



REQUALIFICAÇÃO FLUVIAL COMO INSTRUMENTO DE MINIMIZAÇÃO DO RISCO
DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO SESMARIA

Ana Caroline Pitzer Jacob

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez
André de Souza Avelar

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

REQUALIFICAÇÃO FLUVIAL COMO INSTRUMENTO DE MINIMIZAÇÃO DO RISCO
DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO SESMARIA

Ana Caroline Pitzer Jacob

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc.

Prof. André de Souza Avelar, D.Sc.

Prof. Cesar Augusto Pompêo, D.Sc.

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO DE 2013

Jacob, Ana Caroline Pitzer

Requalificação fluvial como instrumento de minimização do risco de inundações na bacia do rio sesmaria: UFRJ/COPPE, 2013.

X, 296 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

André de Souza Avelar

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 180 - 188

1. Requalificação fluvial. 2. MODCEL. 3. VALURI.
4. Cheias urbanas. I. Miguez, Marcelo Gomes *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, sem o qual eu nada seria e não teria forças para enfrentar os desafios e as dificuldades que surgem a cada dia. Não tenho palavras para expressar a minha eterna gratidão a Deus e ao seu amor para comigo em todos os momentos.

À minha família, especialmente aos meus pais Oswaldo Luiz e Eliane, por todo o amor, apoio e carinho, aos meus irmãos, Larissa Helena e Luiz Felipe, que tenho certeza, torceram muito por mim em todo este tempo; à minha tia Enir, por ter me recebido e por estar sempre torcendo pelo meu sucesso, ao meu primo Laurence, aos meus avós, tios e tias, primos e primas. Obrigada por todo o amor, pelo suporte e pela torcida!

Ao meu amor, Napoleão Moreira Delgado, companheiro sempre presente, inclusive nos trabalhos de campo, por todo o apoio que me deu nestes anos, pelo carinho, amor e muita compreensão em todos os momentos em que estive ausente ou estressada. Muito obrigada por me “suportar”, por sempre acreditar em mim e por me fazer acreditar!

Ao meu orientador, professor Marcelo Gomes Miguez, por ter acreditado em mim, por ter me ensinado tanto nestes anos e por todas as oportunidades que me proporcionou. Agradeço pela paciência e por toda a orientação, sem a qual eu não teria conseguido concluir este trabalho.

Ao meu orientador, professor André de Souza Avelar, por ter se disponibilizado a me ajudar e por todo o conhecimento transmitido durante este tempo.

Ao engenheiro Andrea Nardini, por todo apoio, toda a paciência e disponibilidade em me orientar. Sua ajuda foi essencial para a conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

Às amigas Luiza Ribeiro e Patrícia Nick, que foram essenciais no início deste trabalho. Muito obrigada pela ajuda e pela torcida!

Ao professor Virgílio Noronha, que colaborou desde o início e que sempre esteve disposto a ajudar. Obrigada pelo seu bom humor e por todo o apoio!

Às queridas amigas e companheiras de Mestrado e de trabalho, Monique e Juliana, que estiveram presentes desde o início. Vocês são um presente que o Mestrado me proporcionou. Obrigada por todo o apoio, pelas palavras de incentivo, pelos ouvidos sempre dispostos a me ouvir e por todos os momentos que dividimos!

À querida amiga e também companheira de casa por mais de 1 ano, Claudia. Muito obrigada por ter sido presente quando eu mais precisei, por todos os momentos que

passamos juntas, pelas palavras de motivação, pela companhia e, claro, por toda a ajuda!

Ao amigo Osvaldo, pela amizade e paciência, pelas caronas e pelo incentivo, e por estar sempre disposto a me ajudar. Sou muito grata a você, por tudo!

À querida amiga Bianca, por todo o carinho, torcida e pelos momentos de diversão. Ao amigo Matheus, por toda a ajuda com a modelagem, pela preocupação e pelas boas risadas, que fizeram os últimos dias mais leves.

Aos amigos desde os tempos de Rural, Jacqueline, Vinícius, Gabriel e Keilla. Aos amigos e colegas da COPPE, Ingrid, Thiago, Cadu, Marise, Davyd, Mauro, Sérgio, Felipe, Wilson e Rodolfo. Aos queridos José Carlos, Vinícius e Paulo Vitor, por toda a ajuda. Agradeço a todos pela amizade!

Aos amigos do LHC, Bruna Amaral, Aline Veról, Lucas Romualdo, Bianca Bellas, Raphael, Cássio, Isaac, Vinícius, Bruna Battemarco, Diego, Marina, André, Vivian, Evandro, Victor, Antônio, Anna Beatriz, e em especial ao João Igor. Agradeço pela ajuda e torcida!

Aos amigos do LABHID, Fernanda, Mel, Zé Barbedo, Bruno, Paulo Marcelo, Carneiro, Zé Roberto, Evaristo, Rafael, Gabriel, Jairo, Fernando, Valéria, Elzimar e Marli. Obrigada por todo o carinho e por torcerem por mim!

Aos componentes da banca, agradeço pelas sugestões tão pertinentes e pela disponibilidade.

Aos queridos Ricardo e Rosiany, por todo o carinho, por torcerem por mim e pelas valiosas informações, e também ao Carlos, pela ajuda e pelas fotos.

Ao fotógrafo Fernando Lemos, por ter sido tão prestativo e atencioso.

Ao LDSC, nas pessoas do professor Marcos Gallo e Iranilson. Agradeço pela disponibilidade e por toda a atenção!

Aos amigos da vida, Priscila Moraes, Viviane, Priscila Cruz, Simone, Livia, Patrícia, Eucleuzair, Marlon, Jordan, e a todos os amigos que de alguma forma participaram deste processo e que sempre torceram pela minha vitória. Muito obrigada!

A todos os professores que fizeram parte desta caminhada, meu muito obrigada!

Ao Programa de Engenharia Civil e à COPPE pela oportunidade e à Secretaria Acadêmica pela paciência e atenção.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, agradeço pelo financiamento através da bolsa de estudos oferecida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REQUALIFICAÇÃO FLUVIAL COMO INSTRUMENTO DE MINIMIZAÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO SESMARIA

Ana Caroline Pitzer Jacob

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

André de Souza Avelar

Programa: Engenharia Civil

Os rios constituem um dos elementos naturais mais dinâmicos da superfície terrestre, se auto ajustando continuamente no tempo e no espaço. A combinação de diversos fatores exógenos provoca o desequilíbrio morfológico das bacias hidrográficas e cursos de água. Com isso, problemas como erosões, assoreamentos, instabilidade das margens e aumento de áreas potencialmente inundáveis começam a ocorrer. Este trabalho procura demonstrar que, com a degradação de bacias hidrográficas, existem muito mais problemas de inundações e de instabilidade morfológica. Para este objetivo, avaliou-se a bacia do rio Sesmaria, que foi fortemente degradada através da remoção de vegetação natural, exploração econômica do ciclo do café, seu abandono e substituição por pastagens, o que tem provocado graves inundações na cidade de Resende. Técnicas de requalificação fluvial foram propostas como um modo adequado de recuperar o funcionamento, mesmo que parcial, do rio e criar condições de mitigação das cheias, possibilitando também situações propícias para uma melhoria da qualidade do ambiente fluvial. O rio Sesmaria foi avaliado de forma qualitativa, interpretando seu histórico evolutivo. A avaliação morfológica foi realizada utilizando o método VALURI e a avaliação quantitativa das inundações para os diferentes cenários utilizou o modelo matemático MODCEL. Os resultados mostraram que hoje, após a degradação da bacia, os problemas de inundações, erosões e desestabilização das margens são mais graves e, com a adoção de técnicas de requalificação fluvial, há redução significativa destes problemas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RIVER REHABILITATION AS A TOOL FOR REDUCING FLOOD RISK IN SESMARIA RIVER BASIN

Ana Caroline Pitzer Jacob

Advisors: Marcelo Gomes Miguez

André de Souza Avelar

Department: Civil Engineering

The rivers are one of the most dynamic elements of the natural land surface, in a continuous auto-adjustment process in time and space. The combination of several exogenous factors causes morphological disequilibrium of basins and watercourses. Thus, problems such as erosion, silting, banks instability and increase of flood risk begin to occur. This work aims to demonstrate that degradation of basins increases flooding problems and morphological instability. For this purpose, Sesmaria river basin was evaluated. This basin was heavily degraded by removal of natural vegetation, as result of a economic exploitation of the coffee cycle, which was abandoned and replaced by pastures, causing severe flooding events in the city of Resende. River rehabilitation techniques have been proposed as an appropriate way to recover part of the river functions, creating conditions for flood mitigation, and also enabling favorable situations to improve the quality of fluvial environment. Sesmaria river was evaluated qualitatively, interpreting its evolutionary history. Morphologic evaluation was performed using the VALURI Method, while quantitative evaluation of floods for different scenarios used the MODCEL mathematical model. Results showed that today, after basin's degradation, the problems of floods, erosion and instability of river banks are more severe, and, with river rehabilitation techniques there is a significant reduction of these problems.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Contexto	1
1.2.	Motivação	4
1.3.	Hipóteses	5
1.4.	Objetivos	5
1.4.1.	Objetivo Geral.....	5
1.5.	Metodologia Geral	6
1.6.	Limitações da pesquisa	7
2	Revisão Bibliográfica	9
2.1	Enchentes/ Inundações/ Risco hidráulico	9
2.2	Geomorfologia fluvial	14
2.3	Requalificação fluvial	23
3	Apresentação do caso de estudo - bacia hidrográfica do rio Sesmaria.....	37
3.1	Caracterização da bacia do rio Sesmaria	37
	Uso e cobertura do solo – Histórica e Atual	42
3.2	Histórico de enchentes	45
3.3	Estudos correlatos	46
	Descrição do estudo de Marcelo Dantas para a bacia do rio Bananal	48
4	Metodologia	50
4.1	Trabalhos de Campo e Laboratório	50
4.1.1	Levantamento de seções transversais.....	50
4.1.2	Medição de sedimentos de fundo	52
4.1.3	Caracterização dos sedimentos de fundo	54
4.2	Hidrologia	55
4.2.1	Cálculo do tempo de concentração.....	58
4.2.2	Elaboração da chuva de projeto	59
4.2.3	Chuvas de projeto com o modelo HIDRO-FLU	60
4.3	MODCEL	64

4.3.1	Histórico	64
4.3.2	Descrição	65
4.3.3	Entrada de dados do modelo.....	73
4.3.4	Calibração do modelo.....	74
4.4	VALURI	75
4.4.1	Descrição	75
4.4.2	Etapas para a aplicação do Método VALURI	88
4.4.3	Divisão do Rio Sesmaria em trechos homogêneos:.....	93
4.4.4	Perfil altimétrico do vale atual	93
4.4.5	Perfil altimétrico da calha atual	93
4.4.6	Determinação da planície de inundação	93
4.4.7	Perfil altimétrico da calha no passado.....	94
4.4.8	Levantamento de dados históricos	96
4.4.9	Cálculo da vazão de <i>bankfull</i>	96
4.4.10	Cálculo da vazão efetiva.....	99
4.4.11	Levantamentos das obras hidráulicas de controle e aproveitamento ...	100
4.4.12	RUSLE	100
4.5	Cenários propostos.....	101
5	Resultados.....	102
5.1	Aplicação do VALURI	102
5.1.1	História do rio	102
5.1.2	Teoria interpretativa.....	125
5.1.1	Reconstrução do passado a partir da teoria interpretativa	128
5.1.2	Previsão de evolução futura a partir da situação atual.....	129
5.2	Aplicação do modelo hidrodinâmico	129
5.3	Diagnóstico quantitativo atual do quadro de inundação e criação dos mapas de alagamento	134
5.3.1	Discussão dos resultados	136
5.4	Reconstrução do quadro de inundações no passado	141

5.4.1	Discussão dos resultados	143
5.5	Simulação da situação de alagamento de Resende, considerando a bacia preservada com o desenho do passado	148
5.5.1	Caracterização do cenário	148
5.5.2	Discussão dos resultados	150
5.6	Uso de alternativas de requalificação como medida de atenuação de cheias 155	
5.6.1	Cenário de requalificação com o reflorestamento da faixa marginal de proteção e dos topos de morro	155
5.6.2	Cenário de requalificação com reflorestamento da FMP	163
5.7	Análise comparativa dos resultados	168
6	Conclusões e recomendações	175
6.1	Conclusões	175
6.2	Recomendações	178
7	Referências Bibliográficas	180
A)	Apêndice 1	189
B)	Apêndice 2	192
C)	Apêndice 3	196
	Anexo 1	296

1. Introdução

1.1. Contexto

Os rios constituem um dos elementos naturais mais dinâmicos da superfície terrestre, se auto ajustando continuamente no tempo e no espaço. Estando sob a regência dos processos exógenos, evoluem continuamente, aprofundando e alterando canais, mudando ou abandonando seus cursos, sendo produto de um longo processo construtivo e/ou destrutivo (CAVALCANTE et al., 2006). Portanto, a combinação de diversos fatores provoca o desequilíbrio morfológico das bacias hidrográficas e cursos de água e problemas como erosões, assoreamentos, instabilidade das margens e aumento de áreas potencialmente inundáveis começam a ocorrer. O rio, no processo pela busca de equilíbrio, escava suas margens em trechos de maior velocidade, transporta os sedimentos escavados pelo leito ou em suspensão, e, em trechos de menor velocidade, os deposita (PEREIRA, 2008).

