / soma2
End If
Next
Next
ind = ind + 1
Loop Until (NA < zdir)
xdi(k) = xdir
ydi(k) = ydir

'MARGEM ESQUERDA:
'-----
ind = 1
Do
'Delta = Bos(i) / 2 + ind * dlat
Delta = ind * dlat
If (Delta > 500) Then
GoTo 10
End If
If (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no primeiro quadrante
xesq = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
yesq = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no segundo quadrante
xesq = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
yesq = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no terceiro quadrante
xesq = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
yesq = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no quarto quadrante

```

```

        xesq = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
        yesq = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    End If
    'Interpolação por inverso da distância:
    indx = Int((xesq - xto) / dx)
    indy = Int((yesq - yto) / dy)
    soma1 = 0
    soma2 = 0
    For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
        If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
            dist = Sqr((xesq - xt(ky, kx)) ^ 2 + (yesq - yt(ky, kx)) ^ 2)
            soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
            soma2 = soma2 + 1 / dist
            zesq = soma1 / soma2
        End If
    Next
    Next
    ind = ind + 1
    Loop Until (NA < zesq)
    xes(k) = xesq
    yes(k) = yesq
10
    'CÁLCULOS DAS CURVAS PROPRIAMENTE DITOS:
    '-----
    b(k) = Sqr((xdi(k) - xes(k)) ^ 2 + (ydi(k) - yes(k)) ^ 2)
    Acc(i, k) = Acc(i, k - 1) + (b(k) + b(k - 1)) * dhcc / 2
    'Bdir_ac = Bdir + Sqr((xdi(k) - xdi(k - 1)) ^ 2 + (ydi(k) - ydi(k - 1)) ^ 2)
    Bdir_ac = Sqr((xdi(k) - x(i)) ^ 2 + (ydi(k) - y(i)) ^ 2) - Bos(i) / 2
    'Besq_ac = Besq + Sqr((xes(k) - xes(k - 1)) ^ 2 + (yes(k) - yes(k - 1)) ^ 2)
    Besq_ac = Sqr((xes(k) - x(i)) ^ 2 + (yes(k) - y(i)) ^ 2) - Bos(i) / 2
    Bdir = Sqr((xdi(k) - xdi(k - 1)) ^ 2 + (ydi(k) - ydi(k - 1)) ^ 2)
    Besq = Sqr((xes(k) - xes(k - 1)) ^ 2 + (yes(k) - yes(k - 1)) ^ 2)
    Pcc(i, k) = Pcc(i, k - 1) + Sqr(dhcc ^ 2 + Bdir ^ 2) + Sqr(dhcc ^ 2 + Besq ^ 2)
    Pcalha = Bo(i) + 2 * Hc(i) / Sin(alfa)
    If (Bdir_ac <= Lapp_d(i) And Besq_ac <= Lapp_e(i)) Then
        ncc(i, k) = 1 / Sqr(Pcc(i, k)) * Sqr(Pcalha * n_M1(i) ^ 2 + Bdir_ac * n_M2_d(i)
^ 2 + Besq_ac * n_M2_e(i) ^ 2)
    ElseIf (Bdir_ac <= Lapp_d(i) And Besq_ac > Lapp_e(i)) Then
        ncc(i, k) = 1 / Sqr(Pcc(i, k)) * Sqr(Pcalha * n_M1(i) ^ 2 + Bdir_ac * n_M2_d(i)
^ 2 + Lapp_e(i) * n_M2_e(i) ^ 2 + (Besq_ac - Lapp_e(i)) * n_M3_e(i) ^ 2)
    ElseIf (Bdir_ac > Lapp_d(i) And Besq_ac <= Lapp_e(i)) Then
        ncc(i, k) = 1 / Sqr(Pcc(i, k)) * Sqr(Pcalha * n_M1(i) ^ 2 + Lapp_d(i) * n_M2_d(i)
^ 2 + Lapp_e(i) * n_M2_e(i) ^ 2 + (Bdir_ac - Lapp_d(i)) * n_M3_d(i) ^ 2)
    ElseIf (Bdir_ac > Lapp_d(i) And Besq_ac > Lapp_e(i)) Then
        ncc(i, k) = 1 / Sqr(Pcc(i, k)) * Sqr(Pcalha * n_M1(i) ^ 2 + Lapp_d(i) * n_M2_d(i)
^ 2 + Lapp_e(i) * n_M2_e(i) ^ 2 + (Bdir_ac - Lapp_d(i)) * n_M3_d(i) ^ 2 + (Besq_ac - Lapp_e(i))
* n_M3_e(i) ^ 2)
    End If
    Rh = Acc(i, k) / Pcc(i, k)
    KK(i, k) = (ncc(i, k) / (Acc(i, k) * Rh ^ (2 / 3))) ^ -1
    Bsc(i, k) = Bdir_ac + Besq_ac + Bos(i)