A atividade antrópica tem causado danos, muitas vezes irreversíveis, a corpos hídricos, sendo hoje extremamente difícil encontrar um rio que não foi de alguma forma alterado. O avanço da ocupação territorial sobre áreas naturalmente inundáveis, a retirada e descaracterização da vegetação ribeirinha, o desmatamento, o descarte de resíduos sobre as encostas e nos cursos d'água, a impermeabilização dos terrenos, as obras locais de caráter imediatista e outras ações, que, por anos e anos, foram praticadas pelo homem em nome do desenvolvimento, hoje se tornaram fatores agravantes na formação das enchentes e na degradação dos corpos hídricos (SEMADS, 2001). Em áreas urbanas, durante muitos anos, os rios foram vistos apenas como escoadouros de cheias, esgotos e lixo, em vez de parte fundamental da vida nas cidades. Em áreas rurais, eles aparecem como fontes de irrigação ou de geração de energia para as atividades econômicas tradicionais, notadamente a geração de energia hidrelétrica e a agropecuária tinham prioridade nas questões ambientais. Em ambos os casos, a degradação das condições da bacia, e do próprio corredor fluvial, aparecem como fatores que agravam as ocorrências de enchentes. Nessa situação, novos vetores de degradação são incluídos, pela necessidade de proteger as áreas urbanas e os sistemas econômicos.

De forma geral, os impactos provocados pela atividade humana nos rios e córregos, como áreas de instabilidade, erosões das margens, remoção de vegetação, perda de diversidade ecossistêmica, entre outros, são mais visíveis em áreas urbanas, mas estes não são menores nas áreas rurais. Estes problemas estão diretamente

relacionados às alterações nas variáveis condicionantes do ajuste fluvial, ou seja, nas séries de vazões líquidas e sólidas impostas ao sistema. Nessa situação, tendem a ocorrer desequilíbrios, com alterações na morfologia fluvial, provocadas principalmente pela mudança de uso do solo da bacia, com retirada de vegetação e, em particular, da mata ciliar. Outro fator que contribui para estas alterações é a introdução de obras, como a construção de barragens que cortam a continuidade do rio entre montante e jusante, ou a retificação e canalização dos cursos d'água. Sem a presença da vegetação, aumenta muito o escoamento superficial e o solo modifica sua estrutura, potencializando as erosões e o carreamento destes sedimentos para o rio. Sem a presença da mata ciliar, o rio perde capacidade de retenção contra o aporte descontrolado dos sedimentos oriundos das erosões.

Nos últimos anos vem se desenvolvendo um novo conceito em relação à forma de se abordar os problemas de degradação fluvial, voltado para uma avaliação sistêmica de seu funcionamento, com ações ambientalmente mais sustentáveis e que buscam conservar os cursos d'água ou trabalhá-los para que estes sejam recuperados a condições o mais próximo possível do natural. Essas ações buscam dar equilíbrio morfológico, aumentar a segurança hidráulica, garantir a qualidade da água e o bom estado ecológico do rio e seu entorno.

A conservação de rios, sempre que possível, e requalificação (do inglês, *river rehabilitation*) como alternativa, tanto em áreas rurais quanto urbanas, se constituem em importantes instrumentos da gestão de Recursos Hídricos. Esta linha de ação é relativamente recente, não indo além de quatro décadas (BROOKES e SHIELDS, 1996).

Em bacias rurais de maior porte, onde há núcleos urbanos que são afetados pela ação do rio em determinado trecho, uma alternativa sistêmica passa a ser a atuação na recuperação de características funcionais das planícies de inundação e da bacia, nas áreas rurais, para mitigação de inundações nas áreas urbanas.

Mais de \$ 15 bilhões de dólares foram gastos em projetos de restauração de rios apenas nos Estados Unidos, entre 1990 e 2004 (BERNHARDT *et al.*, 2005). No entanto, muitos desses projetos são concebidos sem o entendimento da dinâmica do rio e como ele irá reagir às mudanças introduzidas. Uma das maneiras de compreender o funcionamento do rio é a partir da sua história, ou seja, entendendo como o rio se comportou através dos tempos permite inferir sobre como ele irá se ajustar às mudanças. Este conhecimento é de extrema importância para que não sejam cometidos equívocos nos projetos de requalificação de rios. Determinar a

história do rio envolve a compreensão dos processos que estão afetando o sistema fluvial, e as escalas temporais e espaciais em que esses processos estão ocorrendo.

Torna-se necessário, portanto, para projetos de requalificação de cursos de água, um estudo cuidadoso, pois não é fácil prever seu impacto no longo prazo. Modelos físicos e computacionais podem se tornar ferramentas importantes para a simulação das condições de escoamento, verificação das características hidráulicas e morfológicas do rio, permitindo a proposição de ações de requalificação adequadas, considerando um diferente conjunto de técnicas disponíveis. Essas avaliações e a própria modelagem, porém, são bastante difíceis, seja pela variabilidade do fenômeno natural, seja pela dificuldade de obtenção de séries de dados históricos medidos para alimentação dos modelos. Desta forma, o reconhecimento conceitual do comportamento evolutivo do rio e a caracterização das variáveis independentes (vazões líquidas e sólidas) e suas alterações históricas permite construir uma teoria interpretativa, que pode ajudar a balizar as ações de requalificação, mesmo sem permitir a identificação precisa de como se darão as mudanças.

Considerando esta discussão introdutória, este trabalho tem como caso de estudo a bacia do rio Sesmaria, situada no médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) com problemas típicos de uma bacia que sofreu ação antrópica. Como toda a região do MVRPS, esta bacia, antes coberta por mata nativa, foi desmatada para o cultivo do café, por volta do fim do século XVIII, e, com o declínio desta monocultura, os cafezais envelhecidos foram substituídos pela plantação de gramíneas para a atividade pecuária. É uma bacia predominantemente rural e, portanto, considera-se maior a possibilidade de implantação de ações de requalificação fluvial. Destaca-se, ainda, que o rio Sesmaria apresenta problemas sérios de enchentes na cidade de Resende-RJ, situada em seu baixo curso e junto ao rio Paraíba do Sul.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como proposta realizar uma avaliação morfológica qualitativa e hidrodinâmica do rio Sesmaria, afluente do rio Paraíba do Sul, utilizando uma teoria de base interpretativa. Esta teoria atua como base para a proposição de medidas na área rural da bacia, que busquem a requalificação fluvial do rio a fim de reduzir as inundações frequentes na cidade de Resende. Posteriormente, pretende-se fazer a avaliação das medidas propostas, com a realização de prognósticos de cenários futuros. Reconhece-se que há dificuldade de resgatar informações históricas e que a própria quantidade de dados registrados é muito escassa. Porém, dentro das limitações impostas, a discussão aqui desenvolvida pretende, considerando o cunho acadêmico inerente a uma dissertação, propor o uso

da metodologia interpretativa como uma ferramenta útil na discussão de requalificação fluvial.

Para a avaliação morfológica qualitativa será utilizado o Método VALURI e para a análise hidrodinâmica será usado o MODCEL. O Método VALURI foi desenvolvido na Itália por NARDINI e PAVAN (2012), do Centro Italiano de Requalificação Fluvial (CIRF), e o MODCEL é um modelo hidrodinâmico, que utiliza o conceito de células de escoamento e foi desenvolvido na UFRJ, por MIGUEZ (2001).

1.2. Motivação

A degradação de rios no Brasil é um grande problema, tanto em áreas rurais como urbanas. Diante disso, problemas de inundações estão se tornando mais frequentes e mais graves e cidades e atividades econômicas em áreas ribeirinhas tem sido mais afetadas. Neste contexto, é possível encontrar projetos de controle de inundação que considerem a restauração de rios uma alternativa para a solução destes problemas. A comunidade acadêmica e parte da comunidade técnica usualmente propõem abordagens mais sustentáveis, tentando recuperar, da melhor forma possível, os aspectos originais do ciclo hidrológico. A visão do CIRF (2006) na restauração e requalificação de rios, considerando os aspectos sistêmicos e um melhor resultado ecológico a partir do ponto de vista do rio, sem excluir a atividade humana, é uma filosofia importante para incorporação aos projetos de controle de cheias.

A bacia do rio Sesmaria se encontra hoje com problemas que se originaram na ação antrópica sem planejamento. Os principais problemas encontrados na bacia são:

- Remoção da cobertura vegetal;
- Assoreamento e erosão na calha do rio;
- Ausência de mata ciliar em diversos trechos do rio;
- Urbanização em expansão;
- Ocupação irregular e intensa de áreas ribeirinhas;
- Ocorrência de eventos hidrológicos que prejudicaram a cidade de Resende (risco hidráulico);
- Descarga de esgoto e resíduos sólidos no rio.

Essa situação motiva o desenvolvimento desta dissertação, tanto para evolução conceitual no tema de requalificação fluvial, como considerando a possibilidade de gerar propostas para a reversão da situação de degradação encontrada na bacia e minimizar cheias na cidade de Resende. Destaca-se ainda, que esta aplicação foi elencada como um caso de estudo do Projeto SERELAREFA - Semillas REd Latina

Recuperación Ecosistemas Fluviales y Acuáticos (Sementes de uma rede Latino-Americana para a recuperação de ecossistemas fluviais e aquáticos), realizado no âmbito do programa europeu UE FP7-PEOPLE IRSES 2009, que tem como objetivo geral discutir a requalificação de rios, entendendo melhor a dinâmica dos processos fluviais, os efeitos das intervenções antrópicas e quais podem ser as ações encaminhadas à solução de numerosos problemas. Assim, no âmbito da Requalificação de Rios, visa melhorar a forma com que os cursos d'água são geridos, a fim de obter benefícios tanto para meio ambiente quanto para as atividades socioeconômicas. Esse projeto começou em setembro de 2010 e conta com os seguintes países participantes:

- Itália - Centro Italiano per la Riquilificazione Fluviale-CIRF, coordenador (www.cirf.org)
- Espanha - Universidad Politécnica de Madrid-UPM
- Brasil - Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ
- México - Universidad de Guadalajara-UDG
- Chile - Dirección de Obras Hidráulicas-DOH
- Chile - Universidad de Concepción-UDEC

1.3. Hipóteses

O processo de degradação da bacia do rio Sesmaria, ocorrido nos últimos 2 séculos, pela remoção de vegetação natural, exploração econômica do ciclo do café, seu abandono e substituição por pastagens, agravou os problemas de inundações e de instabilidade morfológica, com reflexos importantes em Resende.

A hipótese de trabalho indica que a utilização de técnicas de requalificação fluvial em uma bacia hidrográfica com problemas de inundação, erosão e desestabilização das margens é um modo adequado de recuperar o funcionamento, mesmo que parcial, do rio e criar condições de mitigação das cheias e redução destes problemas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Realizar uma avaliação morfológica qualitativa e hidrodinâmica do rio Sesmaria, construir um diagnóstico a partir do conhecimento do histórico de evolução do rio e formular uma teoria interpretativa como base para proposição de alternativas de requalificação fluvial para a bacia, em uma visão prospectiva de integração de ações em áreas rurais e urbanas. Dessa forma, busca-se contribuir para a disseminação dos

conceitos de requalificação fluvial no Brasil e para a consolidação de ferramentas úteis para uma melhor gestão de rios e territórios.

Objetivos específicos

- Analisar o processo evolutivo de ocupação e degradação da bacia do rio Sesmaria, com o propósito de reconstruir o histórico do rio;
- Realizar um diagnóstico do comportamento deste sistema fluvial na situação atual e de suas tendências de evolução, a partir da interpretação de seu histórico;
- Avaliar a situação atual em termos de inundação, para caracterizar o risco hidráulico na cidade de Resende, identificando a influência do estado de degradação da bacia sobre este risco;
- Discutir alternativas de ação no escopo da requalificação fluvial, para reversão do estado de degradação da bacia e minimização das inundações em Resende;
- Contribuir para a informação e conscientização de atores relevantes.

1.5. Metodologia Geral

Para a consecução dos objetivos apresentados, pretende-se realizar as seguintes etapas metodológicas:

- Realizar uma pesquisa de informações passadas de evolução da bacia: mapas históricos, fotos aéreas, registros de usos do solo, visita a Prefeitura de Resende, mapeamento de obras na bacia, evolução da urbanização,
- Obter a base topográfica disponível, realizar levantamentos topobatimétricos específicos e caracterizar o sedimento de fundo em, pelo menos, 3 seções ao longo do rio;
- Realizar diagnóstico qualitativo da bacia do rio Sesmaria, quanto a seu funcionamento atual, caracterizando a sua hidrologia e as manchas de alagamento para diversos tempos de recorrência – para esta tarefa será utilizado o modelo hidrodinâmico MODCEL (MIGUEZ, 2001; MASCARENHAS e MIGUEZ, 2002);
- Avaliar a situação atual em termos de inundação, para caracterizar o risco hidráulico e a criticidade do problema, para a cidade de Resende;
- Introduzir o método VALURI (NARDINI e PAVAN, 2012) para construir uma história interpretativa de evolução da bacia, para avaliar as consequências de sua degradação sobre o sistema fluvial, especialmente pela substituição de sua

cobertura vegetal original, de Mata Atlântica, por culturas de café e, depois, pasto;

- Discutir alternativas de ação no escopo da requalificação fluvial, para resgatar parte do funcionamento perdido;
- Serão realizados 5 conjuntos de simulações para suporte às discussões:
 - Situação atual de alagamentos em Resende;
 - Situação de alagamentos no passado, com a bacia antes do desmatamento;
 - Situação de alagamentos em Resende, caso a bacia tivesse se preservado ao longo do tempo; portanto, considerando urbanização de hoje na foz e as feições do passado no restante da bacia;
 - Situação de alagamentos em Resende, caso a faixa marginal de proteção seja demarcada e revegetada, assim como os topos de morro sejam recuperados e efetivados como APA (conforme prevê a legislação) - essa alternativa introduz a possibilidade de início de requalificação fluvial, pelo estabelecimento de um espaço mínimo destinado ao rio;
 - Situação alagamentos em Resende, caso apenas a faixa marginal de proteção (FMP) seja demarcada e revegetada;
- Análise dos resultados obtidos e formulação de recomendações finais.