End If
'ANEXAÇÕES:
'-----
Sheets("3").Cells(i + 1, 2) = L(i)
Sheets("3").Cells(1, k + 2) = hcc(i, k)
Sheets("3").Cells(i + 1, k + 2) = Acc(i, k)
Sheets("4").Cells(i + 1, 2) = L(i)
Sheets("4").Cells(1, k + 2) = hcc(i, k)
Sheets("4").Cells(i + 1, k + 2) = Pcc(i, k)
Sheets("2").Cells(i + 1, 2) = L(i)
Sheets("2").Cells(1, k + 2) = hcc(i, k)
Sheets("2").Cells(i + 1, k + 2) = ncc(i, k)
Sheets("5").Cells(i + 1, 2) = L(i)
Sheets("5").Cells(1, k + 2) = hcc(i, k)
Sheets("5").Cells(i + 1, k + 2) = KK(i, k)
Sheets("5A").Cells(1, k + 2) = hcc(i, k)
Sheets("5A").Cells(i + 1, k + 2) = Bsc(i, k)

'CONTROLE DE SAÍDA NO FORMULÁRIO:
'-----
contador = contador + 1
andamento = contador / (Npcc * Ndis) * 100
UserForm2.TextBox1.Value = andamento
DoEvents 'habilita a atualização do formulário

```

```
Next
Next
Sheets("3").Cells(1, 2) = "A = f (h) "
Sheets("4").Cells(1, 2) = "Pm = f (h) "
Sheets("2").Cells(1, 2) = "n Manning = f (h) "
Sheets("5").Cells(1, 2) = "K = f (h) "
Sheets("5A").Cells(1, 2) = "Bs = f (h) "
UserForm2.Hide
ActiveWorkbook.Save
End Sub
```

# Apêndice E

## CÓDIGO EM VISUAL BASIC PARA RESOLUÇÃO DO STANDARD STEP METHOD

```

Sub STANDARDSTEPMETHOD()
'=====
' CÁLCULO DE CAMPOS HIDRODINÂMICOS NO CANAL PRINCIPAL
' CONDIÇÃO DE REGIME PERMANENTE E VARIADO
'=====

Sheets("9").Activate
Range(Cells(3, 4), Cells(600000, 40)).ClearContents

'MATRIZES E VETORES:
'=====
'Curso de água:
Dim A(10000) As Double
Dim P(10000) As Double
Dim Q(10000) As Double
Dim V(10000) As Double
Dim ql(10000) As Double
Dim So(10000) As Double
Dim h(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000), zo(10000) As Double
Dim Bo(10000), Hc(10000), b(10000), Bos(10000) As Double
Dim L(10000) As Double
Dim tau(10000) As Double
Dim Bs(10000) As Double
Dim tensão(1000000) As Double
Dim nMann(10000) As Double
Dim teta(10000) As Double
Dim hcr(10000) As Double

'Malha de vizinhança:
Dim xt(1024, 1024), yt(1024, 1024), zt(1024, 1024) As Double
Dim xdir, ydir, xesq, yesq As Double
Dim zdir, zesq As Double
Dim xdi(10000), ydi(10000), xes(10000), yes(10000) As Double
Dim dvert(1000000) As Double

'Sub-bacias com contribuições pontuais e hidrogramas introduzidos por série sintética:
Dim Linj(100) As Double
Dim Qinj(100) As Double

'Sub-bacias com contribuições difusas e hidrogramas introduzidos por série sintética:
Dim Ldo(100), Ldf(100) As Double
Dim qlinj(100) As Double

'Vetores que armazenam dados de inundação:
Dim xin(1000000), yin(1000000), zin(1000000), dvein(1000000) As Double
Dim Atransb(10000), Atransbo(10000) As Double
Dim xdirenv(10000), ydirenv(10000) As Double
Dim xesqenv(10000), yesqenv(10000) As Double
Dim distesqmax(10000), distdirmax(10000) As Double
Dim velox(1000000) As Double
Dim terrain(1000000), água(1000000) As Double

'Curvas-chave:
Dim Acc(10000, 300), hcc(10000, 300), Pcc(10000, 300), ncc(10000, 300), Kcc(10000, 300) As Double
Dim Bsc(10000, 300) As Double

```

```

'Afluentes:
Dim xafl(50, 100), yafl(50, 100) As Double '(canal, seção do canal)

'Vertedores intermediários:
Dim xvert(100), yvert(100), Lvert(100), Pvert(100) As Double

'Outras variáveis e parâmetros:
Pi = 3.141593
Ndis = Sheets("1").Cells(3, 26)      'número de nós da malha

dL = Sheets("1").Cells(7, 26)        'incremento espacial da malha
Lf = Sheets("1").Cells(1, 8)         'comprimento do canal
Qini = Sheets("1").Cells(5, 26)      'vazão inicial de regime permanente
dlat = 1#                            'incremento lateral para cálculo de áreas inundadas
fator_hidr = 0                       'intervalo para anexação de resultados hidrodinâmicos
fator_alag = 0                       'intervalo para anexação de resultados de alagamentos
hjus = 1.6167                        'profundidade do contorno de jusante calculada por
Manning(m)
inu = 1

'LEITURA DAS CURVAS-CHAVE:
'=====
i = 1
While (Sheets("3").Cells(1, i + 2) <> "")
    i = i + 1
Wend
Npcc = (i - 1)

For i = 1 To Ndis
    For k = 1 To Npcc
        hcc(i, k) = Sheets("3").Cells(1, k + 2)
        Acc(i, k) = Sheets("3").Cells(i + 1, k + 2)
        Pcc(i, k) = Sheets("4").Cells(i + 1, k + 2)
        ncc(i, k) = Sheets("2").Cells(i + 1, k + 2)
        Kcc(i, k) = Sheets("5").Cells(i + 1, k + 2)
        Bsc(i, k) = Sheets("5A").Cells(i + 1, k + 2)
    Next
Next

'LEITURA DA MALHA DE VIZINHANÇA:
'=====
'Identificando o tamanho da malha de vizinhança:
i = 1
Nx = 1
Ny = 1
yprimeiro = Sheets("1").Cells(3, 23)
While (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) = yprimeiro)
    Nx = Nx + 1
    i = i + 1
Wend
i = 1
While (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) <> "")
    If (Sheets("1").Cells(i + 3, 23) <> Sheets("1").Cells(i + 2, 23)) Then
        Ny = Ny + 1
    End If
    i = i + 1
Wend
'Leitura da malha propriamente dita:
ind = 1
xto = 1E+30
yto = 1E+30
For i = 1 To Ny
    For j = 1 To Nx
        xt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 22)
        yt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 23)
        zt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 2, 24)
        If (xt(i, j) < xto) Then
            xto = xt(i, j)
        End If
        If (yt(i, j) < yto) Then
            yto = yt(i, j)
        End If
        ind = ind + 1
    Next
Next

```



```

Next
dx = xt(1, 2) - xt(1, 1)
dy = yt(2, 1) - yt(1, 1)