1.6. Limitações da pesquisa

A teoria interpretativa proposta para a evolução do rio necessita de informações passadas para sua construção e este pode ser um fator crítico, considerando o histórico de poucas medições e a não conservação de memória, usualmente frequentes em bacias no Brasil.

Assim, mais do que construir uma teoria que possa ser verificada “com certeza”, essa dissertação pretende construir uma teoria de evolução histórica do rio Sesmaria que seja “possível” de ter ocorrido. Ou seja, reconhecem-se as dificuldades e não se pretende chegar a uma “verdade”, mas a uma possibilidade que não possa ser refutada de partida e que permita avançar com as discussões que levam a um melhor conhecimento do sistema fluvial. As dúvidas de evolução do rio, especialmente na predição da tendência futura já são grandes, de forma habitual. A limitação de dados, neste caso, pode ser um fator complicador formidável, na construção de uma teoria interpretativa mais sólida. Porém, essa dissertação entende que, cumprindo uma finalidade acadêmica e de pesquisa, as fragilidades das interpretações são aceitáveis,

não de forma prática, situação em que levantamentos e pesquisas de campo e históricas mais intensos deveriam ser realizados, mas de forma a propor uma metodologia que possa ser replicada em outras bacias e que auxilie na compreensão das mudanças ocorridas ao longo do tempo, estabeleça possíveis relações de causa e efeito e que ajude a direcionar ações mais efetivas para a solução de problemas no presente.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Enchentes/ Inundações/ Risco hidráulico

Enchente ou cheia é uma situação natural de transbordamento de água do leito principal dos cursos d'água, denominado leito menor, provocada, geralmente, por eventos de chuvas intensas e contínuas. Este fenômeno natural atinge a humanidade desde o início da civilização, quando o homem, visando o abastecimento das cidades e devido às facilidades da proximidade aos cursos d'água, decidiu por ocupar áreas susceptíveis à inundação. Com o passar dos anos e com o crescimento desordenado das cidades, esta situação se agravou, uma vez que a ocorrência de enchentes é mais frequente em áreas mais densamente ocupadas, quando os sistemas de drenagem passam a ter menor eficiência e as taxas de impermeabilização do solo são maiores.

A inundação urbana ocorre quando as águas dos rios, riachos ou canais saem do seu leito menor de escoamento e escoam através do seu leito maior e planícies de inundação que podem ter sido ocupados pela população para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros. Isto ocorre quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar a água precipitada, assim é gerado um grande volume de água que escoam para o sistema de drenagem, superando a capacidade do leito menor. Este é um processo natural do ciclo hidrológico devido à variabilidade climática de curto, médio e longo prazo. Estes eventos chuvosos ocorrem de forma aleatória em função dos processos climáticos locais e regionais (TUCCI, 2005).

Segundo TUCCI (2007), os problemas relacionados às inundações podem ser divididos em dois processos principais: as inundações de áreas ribeirinhas e as inundações devido à urbanização. As inundações de áreas ribeirinhas ocorrem principalmente pelo processo natural de cheia do rio em eventos de grandes precipitações, elevando o nível d'água do rio que passa a escoar em sua calha secundária, com uma recorrência de aproximadamente 2 anos. Quando essa calha secundária se encontra ocupada por habitações humanas há uma barreira para o escoamento das águas, levando a uma elevação ainda maior no nível d'água e a um aumento na frequência de extravasamento da calha principal do rio. Inundações devido à urbanização ocorrem principalmente em consequência do aumento da taxa de impermeabilização do solo devido ao processo de urbanização. Conforme a cidade se desenvolve, há uma redução da cobertura vegetal e aumento da impermeabilização das superfícies, dificultando a infiltração da água de chuva no solo, aumentando

assim, o volume de água escoada superficialmente, podendo superar a capacidade de escoamento de rios, córregos e canais.

A inter-relação entre o uso e ocupação do solo e os processos hidrológicos superficiais é de extrema importância, pois o desmatamento geralmente resulta em redução dos tempos de concentração das bacias e em aumento do volume de escoamento superficial, causando o extravasamento dos cursos d'água. Devido à importância desta inter-relação, a abordagem dos problemas relacionados às inundações deve considerar a extensão superficial na qual estas relações se manifestam: a bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica é a unidade mínima para qualquer estudo hidrológico, no entanto, esta unidade é ainda ignorada em muitos trabalhos de drenagem urbana (POMPÊO, 2000).

Um grande número de municípios brasileiros enfrenta problemas com enchentes devido, principalmente, à ineficiência, falta de planejamento e investimento no setor de drenagem urbana. Segundo a pesquisa nacional de saneamento básico (IBGE, 2008) dos 2 274 municípios que declararam ter problemas de inundações em sua área urbana nos últimos cinco anos, 60,7% informaram haver ocupação urbana em áreas naturalmente inundáveis por cursos d'água.

Diferenciações no uso do solo urbano podem contribuir para a ocorrência de inundações (IBGE, 2008). Segundo LEOPOLD (1968), essas alterações no uso do solo podem ser críticas, podendo chegar ao ponto de uma bacia urbanizada, para os casos extremos, atingir um pico de cheia até seis vezes maior do que o pico desta mesma bacia em condições naturais.

Os principais danos provocados por cheias incluem perdas materiais e humanas, interrupção da atividade econômica e de serviços de infra-estrutura, além de contaminação por doenças de veiculação hídrica, e, no Brasil, as perdas tangíveis diretas decorrentes de cheias foram estimadas em U\$ 1 bilhão/ano, em 2001, e, no ano de 2004, esse valor aumentou para U\$ 3 bilhões/ano. (PROHIMET/CYTED/WMO, 2007).

O avanço da ocupação territorial sobre áreas sujeitas à inundação, a remoção e descaracterização da mata ciliar, o desmatamento em grande escala, o descarte irresponsável dos resíduos domiciliares sobre as encostas e nos cursos de água, a impermeabilização dos terrenos, as obras locais de caráter imediatista e outras ações que por dezenas de anos foram praticadas pelo homem em nome do desenvolvimento, hoje se tornam fatores agravantes na formação das enchentes (SEMADS, 2001).

É necessário planejamento e investimento na infra-estrutura e no desenvolvimento das cidades, para que o crescimento destas ocorra de maneira sustentável. Em grande parte dos municípios brasileiros, é comum a realização de obras hidráulicas sem projetos e estudos de capacidade destas para os eventos de cheia. Este problema pode ser devido a diversos fatores dentre os quais pode-se citar a falta de iniciativa do poder público e dos responsáveis, a falta de verbas para o financiamento de projetos e a falta de dados e informações que possibilitem a aplicação de metodologias (GARCIA e DIAS de PAIVA, 2003).

O controle de inundações pode ser realizado através de diferentes medidas estruturais, tais como reservatórios de detenção ou retenção, estruturas de infiltração, ações de reflorestamento, entre outros. Medidas não estruturais também devem ser implantadas, tais como planos diretores de drenagem urbana, zoneamento de áreas sujeitas a inundações, sistemas de alerta de inundação, e programas de educação ambiental, permitindo uma convivência mais harmônica com as inundações, entre outros devem ser adotados para alcançar o objetivo de controlar as inundações e reduzir o risco hidráulico (MIGUEZ *et al.*, 2009).

A urbanização provoca modificações no ciclo hidrológico, alterando suas parcelas e o balanço hídrico da bacia hidrográfica. A urbanização desordenada associada à falta de manejo e ao uso inadequado do solo provoca a redução da capacidade de armazenamento natural dos deflúvios. A solução tradicionalmente adotada visa o aumento da velocidade dos escoamentos com obras de canalização dos rios (CANHOLI, 2005).

Dúvidas de como lidar com riscos de inundação em áreas com alto grau de urbanização são tão antigos como muitas cidades. Cidades em áreas com precipitação intensa e grandes áreas impermeáveis, por impedir que a água da chuva e águas residuais infiltrem no solo, produzem grandes escoamentos superficiais que a rede de drenagem é incapaz de acomodar, e por isso estão potencialmente expostas a inundações (Figura 2.1).

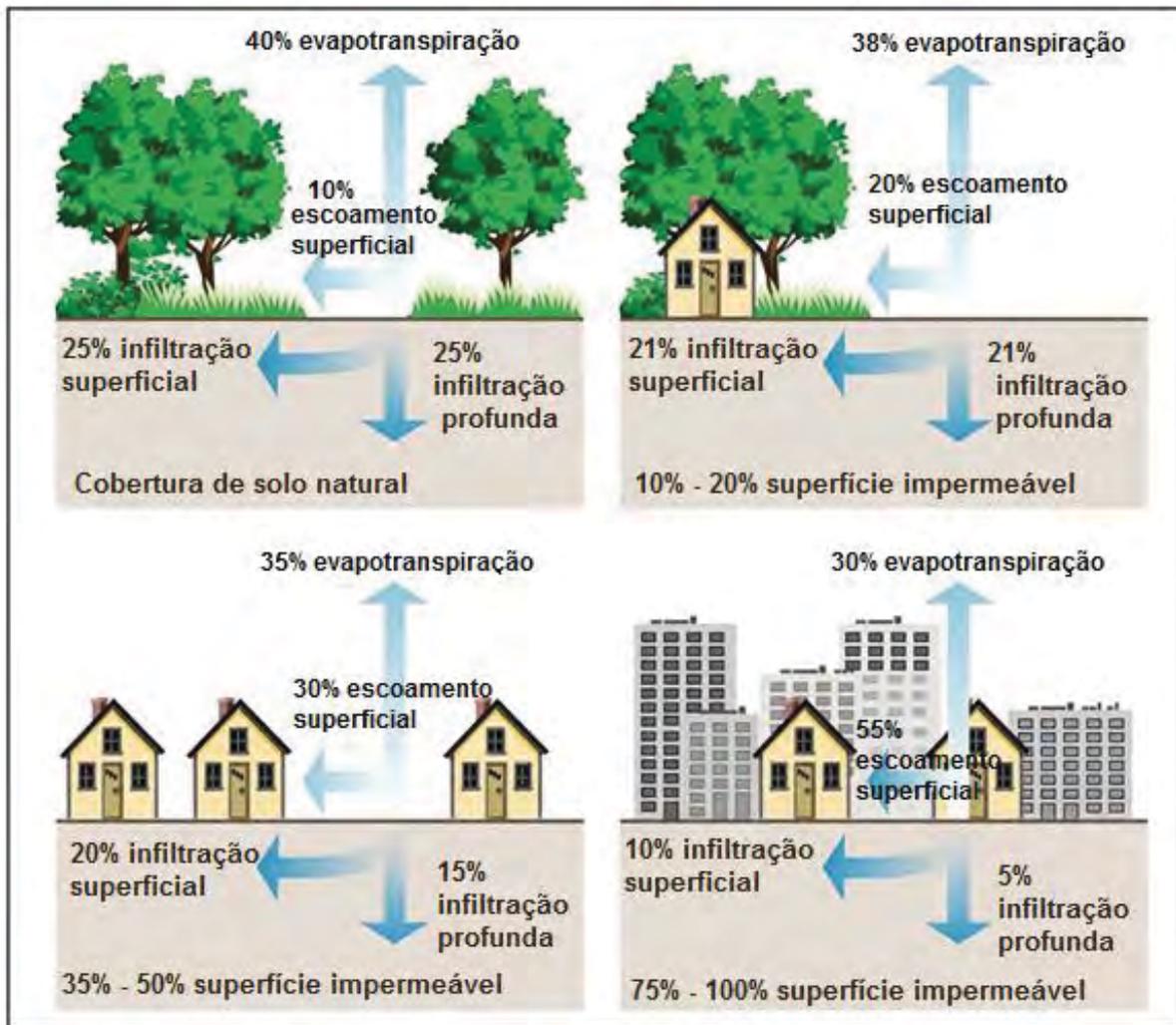


Figura 2.1: Influência da urbanização em diferentes componentes do ciclo da água. Fonte: adaptado de FISRWG, 1998.

Independentemente de inundações urbanas serem parte de grandes inundações ribeirinhas ou resultado de capacidades de drenagem insuficiente, o potencial de danos de enchentes nas cidades é extraordinariamente alto. Dada a elevada concentração espacial de pessoas e valores nas cidades, mesmo as inundações de pequena escala podem causar danos consideráveis. Em casos extremos, cheias urbanas podem resultar em catástrofes que retrocedem o desenvolvimento urbano por anos ou mesmo décadas. Estatísticas recentes indicam claramente que os danos econômicos causados por cheias urbanas estão aumentando

Nestas circunstâncias, a gestão sustentável de risco de inundação urbana está se tornando uma tarefa cada vez mais desafiadora para as comunidades urbanas e para as autoridades responsáveis. Infelizmente, muitas cidades em todo o mundo não são capazes de manter-se com a intensificação destes desafios. As razões para isso são múltiplas e algumas dificuldades são dificilmente superadas. Muito frequentemente a

gestão de cheias urbanas é marcada por uma visão restrita sobre as cheias, concentrando-se apenas em aspectos da hidráulica e da engenharia, ignorando aspectos espaciais, ecológicos, políticos e sócio-econômicos. Essa visão restrita geralmente visa evitar ou controlar as cheias, um esforço que muitas vezes revela-se irrealista.

2.2 Geomorfologia fluvial

Geomorfologia é uma ciência natural que tem raízes na Geologia, Engenharia Hidráulica e Física. Seu foco está no estudo das formas de relevo e nos processos de produção, armazenagem e circulação de sedimentos na paisagem e na caracterização dos recursos que esses processos produzem (SEAR *et al.*, 2003).