'LEITURA DOS DADOS DA DISCRETIZAÇÃO e HIDRODINÂMICOS INICIAIS:
'=====
i = 1
While (Sheets("1").Cells(i + 2, 27) <> "")
    x(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 27)
    y(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 28)
    z(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 29) 'cota do terreno
    L(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 30)
    Bo(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 32)
    Hc(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 34)
    Bos(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 33)
    zo(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 35) 'cota de fundo do canal
    nMann(i) = Sheets("1").Cells(i + 2, 36) 'coef. de Manning da calha principal
    teta(i) = Atn(Hc(i) / (0.5 * (Bos(i) - Bo(i))))
    distesqmax(i) = 0
    distdirmax(i) = 0
    xesqenv(i) = x(i)
    yesqenv(i) = y(i)
    xdirenv(i) = x(i)
    ydirenv(i) = y(i)
    xdi(i) = x(i)
    xes(i) = x(i)
    ydi(i) = y(i)
    yes(i) = y(i)
    Q(i) = 0 'inicializando as vazões do canal
    i = i + 1
Wend
'Cálculo das declividades de fundo do canal:
For i = 1 To Ndis
    If (i < Ndis) Then
        So(i) = Abs(zo(i + 1) - zo(i)) / dL
    Else
        So(i) = So(i - 1)
    End If
Next
'LEITURA DOS HIDROGRAMAS SINTÉTICOS DAS SUB-BACIAS PONTUAIS:
'=====
'Identificando a quantidade de sub-bacias pontuais cadastradas:
i = 1
Npontuais = 0
While (Sheets("8").Cells(9, 3 + i) <> "")
    i = i + 1
Wend
Npontuais = i - 1
'Leitura do hidrograma
linha = 2 + 8
For j = 1 To Npontuais
    Linj(j) = Sheets("6").Cells(j + 2, 6)
    Qinj(j) = Sheets("8").Cells(linha, j + 3)
Next
'LEITURA DOS HIDROGRAMAS SINTÉTICOS DAS SUB-BACIAS DIFUSAS:
'=====
'Identificando a quantidade de sub-bacias difusas cadastradas:
i = 1
Ndifusas = 0
While (Sheets("8").Cells(9, 37 + i) <> "")
    i = i + 1
Wend
Ndifusas = i - 1
'Leitura do hidrograma
linha = Nminuto + 8
For j = 1 To Ndifusas
    Ldo(j) = Sheets("7").Cells(j + 2, 6)
    Ldf(j) = Sheets("7").Cells(j + 2, 7)
    qlinj(j) = Sheets("8").Cells(linha, j + 29) / (Ldf(j) - Ldo(j))
Next

```

```

'IDENTIFICAÇÃO DAS VAZÕES NOS DIFERENTES TRECHOS DO CANAL PRINCIPAL:
'=====
'Acumulando as contribuições pontuais:
ip = 1
Qac = Qini
For i = 1 To Ndis
    If (L(i) >= Linj(ip) And ip <= Npontuais) Then
        Qac = Qac + Qinj(ip)
        ip = ip + 1
        If (ip > Npontuais) Then
            Qac = Qac
        End If
    End If
    Q(i) = Qac
    Sheets("9").Cells(i + 2, 4) = L(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 8) = Q(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 4) = L(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 5) = zo(i)

    'Profundidades críticas para as seções (retangulares):
    'hcr(i) = (Q(i) ^ 2 / (9.81 * Bo(i) ^ 2)) ^ (1 / 3)
Next

'Acrescentando as contribuições difusas e acumulando as vazões de trechos sucessivos:
For j = 1 To Ndifusas
    For i = 1 To Ndis
        If (L(i) >= Ldo(j) And L(i) <= Ldf(j)) Then
            Q(i) = Q(i) + Abs(L(i) - Ldo(j)) * qlinj(j)
        End If
        Sheets("9").Cells(i + 2, 10) = Q(i)
    Next
Next

'ESTIMATIVA DAS PROFUNDIDADES CRÍTICAS NAS DIFERENTES SEÇÕES
'=====
Sheets("hcr").Activate
For i = 1 To Ndis
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 3) = x(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 4) = y(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 5) = L(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 6) = Q(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 7) = Bo(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 8) = Bos(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 9) = Hc(i)
    Sheets("hcr").Cells(i + 1, 13).GoalSeek Goal:=1, ChangingCell:=Cells(i + 1, 12)
    hcr(i) = Sheets("hcr").Cells(i + 1, 12)
    'Profundidades críticas para as seções (retangulares):
    'hcr(i) = (Q(i) ^ 2 / (9.81 * Bo(i) ^ 2)) ^ (1 / 3)

Next
Sheets("9").Activate

'IDENTIFICAÇÃO DE VERTEDORES INTERMEDIÁRIOS:
'-----
i = 1
While (Sheets("vertedor").Cells(i + 1, 4) <> "")
    xvert(i) = Sheets("vertedor").Cells(i + 1, 4)
    yvert(i) = Sheets("vertedor").Cells(i + 1, 5)
    Lvert(i) = Sheets("vertedor").Cells(i + 1, 6)
    Pvert(i) = Sheets("vertedor").Cells(i + 1, 7)
    i = i + 1
Wend
Nvert = i - 1

'STANDARD STEP METHOD: DE JUSANTE PARA MONTANTE
'=====
h(Ndis) = hjus
For i = (Ndis - 1) To 1 Step -1
    'Passo1 e passo2:
    If (h(i + 1) > Hc(i + 1)) Then
        For k = 1 To Npcc
            If (h(i + 1) > hcc(i + 1, k - 1) And h(i + 1) <= hcc(i + 1, k)) Then

```

```

        A1 = (h(i + 1) - hcc(i + 1, k - 1)) / (hcc(i + 1, k) - hcc(i + 1, k - 1)) *
(Acc(i + 1, k) - Acc(i + 1, k - 1)) + Acc(i + 1, k - 1)
        P1 = (h(i + 1) - hcc(i + 1, k - 1)) / (hcc(i + 1, k) - hcc(i + 1, k - 1)) *
(Pcc(i + 1, k) - Pcc(i + 1, k - 1)) + Pcc(i + 1, k - 1)
        nMann1 = (h(i + 1) - hcc(i + 1, k - 1)) / (hcc(i + 1, k) - hcc(i + 1, k - 1))
* (ncc(i + 1, k) - ncc(i + 1, k - 1)) + ncc(i + 1, k - 1)
        kkk1 = k - 1
        GoTo 14
    End If
Next
14
    Else
        A1 = (Bo(i + 1) * 2 + 2 * h(i + 1) / Tan(teta(i + 1))) * h(i + 1) / 2
        P1 = (Bo(i + 1) + 2 * h(i + 1) / Sin(teta(i + 1)))
        nMann1 = nMann(i + 1)
    End If
    Energial = zo(i + 1) + h(i + 1) + Q(i + 1) ^ 2 / (19.62 * A1 ^ 2)
    R1 = A1 / P1
    Sf1 = nMann1 ^ 2 * Q(i + 1) * Abs(Q(i + 1)) / (A1 * R1 ^ (2 / 3)) ^ 2
    B1 = Bo(i + 1) + 2 * h(i + 1) / Tan(teta(i + 1))
    F1 = (So(i + 1) - Sf1) / (1 + B1 * Q(i + 1) ^ 2 / (9.81 * A1 ^ 3))
    h(i) = h(i + 1) + F1 * (L(i) - L(i + 1))

'saindo do laço em caso de regime supercrítico:
If (h(i) <= hcr(i)) Then
    h2 = hcr(i)
    GoTo 18
End If