A geomorfologia Fluvial compreende o estudo dos cursos d'água e o das bacias hidrográficas. Enquanto o estudo dos cursos d'água se detém nos processos fluviais e nas formas resultantes do escoamento das águas, o estudo das bacias considera as principais características das bacias hidrográficas que condicionam o regime hidrológico, como aspectos geológicos, formas de relevo e processos geomorfológicos, características hidrológicas, biota e uso e ocupação do solo. (CHRISTOFOLETTI, 1981; RITTER, 1995).

A geomorfologia fluvial estuda processos e formas relacionadas ao escoamento dos cursos d'água para, a partir do conhecimento das características morfológicas e dos componentes responsáveis pela configuração natural dos rios, extrair conclusões sobre seu estado (MAAS e BROOKES, 2009; POMPÊO *et al.*, 2011).

Estudos geomorfológicos que envolvem o reconhecimento, a análise (quantitativa e qualitativa) e a avaliação dos canais podem fornecer informações importantes sobre a forma e os processos físicos atuantes no sistema fluvial (THORNE, 1997).

Os estudos da dinâmica fluvial são essenciais, não somente para compreensão da evolução das paisagens geográficas, mas também como meio para estabelecer o controle dos processos acelerados de erosão e sedimentação, resultantes da ocupação urbana (BALABRAM, 2007)

Canais fluviais constituem uma pequena parcela da paisagem total, mas o seu significado supera sua extensão em área. Um canal fluvial em um único local reflete a geologia, biologia, clima e hidrologia de uma bacia de drenagem que pode se estender por centenas de quilômetros a montante. Todas as formas de relevo, incluindo rios, são resultados da interação de três variáveis: processos, estrutura e estágio (DAVIS, 1899 *apud* SHEN, 1971). Processo inclui todos os processos que agem para formar uma paisagem; a estrutura implica não apenas os efeitos dos diferentes tipos de rochas, mas também o tipo de erosão destas rochas, a influência das fraturas e outros tipos de estrutura geológica e sua distribuição na bacia hidrográfica; o estágio representa o tempo necessário para o desenvolvimento de um relevo ou de uma paisagem (SHEN, 1971).

Em uma bacia hidrográfica, as características de tipologia de leito, tipologia dos canais, tipologia de padrões de drenagens, analisadas em conjunto, promovem uma dinâmica peculiar das águas correntes que, associada a uma geometria e hidráulica, culmina em processos específicos fluviais de erosão, transporte e deposição (CUNHA, 2001). Desde o princípio da história das ciências geológicas os estudos da dinâmica dos rios e as formas resultantes da ação fluvial sempre chamaram a atenção de pesquisadores.

Os principais parâmetros da geomorfologia fluvial que interferem nos cursos d'água são o transporte de sedimentos e as cheias e sua frequência. Os principais fatores que condicionam os processos de transporte, erosão e sedimentação nos rios, são: a velocidade da corrente, a declividade do leito, as características físicas dos sedimentos (tamanho, densidade e forma), a existência de pontos fixos no leito e as variações da vazão do rio, estas diretamente relacionadas com as variações climáticas.

Os sedimentos presentes nos cursos d'água podem ter sua origem no leito ou na bacia hidrográfica e, de acordo com esta origem, são definidos dois tipos de transportes: transporte de material do leito, composto por sedimentos originados na calha do rio, e transporte de material lavado, que é resultado da erosão na bacia provocada pelo processo chuva-vazão (VIEIRA da SILVA e WILSON-JR., 2005).

O transporte de sedimentos pode ser realizado de forma dissolvida, em suspensão e no leito do rio através do arrasto e saltação. O movimento de sedimentos dentro de bacias hidrográficas e, principalmente, dentro do canal e da planície de inundação é o foco da geomorfologia fluvial. O movimento e o armazenamento destes sedimentos resultam na morfologia do canal e das planícies de inundação (RITTER, 1995; SEAR *etal.*, 2003).

A morfologia refere-se à descrição das características e forma do canal e das planícies de inundação; resulta da interação entre as características hidráulicas da corrente (velocidade, rugosidade, volume de água, tensão de arraste), a configuração do canal (tamanho, forma, declive), a quantidade de sedimentos que entram no canal (carga e granulometria) e o material constituinte do leito e taludes (MORISAWA, 1985 *apud* MORENO, 2011). A caracterização morfológica do canal de um curso de água considera as suas três dimensões: perfil longitudinal, seção transversal e forma do canal.

Em rios naturais, em longos períodos de tempo, a descarga de sedimentos e a vazão são variáveis independentes que determinam as características morfológicas e as características do escoamento (SHEN, 1971).

Processos geomorfológicos, formados pelo regime de vazões, vegetação e disponibilidade de sedimentos, induzem controle direto sobre a distribuição de energia dentro de um sistema. Estas interações determinam o caráter e a distribuição das formas de canal e da planície de inundação, o padrão local de erosão e deposição e a diversidade hidráulica associada a diferentes estágios de vazão (BRIERLEY e FRYIRS, 2005; MAAS e BROOKES, 2009).

A geomorfologia fluvial compreende o termo hidromorfologia. Segundo SEAR *et al.* (2003) a hidromorfologia de um canal fluvial inclui as seguintes considerações: a) o grau de alteração do regime de escoamento; b) a medida que o fluxo de água, transporte de sedimentos e a migração de biota são impactados por barreiras artificiais; 3) a medida que a morfologia do canal de rio foi modificada, incluindo as restrições ao movimento do rio e da sua planície de inundação.

O transporte de sedimentos é governado, principalmente, pelos fatores hidrológicos que controlam as características e o regime dos cursos de água. Dentre estes fatores os mais importantes são a quantidade e a distribuição das precipitações. A fonte dos sedimentos e o material intemperizado na bacia hidrográfica são função da estrutura geológica, das condições topográficas e da cobertura do solo. O fluxo e o transporte de sedimentos constituem respostas aos processos e ao estado de equilíbrio atuantes no sistema fluvial (BALABRAM, 2007).

ROSGEN (2001) define a estabilidade de um rio (equilíbrio ou quase-equilíbrio) como a capacidade de um rio, ao longo do tempo, no atual clima, de transportar as vazões e os sedimentos produzidos pela sua bacia hidrográfica de tal forma que o rio mantém a sua dimensão, padrão e perfil sem nenhuma agradação ou degradação.

Os mecanismos básicos do processo fluvial envolvem o equilíbrio da energia do sistema fluvial. A energia da água produzida no sistema (força motriz) é equilibrada através da habilidade do sistema em consumir esta energia (força de resistência). Este equilíbrio dinâmico é função da declividade, sedimentos, rugosidade, velocidade do rio, clima da região, e largura e profundidade do canal. Os parâmetros do sistema fluvial estão em constante mutação, adaptando-se continuamente em resposta aos outros parâmetros (DOLLAR, 2004).

O conceito mais fundamental na geomorfologia fluvial é o de que um rio representa o equilíbrio entre as forças que promovem mudança e as forças que resistem à

mudança (LANE, 1955). LANE (1955) concluiu que um canal poderia se manter em equilíbrio dinâmico por alterações de equilíbrio na carga de sedimentos e no tamanho dos sedimentos compensando alterações na descarga líquida e na declividade do rio. LANE (1955) mostrou este relacionamento de forma qualitativa através da expressão (1):

$$Q S_b \propto Q_s D_{50} \quad (1)$$

Onde, Q é a vazão, S_b é a declividade do fundo, Q_s é a vazão sólida e D_{50} é o diâmetro médio do material do fundo.

Esta expressão mostra o equilíbrio entre a carga de sedimentos de um lado da balança e a vazão do outro. A balança de Lane (Figura 2.2) mostra que uma alteração em um fator provoca mudança em outro, resultando em degradação, erosão “exagerada” do fundo, assoreamento, e deposição de sedimentos. O equilíbrio do canal ocorre quando todas as quatro variáveis estão em equilíbrio. Se ocorrer uma alteração, o equilíbrio é perdido. Se uma variável muda, uma ou mais das outras variáveis devem aumentar ou diminuir proporcionalmente a fim de se manter o equilíbrio.

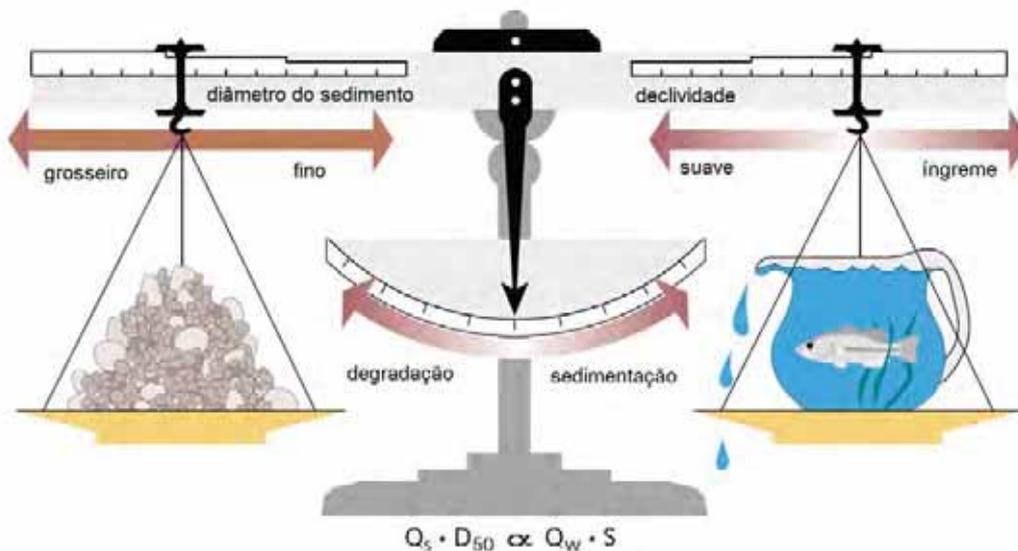


Figura 2.2: Balança de LANE (1955): Fatores que afetam o equilíbrio dos canais fluviais. Fonte: adaptado de ROSGEN (1996).

A partir da análise da balança de LANE (1955), SHEN (1971) afirma que, com o aumento da vazão que passa pelo rio, tende a ocorrer o aumento da largura, mas outras mudanças na seção transversal podem ocorrer ao longo do canal, para jusante. Essas e outras mudanças são atribuídas às mudanças no tipo da carga de sedimentos introduzidas por afluentes principais. Se os afluentes introduzem uma grande carga de

sedimentos em suspensão, a largura diminui; se é grande a carga de sedimentos arenosos, a largura aumenta.

O regime de transporte de sedimentos de um rio reflete o volume e o diâmetro do sedimento que é fornecido ao canal, a capacidade do canal para transportá-lo, a distribuição do excesso de energia que provoca a erosão, e o tipo de sedimento que se deposita no rio e na planície de inundação. Com o tempo, estes ajustes conformam o leito e as margens e a capacidade do rio de ajustar sua forma (BRIERLEY e. FRYIRS, 2005). Todos os canais naturais são formados, mantidos e alterados pela água e sedimentos que eles transportam (FISRWG, 1998).

As forças motrizes que promovem o trabalho geomorfológico ao longo dos rios são expressas por um determinado volume de água agindo sobre um determinado declive. A energia disponível é capaz de erodir, arrastar, transportar e depositar diferentes quantidades de material, dependentes do diâmetro e volume de sedimentos disponível no canal. (BRIERLEY e. FRYIRS, 2005).

SCHUMM (1977) classificou o processo fluvial, com relação à carga de sedimentos, como um sistema dividido em três partes (Figura 2.3). As chamadas três zonas de sedimentos são: (1) a zona superior de produção de sedimento, (2) a zona de transferência de sedimentos (3), a zona inferior de deposição de sedimentos. A região superior, caracterizada como a zona de produção de sedimentos, produz esses sedimentos em função do escoamento inicial da água em elevadas altitudes e grandes declividades, que causam incisões profundas nos vales. Nesta zona concentra-se a maior atividade erosiva, devido à presença de corredeiras e cachoeiras. Encostas íngremes e côncavas, que concentram o escoamento, produzem maiores quantidades de sedimentos (SCHUMM, 1977). A zona de transferência possui declive mais suave e vales mais largos; a energia é utilizada no movimento de sedimentos. A zona inferior de deposição de sedimentos possui vales amplos e declividade praticamente nula, propiciando a formação de meandros e das amplas planícies de inundação.

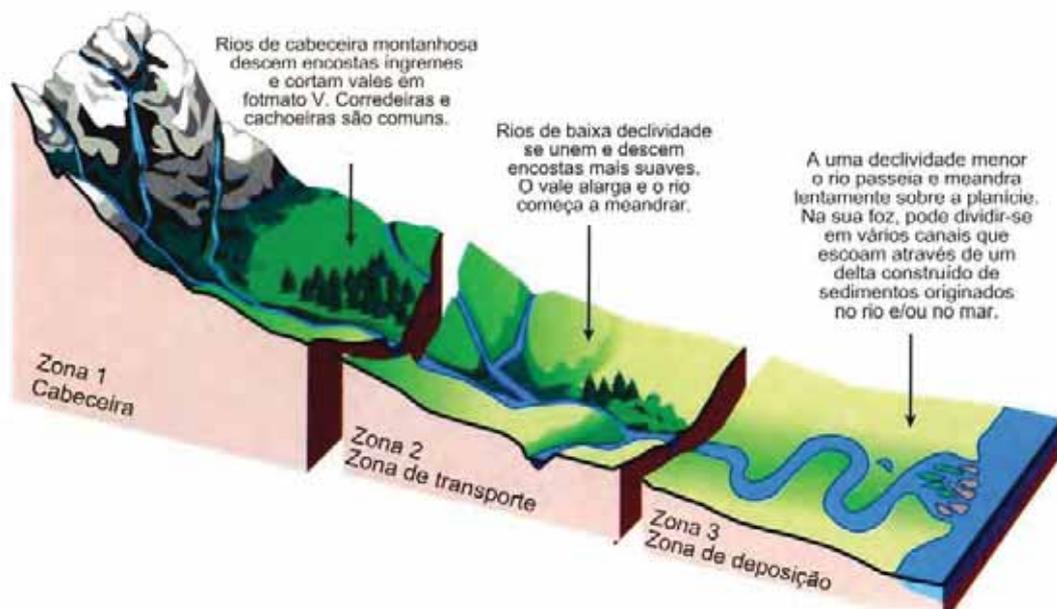


Figura 2.3: As três zonas dos sedimentos. Fonte: adaptado de FISRWG, 1998.