Do 'início do procedimento iterativo

'Passo3 e passo4:
If (h(i) > Hc(i)) Then
    For k = 1 To Npcc
        If (h(i) > hcc(i, k - 1) And h(i) <= hcc(i, k)) Then
            A2 = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
            P2 = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
            nMann2 = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (ncc(i, k) -
ncc(i, k - 1)) + ncc(i, k - 1)
            kkk2 = k - 1
            GoTo 16
        End If
    Next
16
    Else
        A2 = (Bo(i) * 2 + 2 * h(i) / Tan(teta(i))) * h(i) / 2
        P2 = (Bo(i) + 2 * h(i) / Sin(teta(i)))
        nMann2 = nMann(i)
    End If
    Energia2 = zo(i) + h(i) + Q(i) ^ 2 / (19.62 * A2 ^ 2)
    R2 = A2 / P2
    Sf2 = nMann2 ^ 2 * Q(i) * Abs(Q(i)) / (A2 * R2 ^ (2 / 3)) ^ 2
    B2 = Bo(i) + 2 * h(i) / Tan(teta(i))
    F2 = h(i) + Q(i) ^ 2 / (19.62 * A2 ^ 2) + 0.5 * Sf2 * (L(i) - L(i + 1)) + zo(i) - Energial
+ 0.5 * Sf1 * (L(i) - L(i + 1))

'Passo5:
dP2dh2 = (P2 - Pcc(i, kkk2)) / (h(i) - hcc(i, kkk2))
dR2dh2 = B2 / P2 - A2 / P2 ^ 2 * dP2dh2
dF2dh2 = 1 - Q(i) ^ 2 * B2 / (9.81 * A2 ^ 3) - (L(i) - L(i + 1)) * (Sf2 * B2 / A2 + 2 / 3
* Sf2 / R2 * dR2dh2)

'Passo6: Newton-Raphson
h2 = h(i) - F2 / dF2dh2

'saindo do laço em caso de regime supercrítico:
If (h2 <= hcr(i)) Then
    h2 = hcr(i)
    GoTo 18
End If

'Passo7:
dife = Abs(h2 - h(i))
If (dife > 0.01) Then

```

```

        h(i) = h2
        Froude = Q(i) / A2 / Sqr(9.81 * h(i))
    End If
    DoEvents

    Loop Until (dife < 0.01 Or Froude > 0.9) 'fim do procedimento iterativo

18
    'Profundidade calculada:
    h(i) = h2

    'Contornos internos para vertedores:
    For k = 1 To Nvert
        dist = Sqr((x(i) - xvert(k)) ^ 2 + (y(i) - yvert(k)) ^ 2)
        If dist < dL Then
            h(i) = Pvert(k) + (Q(i) / (1.55 * Lvert(k))) ^ (2 / 3)
            GoTo 7
        End If
    Next

7

    'If i = Nvert Then    'vertedor do praia
    '    h(i) = 3.1
    'End If

    If (h(i) > Hc(i)) Then
        For k = 1 To Npcc
            If (h(i) > hcc(i, k - 1) And h(i) <= hcc(i, k)) Then
                A(i) = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
                P(i) = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
                GoTo 17
            End If
        Next

17
        Else
            A(i) = (Bo(i) * 2 + 2 * h(i) / Tan(teta(i))) * h(i) / 2
            P(i) = (Bo(i) + 2 * h(i) / Sin(teta(i)))
        End If
        tau(i) = 9810 * A(i) / P(i) * Abs(Sf2)

        'ANEXAÇÃO DA hidrodinâmica:
        Sheets("9").Cells(i + 2, 4) = L(i)
        Sheets("9").Cells(i + 2, 5) = zo(i)
        If (h(i) <= 0) Then
            h(i) = h(i - 1)
            A(i) = A(i - 1)
        End If
        Sheets("9").Cells(i + 2, 6) = h(i)
        Sheets("9").Cells(i + 2, 7) = Q(i) / A(i)
        V(i) = Q(i) / A(i)
        Sheets("9").Cells(i + 2, 9) = A(i)
        'Cells(i + 3, 10) = V(i) / Sqr(9.81 * h(i))
        'Sheets("9").Cells(i + 2, 10) = Qpontual(i)
        Sheets("9").Cells(i + 2, 11) = tau(i)
        Sheets("9").Cells(i + 2, 12) = zo(i) + h(i)