O trabalho realizado por SCHUMM (1977) é referência na previsão qualitativa das respostas dos canais aos ajustes na vazão líquida e no aporte de sedimentos. A Tabela 2.1 resume essas respostas às alterações no canal.

Tabela 2.1: Relações de SCHUMM (1977) em função das variáveis independentes vazão líquida e vazão sólida.

Q (vazão líquida)	Qs (vazão sólida de arraste)	Largura	Profundidade	Comprimento do meandro	Declividade	Sinuosidade
+	Constante	+	+	+	-	indefinido
-	Constante	-	-	-	+	indefinido
Constante	+	+	-	+	+	-
Constante	-	-	+	-	-	+
+	+	+	±	+	±	-
-	-	-	±	-	±	+
+	-	±	+	±	-	+
-	+	±	-	±	+	-

Segundo LEOPOLD e MADDOCK (1953 *apud* SHEN, 1971) a diminuição da largura a uma velocidade constante resulta em maior capacidade para cargas em suspensão a uma vazão constante. À velocidade e vazão constantes, um aumento na largura está associado a uma diminuição da carga em suspensão e aumento no transporte de fundo. Portanto, uma alta relação entre largura-profundidade está associada à grandes cargas de sedimentos de fundo.

Os processos de erosão, transporte e sedimentação nessas três partes dos cursos fluviais são condicionados pelo tamanho, densidade e forma dos sedimentos. A sedimentação aumenta sempre que a velocidade da corrente diminui, mantendo-se a dimensão das partículas arrastadas. À medida que a declividade, de montante para jusante e, conseqüentemente, a velocidade da corrente diminui, o diâmetro dos materiais em transporte também diminui. Para que as partículas do leito ou margens de um vale fluvial sejam movimentadas, é necessária uma velocidade de corrente superior à que se requer para transportá-las ou sedimentá-las. Para sedimentos de pequenas dimensões até mesmo correntes fracas podem provocar erosão.

A configuração espacial de uma bacia hidrográfica reflete o caráter e a distribuição das unidades de paisagem. Os rios estão em constante interação com os demais elementos da bacia hidrográfica, através de ligações longitudinais e laterais. As ligações longitudinais se referem à relação montante – jusante e afluentes. As ligações laterais são referentes às interações entre as planícies e os canais e também entre as encostas e os canais. A avaliação destas ligações é necessária para avaliar como os impactos externos ao rio, tais como o fornecimento de sedimentos, diminuição da oferta de água afetam outras partes da bacia. A distribuição dos tipos de rios em cada sub-bacia, e como eles se encaixam na bacia hidrográfica como um todo, fornece uma base física para interpretar essas ligações (BRIERLEY e FRYIRS, 2005). Pode-se ainda acrescentar a ligação vertical, representando a relação entre o rio e o lençol d'água.

A Figura 2.4 ilustra estas diversas ligações em cada zona, através de um esquema representando uma bacia idealizada. Os padrões de conectividade longitudinal, lateral e vertical variam nas diferentes zonas (cabeceira, trecho médio e planícies baixas), afetando a função das fontes de sedimentos, transporte e zonas de acúmulo de sedimentos (BRIERLEY e FRYIRS, 2005).

A avaliação geomorfológica fornece uma estrutura baseada em processos para definir a dinâmica da bacia hidrográfica do passado e do presente, desenvolver soluções integradas e avaliar as conseqüências das atividades de requalificação. Ela forma a base para a análise e para a elaboração de projetos e é, portanto, um passo essencial no processo de planejamento, seja para a recuperação de um único trecho de rio ou para desenvolver um plano abrangente para toda a bacia hidrográfica (FISRWG, 1998)

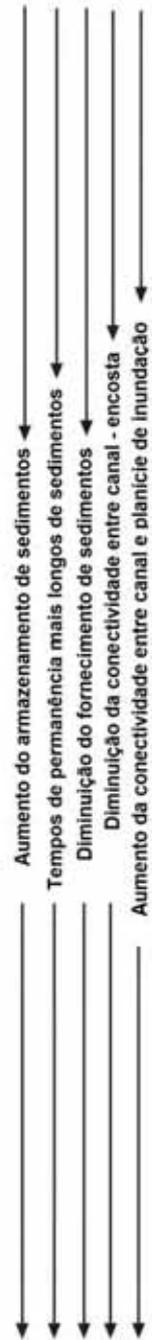
A geomorfologia fluvial tem muito a oferecer para a gestão dos sistemas fluviais complexos. A forma de ver o mundo como um sistema hierárquico integrado, em que a consideração da escala espacial e temporal fornece o contexto para a compreensão

do comportamento do sistema é um dos seus pontos fortes. Grande parte do progresso futuro em geomorfologia fluvial se apóia em sua capacidade de compreender e interpretar as ligações internas e a conectividade entre fragmentos de formas e processos fluviais em diferentes escalas espaciais e temporais (DOLLAR, 2004).

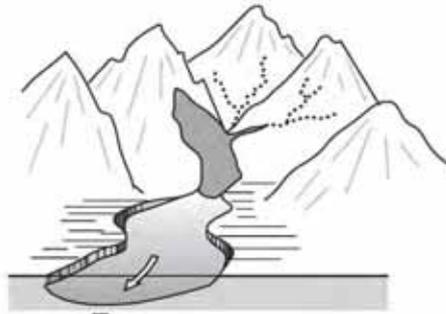
Nos últimos tempos, as atividades humanas têm aumentado seus efeitos sobre a geomorfologia fluvial, induzindo modificações, ou modificando diretamente os canais fluviais. Exemplos destas modificações estão nas obras de engenharia, para proteção de margens e controle de vazão. Esses tipos de mudanças fluviais acarretam transformações em todos os componentes da paisagem e, não raramente, acabam prejudicando o próprio homem (CUNHA, 2001).

A compreensão da geomorfologia fluvial contribui para racionalizar as questões que envolvem a manutenção do canal ou a requalificação de rios, concentrando-se sobre as implicações das medidas propostas na forma do canal e na estabilidade dos rios. O uso da geomorfologia é essencial no planejamento de projetos sustentáveis, pois esta ciência abrange tanto o habitat físico quanto a estabilidade morfológica do canal (SHEAR *et al.*, 2003).

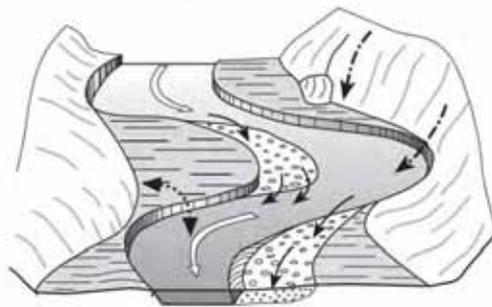
Mudanças nas ligações a jusante



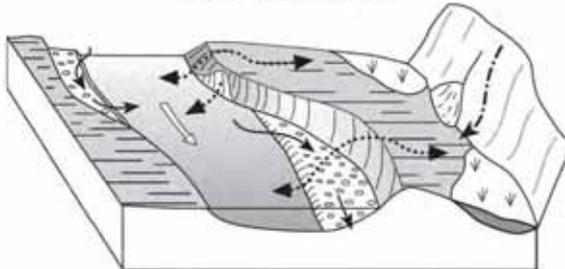
Cabeceira



Trecho médio



Planícies baixas



Tipos de ligações

- Zona de origem de sedimentos;
- Encostas e canais acoplados;
- Afluentes e trechos do rio conectados;
- Transferência longitudinal de sedimentos eficiente;
- Entrada de matéria orgânica particulada grossa direto da zona ribeirinha;

- Zona de transferência de sedimentos;
- Declividade irregular;
- Afluentes podem estar desconectados do trecho do rio;
- Transferência longitudinal de sedimentos eficiente;
- Matéria orgânica particulada fina;
- Conectividade entre o canal e a planície de inundação irregular;
- Trocas verticais limitadas.

- Zona de acúmulo de sedimentos;
- Encostas e canais dissociados;
- Afluentes podem estar desconectados do trecho do rio;
- Ocorre o armazenamento de sedimentos e a transferência longitudinal é ineficiente;
- Matéria orgânica particulada fina é dominante;
- Alta conectividade do canal com a planície de inundação;
- Vastas trocas verticais.

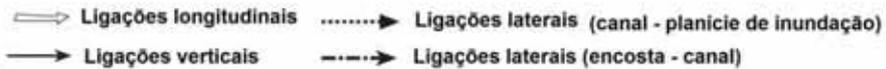


Figura 2.4: Esquema de uma bacia idealizada representando suas conectividades longitudinais, laterais e verticais. Fonte: Adaptado de BRIERLEY e FRYIRS (2005).

2.3 Requalificação fluvial

Não é de hoje que as cidades têm sofrido com os problemas de enchentes, perda da mata ciliar, erosões, sedimentação dos rios e poluição das águas. A solução tradicional para esses problemas, por muitos anos, foi a canalização de rios urbanos, aumentando a capacidade do canal e a utilização destes para o transporte de efluentes, a construção de barragens, entre outras soluções, que por algum tempo pareciam ter resolvido os problemas que afetavam as populações (NARDINI e PAVAN, 2012).

Com o passar do tempo, porém, verificou-se que essas soluções só adiavam um problema, que se tornava ainda maior, e aumentava a degradação dos rios e o risco hidráulico. Os esquemas de controle de cheias no passado falharam em cumprir a promessa de controle de inundações, com o agravamento dos efeitos da urbanização, o avanço sobre a planície de inundação e as políticas falhas de uso do solo. A população passou a ver os rios apenas como condutores de esgoto e lixo (POMPÊO *et al.*, 2011).

Esses impactos passaram a acarretar o desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos, a perda da quantidade e qualidade de água nos rios e o comprometimento dos usos dos recursos hídricos (MORAES *et al.*, 2011).

A preocupação em reverter este quadro ou, ao menos, amenizar estes problemas, evitando a degradação dos rios e melhorando a qualidade de vida da população e sua relação com os mesmos, surge no tema relacionado à restauração de rios. Ao longo das últimas décadas, vem se discutindo a reintrodução do rio como elemento vivo na paisagem urbana, recuperando as funções ecológicas, sociais e hidrológicas dos córregos (RIGOTTI e POMPÊO, 2011). As perturbações ambientais na estabilidade do canal, a qualidade da água e o habitat se reuniram em um movimento crescente de restauração e gestão de bacias.

Esta abordagem é recente no Brasil, mas em países como os Estados Unidos, Austrália, Inglaterra, Alemanha, Itália e outros países da Europa já é formalmente desenvolvida há mais de 20 anos. Existem relatos ainda mais antigos, que podem ser associados a esse tema, de 3500 a.C., no vale do Eufrates e no vale do rio Nilo onde árvores foram plantadas e canais escavados para modificar o clima quente da região, proporcionar amenidades estéticas e transmitir conceitos religiosos e simbólicos. A tradição de integrar à paisagem água, plantas e recreações foi transmitida pela cultura Persa para as culturas Mediterrâneas do Norte da África, Espanha e, mais tarde, Itália. Na Itália os projetos paisagísticos da Renascença influenciaram, nos séculos XVI e

XVII, a França, que, por sua vez, influenciou os Ingleses. Estes promoveram a ideia de melhorar a natureza, criando lagos e reservatórios que se misturavam ao ambiente natural e compunham uma paisagem agradável. Esta prática foi seguida por Frederick Law Olmsted, arquiteto-paisagista norte-americano, em seu projeto do Central Park na cidade de Nova York. Olmsted também foi responsável por encorajar comunidades nos Estados Unidos a integrar rios e corredores verdes no projeto de cidades e povoados e foi um dos percussores nas técnicas de restauração (RILEY, 1998).

Mais recentemente, impulsionados pela Diretiva Quadro da Água (DQA) – quadro comunitário estabelecido em 23 de outubro do ano 2000 pela União Européia para a proteção e a gestão da água – foram criados ou impulsionados os Centros de Restauração Fluvial na Europa.

Entre os principais aspectos introduzidos pela DQA, alguns devem ser destacados:

- Abordagem integrada de proteção das águas de superfície e águas subterrâneas;
- Avaliação do estado das águas, através de uma abordagem ecológica;
- Planejamento integrado em nível da bacia hidrográfica;
- Estratégia para a eliminação da poluição causada por substâncias perigosas;
- Instrumentos financeiros para apoio à restauração;
- Incremento da divulgação da informação e incentivo da participação do público;
- Organização do quadro legal comunitário.

Esta Diretiva tem como principal objetivo alcançar um “bom estado” de todas as águas comunitárias até 2015 e estabelecer um enquadramento para a proteção das águas de superfície interiores, das águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas que:

1. Evite a continuação da degradação, proteja e melhore o estado dos ecossistemas aquáticos e terrestres, e zonas úmidas diretamente dependentes dos ecossistemas aquáticos, no que diz respeito às suas necessidades da água;
2. Promova um consumo de água sustentável, baseado numa proteção em longo prazo dos recursos hídricos disponíveis;
3. Vise uma proteção reforçada e um melhoramento do ambiente aquático, nomeadamente através de medidas específicas para a redução gradual das vazões, das emissões e perdas de substâncias prioritárias e da cessação ou eliminação por fases de descargas, emissões e perdas dessas substâncias prioritárias;

4. Assegure a redução gradual da poluição das águas subterrâneas e evite a agravação da sua poluição; e
5. Contribua para mitigar os efeitos das inundações e secas.

Os aspectos inovadores da DQA se refletem em novas práticas de planejamento e gestão dos recursos hídricos em toda a União Europeia e começaram a influenciar outros países.

No Brasil, a preocupação em se proteger e recuperar as áreas geográficas que influenciam a preservação e proteção dos cursos d'água e que permitem espaço aos rios, foi atendida com o estabelecimento legal das Áreas de Preservação Permanente (APP's), que surgiu primeiramente com a criação do Código Florestal de 1934. Naquela ocasião estas áreas eram denominadas florestas protetoras. Em 2012, com a aprovação do Novo Código Florestal (Lei 12.651/12), as já denominadas APP's englobam, entre outras áreas, a faixa marginal de proteção e os topos de morros. Embora o Brasil tenha esta legislação federal relativa à proteção da faixa marginal em rios e córregos, esses corpos d'água são submetidos a impactos intensos, principalmente nas áreas mais urbanizadas, onde são transformados em canais utilizados apenas para o transporte de efluentes e água da chuva (POMPÊO *et al.*, 2011).

A criação, em 2007, do Departamento de Revitalização de Bacias Hidrográficas (DRB) certamente marca um grande avanço no processo de restauração das bacias hidrográficas no Brasil. Juntamente com os Departamentos de Ambiente Urbano e de Recursos Hídricos, o DRB compõe a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU) do Ministério do Meio Ambiente (MMA). A SRHU tem como objetivo a recuperação, preservação e conservação das bacias hidrográficas através de ações sustentáveis no uso dos recursos naturais, melhoria das condições socioambientais e da disponibilidade de água em quantidade e qualidade para os diversos usos a que se detém (BRASIL, 2010).

A prática da recuperação de canais fluviais está em crescimento e a consideração dos processos geomorfológicos, em conjunto com os processos hidrológicos e ecológicos, é determinante para caracterizar o ecossistema aquático. A recuperação dos canais representa um esforço para melhorar a qualidade e a integridade dos sistemas aquáticos. Essa prática coincide com o recente crescimento da melhoria dos sistemas que têm sido impactados pela tentativa de controlar sua função natural de navegação, produção de energia, irrigação ou controle de inundação. Esses processos afetam a preservação da biodiversidade e manutenção dos limites de *habitats* requeridos para

sustentar a diversa manutenção da flora e fauna que caracterizam os canais dos rios e suas formas associadas. A conservação dos sistemas fluviais requer ativa gestão antes que a degradação irreversível tenha se instalado (BROOKES e SHIELDS, 1996).

Muitos são os termos utilizados para definir as técnicas que visam à melhora dos cursos d'água, como restauração, revitalização, renaturalização, reabilitação, remediação, entre outros. Neste trabalho será utilizado o termo requalificação fluvial, que tem origem no termo italiano *requalificazione fluviale* e pode ser considerado sinônimo do termo em inglês *river rehabilitation*.

Segundo o Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale (CIRF, 2006), a requalificação fluvial é o conjunto integrado e sinérgico de ações e técnicas, dos mais diversos tipos (desde aspectos jurídico-administrativo-financeiro até aspectos estruturais), destinadas a tornar um curso d'água, com a área mais intimamente ligada a ele ("sistema do rio"), a um estado mais natural possível, capaz de desempenhar as suas funções nas características do ecossistema (geomorfológicas, físicas, químicas e biológicas) e com maior valor ambiental, tentando satisfazer ao mesmo tempo o desenvolvimento socioeconômico.

Enquanto a restauração implica o regresso do ecossistema fluvial às suas condições e funções originais, quase primitivas, com baixos níveis de intervenção humana, considera-se mais adequada e atingível a designação de requalificação (ou reabilitação), ou seja, o retorno parcial às condições estruturais e funcionais existentes antes da degradação do rio e que respeite os usos da água (RUTHERFURD *et al.*, 2000; BRIERLEY e FRYIRS, 2005; FINDLAY e TAYLOR, 2006).

A Figura 2.5 apresenta um diagrama que ilustra as diferenças entre os termos mais utilizados. O termo restauração envolve devolver o rio para o estado original, pré-urbanização. A reabilitação envolve a reparação de apenas alguns aspectos do rio, mas geralmente tornando o rio degradado mais perto da condição original. Já o termo remediação reconhece que não é possível alcançar a condição original e aponta para uma nova condição, pois as mudanças ocorridas no rio são praticamente irreversíveis (RUTHERFURD *et al.*, 2000).

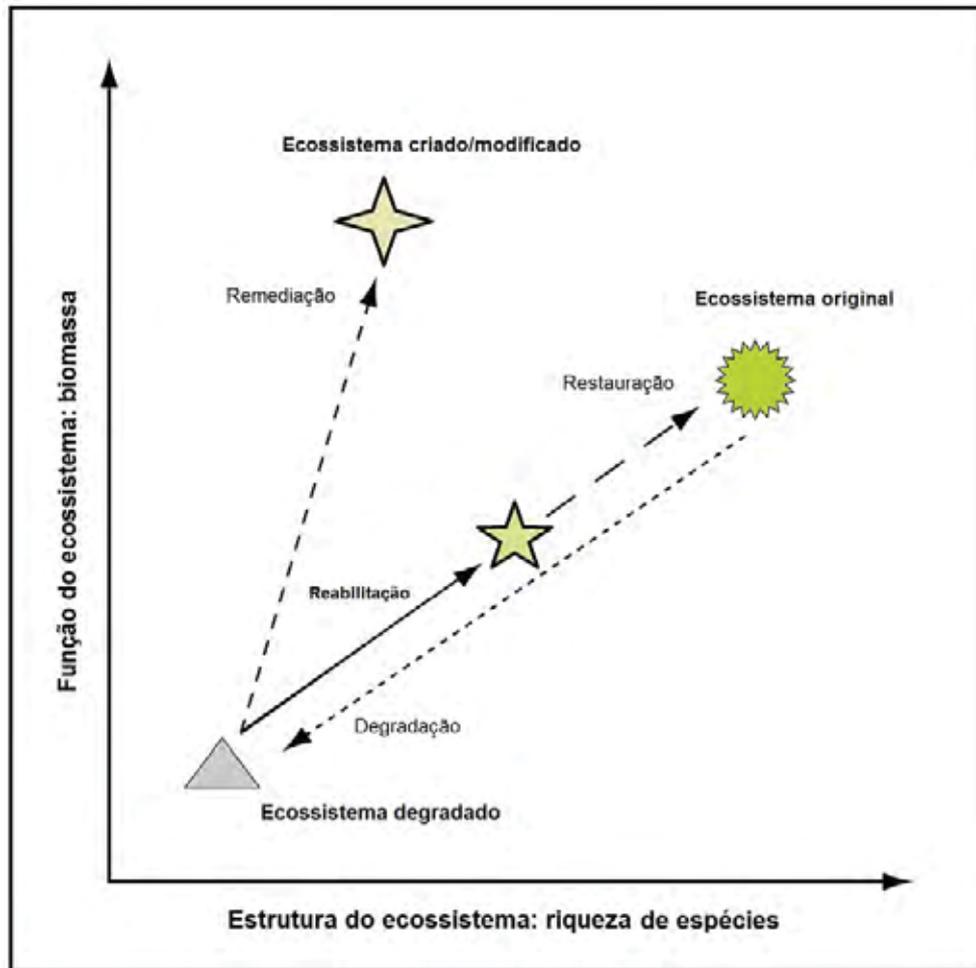


Figura 2.5: Diagrama esquemático mostrando a distinção entre os termos restauração, requalificação e remediação. Fonte: adaptado de BRADSHAW, 1996.

Na requalificação, a primeira regra é evitar o dano. Danificar rios naturais é relativamente fácil, mas devolvê-los ao seu estado original demanda grande dificuldade e recursos financeiros. Normalmente, não é possível devolver o rio a algo que se aproxime da complexidade de um sistema natural. Por esta razão, a prioridade é evitar maiores danos aos córregos e rios, especialmente àqueles que permanecem em bom estado de conservação (RUTHERFURD *et al.*, 2000; CIRF, 2006). A Figura 2.6 mostra a visão da requalificação como um compromisso entre reabilitação fluvial e integração com os usos sócio-econômicos.

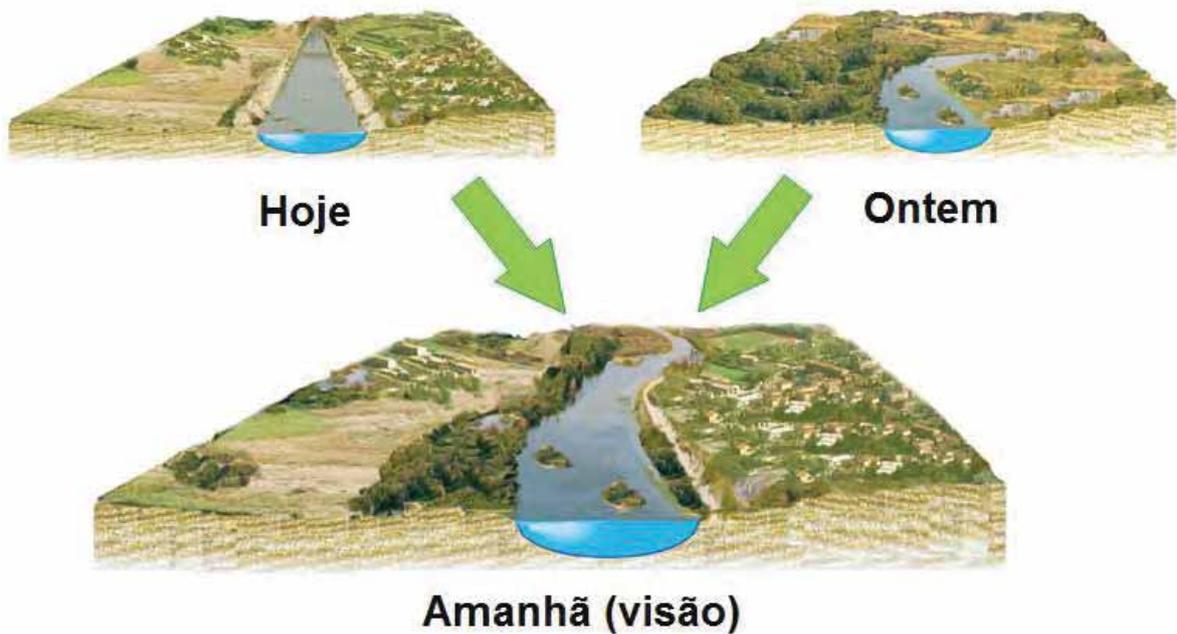


Figura 2.6: A visão da requalificação é reverter a degradação, buscando não piorar, melhorando sempre que possível, e tentando alcançar uma condição mais próxima possível da condição original. Fonte: adaptado de CIRF, 2006

Segundo o National Research Council (1992), um projeto de restauração ideal vai buscar alcançar cinco objetivos, muitas vezes difíceis de serem atingidos:

1. restauração do habitat natural da qualidade da água;
2. restauração dos sedimentos naturais e regime de vazões (incluindo as flutuações sazonais);
3. restauração da geometria natural e estável do canal;
4. restauração da vegetação marginal natural, e
5. restauração das plantas aquáticas e animais nativos.

A Figura 2.7 mostra a reação de um sistema ambiental diante de um esforço ou tensão que lhe é imposto e permite avaliar a complexidade dos sistemas naturais que são dependentes de uma série de fatores. Diante da aplicação de um esforço, um sistema natural vai reagir e seu equilíbrio dinâmico será rompido. Se ocorrer o fim do esforço antes do nível do limiar de recuperação, há condições para recuperação e até restauração; caso o esforço continue sendo aplicado, até que o sistema ultrapasse o nível do limiar, não é mais possível retornar ao estado original. Com a eliminação do esforço, um novo equilíbrio é atingido ao longo do tempo (DREW, 1986).

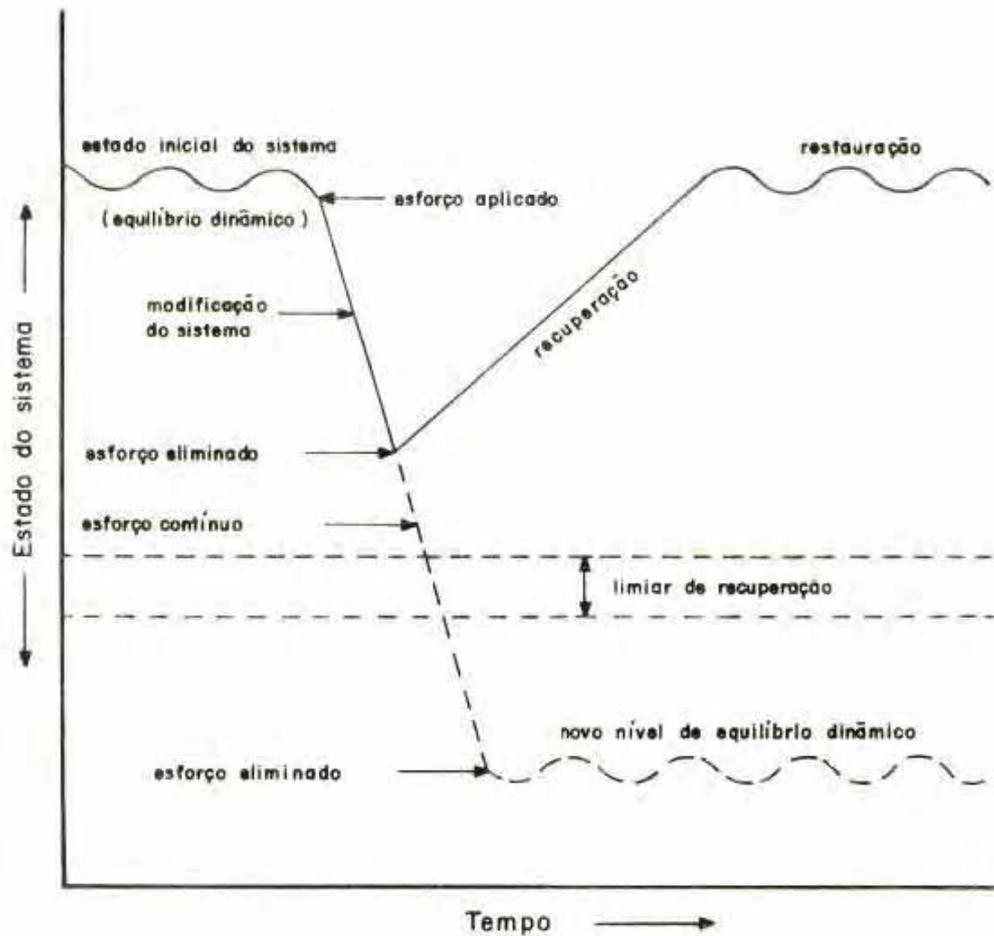


Figura 2.7: Reação de um sistema ambiental perante um esforço ou tensão que lhe é imposto.
 Fonte: DREW (1986).