        DoEvents

    Next i

    'ESTIMATIVA DE ALAGAMENTOS:
19
    For i = 1 To Ndis
        If (i < Ndis) Then
            mr = (y(i + 1) - y(i)) / (x(i + 1) - x(i))
        Else
            mr = (y(i) - y(i - 1)) / (x(i) - x(i - 1))
        End If
        m1 = mr
        m2 = -1 / mr
        ang2 = Atn(m2)
        NA = zo(i) + h(i)
        'COM TRANSBORDAMENTO:

```

```

'-----
If (h(i) > Hc(i)) Then
  'MARGEM DIREITA:
  '-----
  ind = 1
  Do
    'Delta = Bos(i) / 2 + ind * dlat
    Delta = ind * dlat
    If (Delta > 500) Then
      GoTo 35
    End If
    If (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no primeiro quadrante
      xdir = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
      ydir = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no segundo quadrante
      xdir = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
      ydir = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    ElseIf (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no terceiro quadrante
      xdir = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
      ydir = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no quarto quadrante
      xdir = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
      ydir = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    End If
    'Interpolação por inverso da distância:
    indx = Int((xdir - xto) / dx)
    indy = Int((ydir - yto) / dy)
    soma1 = 0
    soma2 = 0
    For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
      If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
        dist = Sqr((xdir - xt(ky, kx)) ^ 2 + (ydir - yt(ky, kx)) ^ 2)
        soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
        soma2 = soma2 + 1 / dist
        zdir = soma1 / soma2
      End If
    Next
  Next
  'coordenadas e profundidades de alagamento:
  If (NA >= zdir) Then
    xin(inu) = xdir
    yin(inu) = ydir
    dvert(inu) = NA - zdir
    tensão(inu) = tau(i)
    velox(inu) = V(i)
    terrain(inu) = zdir
    água(inu) = NA
    xdi(i) = xdir
    ydi(i) = ydir
  End If
  'If (Delta > 3 * dlat And dvert(inu) > dvert(inu - 1)) Then
  '  GoTo 35
  'End If
  inu = inu + 1
  ind = ind + 1
  Loop While (NA > zdir)
  'xdi(i) = xdir
  'ydi(i) = ydir

35

'MARGEM ESQUERDA:
'-----
ind = 1
Do
  'Delta = Bos(i) / 2 + ind * dlat
  Delta = ind * dlat
  If (Delta > 500) Then
    GoTo 40
  End If
  If (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no primeiro quadrante
    xesq = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
    yesq = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
  ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no segundo quadrante
    xesq = x(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
    yesq = y(i) - (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
  ElseIf (m1 > 0 And m2 < 0) Then 'canal no terceiro quadrante

```

```

        xesq = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
        yesq = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
        ElseIf (m1 < 0 And m2 > 0) Then 'canal no quarto quadrante
        xesq = x(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Cos(ang2)
        yesq = y(i) + (Bos(i) / 2 + Delta) * Sin(ang2)
    End If
    'Interpolação por inverso da distância:
    indx = Int((xesq - xto) / dx)
    indy = Int((yesq - yto) / dy)
    soma1 = 0
    soma2 = 0
    For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
        If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
            dist = Sqr((xesq - xt(ky, kx)) ^ 2 + (yesq - yt(ky, kx)) ^ 2)
            soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
            soma2 = soma2 + 1 / dist
            zesq = soma1 / soma2
        End If
    Next
Next
Next
If (NA >= zesq) Then
    xin(inu) = xesq
    yin(inu) = yesq
    dvert(inu) = NA - zesq
    tensão(inu) = tau(i)
    velox(inu) = V(i)
    terrain(inu) = zesq
    água(inu) = NA
    xes(i) = xesq
    yes(i) = yesq
End If
'If (Delta > 3 * dlat And dvert(inu) > dvert(inu - 1)) Then
'    Exit Do
'End If
inu = inu + 1
ind = ind + 1
Loop While (NA > zesq)
'xes(i) = xesq
'yes(i) = yesq
'envoltórias:
'B(i) = Sqr((xdi(i) - xes(i)) ^ 2 + (ydi(i) - yes(i)) ^ 2)
distesq = Sqr((xes(i) - x(i)) ^ 2 + (yes(i) - y(i)) ^ 2)
distdir = Sqr((xdi(i) - x(i)) ^ 2 + (ydi(i) - y(i)) ^ 2)
If (distesq > distesqmax(i)) Then
    xesqenv(i) = xes(i)
    yesqenv(i) = yes(i)
    distesqmax(i) = distesq
End If
If (distdir > distdirmax(i)) Then
    xdirenv(i) = xdi(i)
    ydirenv(i) = ydi(i)
    distdirmax(i) = distdir
End If