Dependendo do estado e do tipo de degradação de um rio, os desejos ou as possibilidades de devolvê-lo à melhores condições, características ou elementos diferentes, como o componente hidráulico, qualidade da água, geomorfologia e biota, pode ou não ser alcançado. Também é possível mudar os fatores que aumentam os riscos com o objetivo de reduzi-los ou mesmo incentivar o uso econômico e o lazer por meio de uma abordagem sustentável (IDÁRRAGA, 2010).

A abordagem da requalificação fluvial requer a compreensão da natureza biofísica do rio, baseada na sua estrutura geográfica e nos processos fluviais da região, bem como a compreensão de sua evolução histórica (ROSGEN, 1994). Isto, juntamente com dados da hidráulica e hidrologia e levantamentos de campo, permite uma abordagem mais completa de requalificação do rio.

O rio não deve ser considerado como um sistema isolado, ele faz parte de um sistema constituído por um conjunto de linhas de água que compõem a rede hidrográfica, formando a bacia hidrográfica que deve ser considerada como uma unidade

geomorfológica fundamental. Ao desenvolver projetos de requalificação fluvial todos os aspectos que interferem no rio devem ser considerados de forma integrada.

Processos físicos, incluindo os de produção de sedimentos, fluxo e armazenamento, são fundamentais para o funcionamento ecológico dos sistemas fluviais. As dinâmicas geomorfológicas dos rios são cada vez mais vistas como vitais para a criação e manutenção de habitat físicos e dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos. O transporte de sedimentos, a erosão das margens e a mobilidade associada do canal, representam processos físicos fundamentais e sua compreensão é de crucial importância para a requalificação dos rios e definição de estratégias de gestão (RINALDI *et al.*, 2008).

A restauração de rios na Europa e em outras partes do mundo, está cada vez consciente da importância dos processos geomorfológicos, como uma condição necessária para melhorar as condições do rio e promover sua recuperação. Passaram a ser consideradas, na restauração de rios, a gestão de processos fluviais básicos, como erosão das margens, transporte de sedimentos, incisão de canais e cursos d'água, entre outros.

Na requalificação fluvial existem duas linhas de ação: as medidas não-estruturais e as medidas estruturais. As medidas não estruturais são uma abordagem predominantemente preventiva, cujo objetivo é minimizar os impactos negativos de projetos com intervenções estruturais integradas. Estas medidas compreendem: cultura, conscientização, processos de planejamento e tomada de decisão, regulamentos, incentivos, informação e monitoramento. As medidas estruturais se utilizam de estruturas físicas e intervenções preventivas e corretivas tais como: devolver espaço ao rio, remover elementos de risco, restaurar a vegetação, melhorar o regime hídrico e melhorar a qualidade da água (CIRF, 2006).

Um problema significativo na requalificação de rios é determinar a que condição o rio deve ser restaurado (condição de referência), para que o rio funcione harmoniosamente no seu novo estado, nos anos após a conclusão da requalificação. Para tanto, é necessário, como já citado anteriormente, entender o comportamento do rio e da bacia hidrográfica e, então, a partir da determinação da condição de referência, definir objetivos claros que se deseja alcançar com a requalificação. A definição de objetivos é um dos passos mais importantes na concepção e implementação de um projeto e serve como meio para avaliar o seu sucesso (FISRWG, 1998; HOBBS, 2003).

A determinação das condições de referência apropriadas, que podem se referir a um ponto fixo no tempo histórico ou um conjunto de condições geoecológicas, representa um desafio crítico na prática de requalificação (HIGGS, 2003 *apud* BRIERLEY e FRYIRS, 2005). A identificação das condições de referência ajuda na interpretação do potencial dos locais de requalificação. Condições de referência podem ser determinadas com base em dados históricos (análise de mapas históricos, entrevista com moradores), dados obtidos por paralelismo, a partir de situações reais em outro lugar, conhecimento sobre a estrutura e funcionamento do sistema em geral (conhecimentos teóricos), ou uma combinação de todas estas fontes (LEUVEN e POUDEVIGNE, 2002).

De acordo com ROSGEN (2006), a avaliação do rio e da bacia hidrográfica é uma das principais etapas em um plano de requalificação, pois identifica as causas e consequências associadas à perda da função física e biológica do rio. O autor afirma que é importante: a) uma revisão histórica do uso do solo e as tendências temporais de mudanças no rio, b) isolar as principais causas de instabilidade e/ou perda de função física e biológica; c) coletar e analisar dados de campo, incluindo dados da condição de referência, a fim de definir parâmetros sedimentológicos, hidráulicos e morfológicos; d) obter dados biológicos concorrentes em paralelo aos dados físicos e, e) quantificar as mudanças nos regimes de vazão e sedimentos.

Ao se definir os objetivos podem existir, e provavelmente existirão, objetivos conflitantes. Estes conflitos deverão ser discutidos e compensados a partir da variação do projeto ou da natureza dos métodos de estabilização. A avaliação exigida também deverá refletir os objetivos de requalificação a fim de garantir que todos os processos sejam avaliados cuidadosamente (ROSGEN, 2006).

De acordo com o Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG, 1998), os componentes do processo para a definição dos objetivos devem:

- Definir a condição futura desejada;
- Identificar considerações da escala de trabalho;
- Identificar as restrições para a restauração/requalificação e problemas;
- Definir metas e objetivos

Um dos maiores desafios da requalificação fluvial é demonstrar que os rios mais naturais são compensadores e socialmente desejáveis, não apenas por razões puramente ambientais, mas também porque podem reduzir o risco ou, pelo menos, o custo total do risco esperado, incluindo o investimento e a manutenção das intervenções (NARDINI e PAVAN, 2012).

A requalificação fluvial pode trazer contribuições significativas para a redução do risco de inundação, aumentando a capacidade de retenção natural dos rios. O excesso de água pode ser absorvido pela recuperação das zonas úmidas e planícies aluviais, formando meandros e outras áreas de armazenamento naturais.

Há muitas razões válidas e tangíveis para a reabilitação de rios. Alguns desses fatores são abundantemente óbvios e incluem, por exemplo, a qualidade da água e redução da erosão, enquanto outros são mais obscuros e menos tangíveis, tais como os benefícios econômicos e sociais indiretos, mas que muitas vezes são igualmente importantes. É a combinação destes fatores que determinam se ou um rio deve ou não ser requalificado, o nível e grau da requalificação e as metas ambientais que serão definidas (FINDLAY e TAYLOR, 2006).

Diversas são as razões para requalificar rios, como a restauração de ecossistemas, controle de cheias, reconexão entre o rio e a planície de inundação, proteção das margens, manejo dos sedimentos, qualidade da água, estética e recreação. A conectividade hidrológica e geomorfológica entre o canal e a planície de inundação tem se mostrado fundamental para a manutenção da biodiversidade, produtividade, atenuando ondas de cheia, reduzindo a carga de nutrientes, melhorando a qualidade da água, segurando os sedimentos na planície de inundação e promovendo maiores taxas de recarga das águas subterrâneas (HOLMES, 1998).

Os benefícios da restauração fluvial, de acordo com o European Centre for River Restoration – ECRR (Centro Europeu para Restauração de Rios) são:

- Soma-se às atrações visuais da cidade e complementa outras iniciativas de regeneração urbana;
- Traz benefícios comerciais tais como a melhor imagem para as propriedades e até 20% de aumento no valor dos terrenos ou aluguéis;
- Providencia valiosos charcos/ *habitats* aquáticos;
- Cria lagoas de equilíbrio (*balancing ponds*) para ajudar a reduzir as inundações à jusante;
- Reduz os custos de manutenção e construção, usando técnicas de bioengenharia natural em vez de construções de concreto;
- Oferece oportunidades educacionais e de lazer para crianças;
- Aumenta rotas de pedestres e ciclovias pela cidade;
- Usa a água em movimento para mascarar o ruído da cidade e proporcionar uma atmosfera de calma e tranquilidade;

- Melhora a qualidade de vida dos moradores da cidade dando um toque de campo à cidade;
- Dá ao lugar um sentido de identidade, pois cada combinação de formas de relevo, interior, edifícios e pontes é única.

De acordo com RILEY (1998) podemos ainda citar outros aspectos incentivadores da requalificação de cursos de água:

- Redução de danos da erosão nas margens dos cursos de água;
- Preservação ou restauração de recursos históricos ou culturais;
- Encorajamento do retorno de aves e vida selvagem a refúgios urbanos;
- Fornecimento de cinturões verdes, espaços abertos e parques;
- Criação de oportunidades de navegação e outras recreações aquáticas;
- Retorno ou melhora da pescaria recreacional ou comercial;
- Fornecimento de uma fonte segura de alimento para família de pescadores.

Projetos de requalificação ao redor do mundo comprovam as vantagens associadas a esta técnica e a possibilidade de mais projetos nesta área. Alguns exemplos podem ser citados como o rio Reno, na Holanda, rio Drava, na Áustria e Alemanha, rio Loire, na França, rio Isar, na Alemanha, rio Tâmis, na Inglaterra e o rio Cheonggyecheon, na Coreia do Sul.

A escolha da alternativa de requalificação de rios ainda não representa a opção da maioria das intervenções que os cursos de água sofrem no Brasil. No entanto, algumas cidades brasileiras como Belo Horizonte possuem experiências na recuperação de rios urbanos, seguindo a tendência mundial, a exemplo do Programa DRENURBS – Programa de Recuperação Ambiental do Município de Belo Horizonte, que procura incluir os cursos de água na paisagem urbana e evitar a canalização (DRENURBS, 2010). Um dos casos em Belo Horizonte é o do rio das Velhas. Outro exemplo nacional é o caso do Córrego Tijuco Preto em São Carlos, no Estado de São Paulo. O projeto da Universidade de São Paulo (USP) passou a ser programa e atualmente possui ações executadas pela prefeitura de São Carlos (CONDEMA – São Carlos, 2010).

Alguns exemplos, a título ilustrativo e sem pretensão de esgotar o assunto, são descritos a seguir:

Rio Isar – Múnico de Baviera

A Alemanha é um dos países de referência em recuperação de rios. O rio Isar, um dos afluentes do rio Danúbio, possui 295 km de extensão. Sua recuperação começou em 2000 a partir da demanda da população de Munique por melhor proteção contra

inundações e por paisagens naturais para lazer e recreação. O projeto se estendeu para o restante da bacia com o objetivo de restaurar *habitats* valiosos para a fauna e a flora (BINDER, 2004). A Figura 2.8 e a Figura 2.9 apresentam imagens do rio Isar antes e depois da sua recuperação.

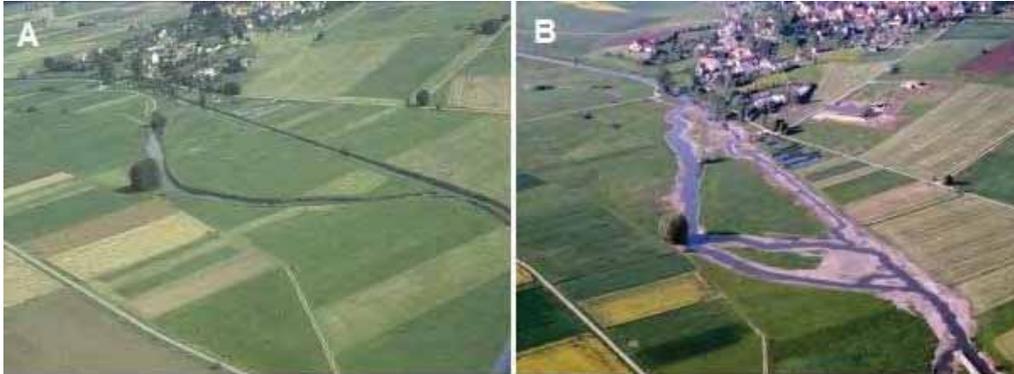


Figura 2.8: Imagem aérea do rio Isar, antes (A) e depois (B) da sua recuperação. Fonte: CIRF, 2006.



Figura 2.9: Fotografias do rio Isar antes (A) da recuperação com o canal retificado e depois (B).
Fonte: BINDER, 2004.