Else 'SEM TRANSBORDAMENTO
'xdi(i) = x(i)
'ydi(i) = y(i)
'xes(i) = x(i)
'yes(i) = y(i)
'xesqenv(i) = xes(i)
'yesqenv(i) = yes(i)
'xdirenv(i) = xdi(i)
'ydirenv(i) = ydi(i)
40
End If
Next

'ÁREAS TRANSBORDADAS DAS SEÇÕES E ÁREA ALAGADA EM PLANTA:
'~~~~~
Aalagada = 0
Valagado = 0
For i = 1 To Ndis
    For k = 1 To Npcc
        If (h(i) > Hc(i)) Then
            If (h(i) >= hcc(i, k - 1) And h(i) < hcc(i, k)) Then

```

```

        Bs(i) = (h(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Bsc(i, k) -
Bsc(i, k - 1)) + Bsc(i, k - 1)
    End If
    Else
        Bs(i) = 0
    End If
Next
Next
Aalagada = 0
For i = 1 To Ndis - 1
    Aalagada = Aalagada + (Bs(i) + Bs(i + 1)) * dL / 2
Next

```

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DA HIDRODINÂMICA:

'~~~~~

```

For i = 1 To Ndis
    'hidrodinâmica:
    Sheets("9").Cells(i + 2, 4) = L(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 5) = zo(i)
    If (h(i) <= 0 Or A(i) <= 0) Then
        h(i) = h(i - 1)
        A(i) = A(i - 1)
    End If
    'Sheets("9").Cells(i + 2, 6) = h(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 7) = Q(i) / A(i)
    'Sheets("9").Cells(i + 2, 8) = Q(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 9) = A(i)
    Cells(i + 3, 10) = V(i) / Sqr(9.81 * h(i))
    'Sheets("9").Cells(i + 2, 10) = Qpontual(i)
    'Sheets("9").Cells(i + 2, 11) = tau(i)
    'Sheets("9").Cells(i + 2, 12) = zo(i) + h(i)
    '
    'limites de inundação:
    Sheets("9").Cells(i + 2, 13) = xdi(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 14) = ydi(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 15) = xes(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 16) = yes(i)
Next

```

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DE INUNDAÇÕES:

'~~~~~

```

lin = 1
If (t >= talag) Then
    Sheets("9").Cells(lin + 2, 18) = Nmês
    Sheets("9").Cells(lin + 2, 19) = Aalagada / 1000000#
    Sheets("9").Cells(lin + 2, 20) = Valagado / 1000000#
    Sheets("9").Cells(lin + 2, 21) = Q(Ndis)
    talag = talag + fator_alag
    lin = lin + 1
End If

```

'ANEXAÇÕES DE PROFUNDIDADES DE ÁREAS INUNDADAS:

'~~~~~

```

Sheets("9").Range(Cells(3, 32), Cells(65000, 34)).ClearContents
Sheets("9").Cells(3, 30) = Aalagada
Sheets("9").Cells(3, 29) = Nminuto
For i = 1 To (inu - 1)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 32) = xin(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 33) = yin(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 34) = dvert(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 35) = tensão(i) / 1000 'kPa
    Sheets("9").Cells(i + 2, 36) = velox(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 37) = água(i)
    Sheets("9").Cells(i + 2, 38) = terrain(i)
Next
End Sub

```