Rio das Velhas – Belo Horizonte MG

O Rio das Velhas é o maior afluente do Rio São Francisco, um dos principais rios do Brasil. Com 761 km de extensão, o rio corta 51 municípios e tem a Região Metropolitana de Belo Horizonte como seu maior agente poluidor. Sua revitalização é uma das principais prioridades do Governo de Minas, realizada por meio do programa Meta 2010, que conta com investimento de R\$ 1,3 bilhão. O projeto começou em 2003, a partir de um projeto de uma organização não-governamental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Toda a extensão do rio foi percorrida por água e por terra e foram identificados os principais focos de poluição e o que deveria ser feito para o controle. As ações são coordenadas pelo Estado em parceria com a sociedade, prefeituras e serviços municipais de saneamento, secretarias estaduais, comunidade e empresas. A meta do programa é melhorar a qualidade da água do rio das Velhas reenquadrando, da classe III para a classe II, o trecho do rio que passa pela Região

Metropolitana de Belo Horizonte. Isso significa que a água poderá ser destinada ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, além de atividades de lazer, irrigação e criação de peixes (Projeto Manuelzão, 2012).

Projeto de requalificação do rio Liesing – Viena – Áustria

Este projeto decorreu entre 2002 e 2006 e teve como objetivo a requalificação de parte do rio Liesing, situado na zona sul de Viena, Áustria. O “LiRiLi”, como é chamado, foi um projeto piloto desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Fluvial da cidade de Viena abrangendo 5,5km do rio e visando maximizar o seu potencial ecológico. Este foi parte de um projeto maior, que tem como objetivo a recuperação de todo o rio. Foi o primeiro projeto de requalificação fluvial desta magnitude em zonas urbanas (SARVAN, 2007).

Este projeto teve várias ações, como a criação de um novo traçado para o rio de modo a transformar um canal de concreto num canal semi-natural mantendo, no entanto, os objetivos de proteção contra cheias que originaram as primeiras intervenções. O leito do rio foi reconstruído com cascalho, foram restabelecidos os meandros e restaurou-se a capacidade de transporte do rio, propiciando condições morfológicas semi-naturais. Diminuiu-se o declive dos taludes mais íngremes, que também foram alargados e protegidos através de técnicas de engenharia naturalística. Foram estabelecidos novos ecossistemas aquáticos e criados novos *habitats*. O objetivo deste projeto não foi apenas a promoção da biodiversidade local, mas também o aumento da qualidade de vida dos habitantes. Foi construído um parque infantil e um caminho ao longo do rio, a fim de criar uma relação com as crianças e incentivá-las a proteger o rio. Durante todo o andamento da recuperação do rio, a população foi ativa e participativa e houve uma grande campanha incentivando a participação desta. A previsão é de que, até 2015, toda a extensão do rio Liesing que passa em Viena estará requalificada, passando esta a dispor de um novo corredor verde que percorrerá a cidade e oferecerá aos seus habitantes um ambiente natural agradável e relaxante (SARVAN, 2007). A Figura 2.10 mostra uma imagem do rio Liesing antes e depois da recuperação.



Figura 2.10: Rio Liesing antes (A) e depois da sua recuperação (B). Fonte: http://fluswikien.hfwu.de/index.php/River_Liesing,_Vienna.

Projeto de requalificação do rio Cheonggyecheon

O rio Cheonggyecheon, localizado em Seul (Coreia do Sul), possui aproximadamente 10km de comprimento. Este rio tinha cerca de 6 km da sua extensão cobertos por uma estrutura de concreto, que servia como estrada e sustentava uma auto-estrada suspensa com largura entre 50 a 80 m.

A recuperação do rio Cheonggyecheon, em Seul, Coreia do Sul, em 2005 (Figura 2.11), recebeu atenção mundial significativa. O projeto de resgate do rio envolveu a remoção de três quilômetros da estrada elevada e levou a melhorias no ambiente local propiciando acesso ao espaço verde ao longo do rio para os cidadãos locais (HWANG, 2004; LEE, 2005; fonte: site: <http://greatecology.com/watershed-era-urban-river-restoration/>)



Figura 2.11: Imagens do rio Cheonggyecheon antes, à esquerda, coberto pela estrada suspensa, e depois da sua requalificação, à direita, com a remoção da estrada e o espaço verde nas margens do rio. Fonte: <http://www.kcet.org>.

3 Apresentação do caso de estudo - bacia hidrográfica do rio Sesmaria

O caso de estudo deste trabalho, a bacia do rio Sesmaria, foi escolhido devido aos problemas de inundação que sofreu nos últimos anos e também devido ao histórico de uso e ocupação do solo. A seguir é apresentada uma caracterização da bacia, o uso e cobertura do solo histórico e atual e estudos correlatos.

3.1 Caracterização da bacia do rio Sesmaria

A bacia do rio Sesmaria está inserida na região conhecida como Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (MVRPS), no limite dos estados brasileiros de São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 3.1).

Segundo SILVA *et al.*(2006), na região do MVRPS, a morfologia do relevo é resultado de intensas variações dos níveis de base e das condições paleohidrológicas geradoras de repetidas fases de entalhamento fluvial e acentuado retrabalho da paisagem durante o Neógeno. Os rios e seus níveis de base locais estão relacionados com os processos que se desenvolvem nas encostas, da mesma maneira que as encostas, sendo fonte de água e sedimentos para os rios, estão diretamente ligadas à dinâmica fluvial.

A bacia do rio Sesmaria segue as estruturas geológicas herdadas, principalmente, da última fase orogênica do Cenozóico: drena para NE, no reverso da escarpa da falha Atlântica, localmente denominada Serra da Bocaina, e relaciona-se às direções estruturais regionais, assim como as bacias vizinhas do rio Bananal e Barreiro de Baixo. A bacia apresenta dois compartimentos topográficos principais, com desnivelamento topográfico de 1.680 m (2.080 no ponto mais alto a 400 m no mais baixo), muito semelhantes à bacia do rio Bananal: um montanhoso, com predomínio de erosão por mecanismos gravitacionais, e outro de colinoso, com ocorrência de espessos pacotes sedimentares da transição do Pleistoceno-Holoceno e processos de voçorocamento retrabalhando estes sedimentos (COELHO NETTO, 1999; COELHO NETTO, 2003). Os solos predominantes nesta região se enquadram como latossolos, sendo espessos, muito lixiviados e pobres em nutrientes, principalmente após o desmatamento da floresta Atlântica pela atividade cafeeira, no século XIX, que culminou na erosão de praticamente todo o horizonte A (DANTAS, 1995; SATO *et al.*, 2009).

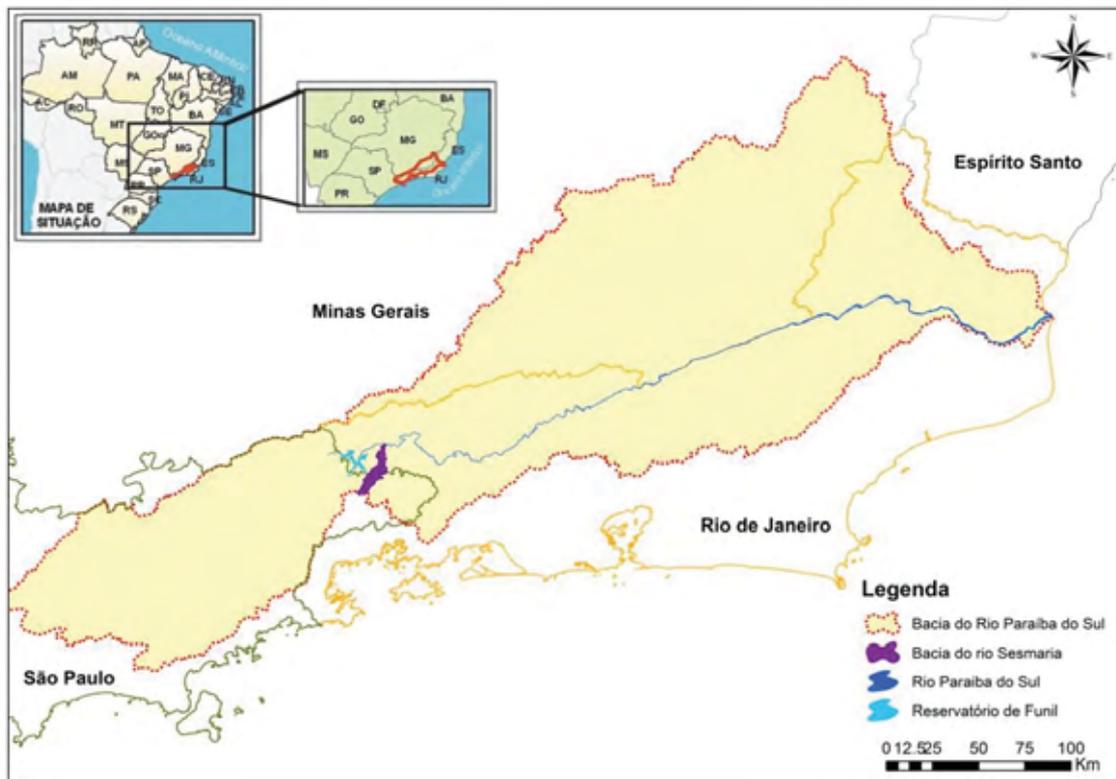


Figura 3.1: Mapa do Brasil com a localização da bacia do rio Paraíba do Sul e a bacia do rio Sesmaria. Fonte: adaptado de CBH-PS (disponível em <http://www.comiteps.sp.gov.br/imagens/mapao.jpg>).

As coordenadas do retângulo que envolve a bacia são: $-22^{\circ}27'45.5''$, $-44^{\circ}27'19,65''$; $-22^{\circ}42'50.46''$, $-44^{\circ}32'56.17''$. O rio Sesmaria é formado pelos rios Feio e Formoso. Nasce em São José do Barreiro (SP), atravessa parte deste município e segue seu curso até Resende, desaguando no Rio Paraíba do Sul, na parte central da cidade.

Esta região era originalmente coberta pela Mata Atlântica e é influenciada pela atuação da Massa Tropical Atlântica e pela Massa Polar. Segundo Rocha Leão (2005), o choque entre essas duas massas é responsável pelas frentes frias que tendem a se concentrar nos meses de verão e são responsáveis também pelas variações na pluviosidade média anual.

O clima da bacia é considerado subtropical com inverno seco e verão quente e temperatura média anual de 20°C , variando de 16° em julho a 23° em fevereiro. A precipitação média anual é de 1700 mm e as chuvas são concentradas entre os meses de outubro e março.

A bacia do rio Sesmaria possui uma área de drenagem de 149 km^2 . A extensão total do maior eixo de drenagem da bacia é de aproximadamente 38 km e é formado pelos rios Formoso e Sesmaria. O rio Sesmaria tem aproximadamente 21 km, sendo pouco mais de 16 km em região predominantemente rural, e cerca de 3,5 km atravessando a

região urbanizada de Resende. O principal afluente é o rio São João, que está localizado na margem direita do Sesmaria, 2,7 km a jusante da confluência dos rios Feio e Formoso.

Ao longo de seu comprimento, este rio passa por vales encaixados e planícies inundáveis. É um rio com certa sinuosidade e que tem sido submetido a constante transformação morfológica e hidrodinâmica, seja por parte do grande aporte de sedimentos advindos das modificações na bacia, ocasionando trechos assoreados, ou pela movimentação de suas margens e meandros, devido aos processos erosivos.

Próximo à foz do rio Sesmaria, está localizada uma importante área da cidade de Resende, que é uma das cidades históricas do Brasil-Colônia e o município mais antigo da região Sul-Fluminense. A cidade se desenvolveu rapidamente devido a sua localização estratégica, entre as capitais Rio de Janeiro e São Paulo, além de uma certa proximidade com a capitania de Minas Gerais. As primeiras mudas de café foram trazidas em 1770. O município cresceu em torno da cultura do café, onde o ciclo cafeeiro teve seu início e se tornou a base da economia do município por vários anos.

A Vila de Resende foi instalada no dia 29 de setembro de 1801. Fontes históricas afirmam que, em 1810, toda a área de Resende se encontrava coberta por cafezais, e nos anos seguintes se tornou o maior centro produtor do Vale do Paraíba e pólo irradiador, de onde as plantações se expandiram para São Paulo e Minas Gerais e, depois, para o Paraná e o Espírito Santo. Em 1848, o município elevou seu *status* de vila à cidade e, poucos anos depois, por volta de 1850, houve a crise do café, o que fez com que fosse necessário que as fazendas diversificassem a sua produção.

A Figura 3.2 mostra uma foto da cidade de Resende do ano de 1931. À direita, na foto, encontra-se a foz do rio Sesmaria.



Figura 3.2: Imagem de 1931 da cidade de Resende. A foz do rio Sesmaria está à direita da foto.
Fonte: Revista "A Granja", Número I, Ano II de Setembro de 1931

Atualmente, Resende é um importante pólo industrial, automotivo, metalúrgico, turístico e sede do segundo maior complexo militar do mundo, a Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN). Com um amplo parque industrial em franco desenvolvimento, Resende abriga unidades fabris de grande porte, com destaque para os setores metal-mecânico e químico-farmacêutico. Resende também assume importância nacional por abrigar a Fábrica de Combustível Nuclear que é a única no país capaz de promover o enriquecimento de urânio e faz parte do complexo das Indústrias Nucleares do Brasil. De acordo com o último censo do IBGE (Censo Populacional, 2010), a população de Resende é de aproximadamente 120 mil pessoas. A Figura 3.3 apresenta uma imagem da área urbana da bacia, que é parte da cidade de Resende.



Figura 3.3: Imagem aérea da parte urbana da bacia do rio Sesmaria.

Uso e cobertura do solo – Histórica e Atual

A bacia do rio Sesmária, assim como todo o MVRPS, historicamente, vem sendo submetida a sucessivas mudanças ambientais decorrentes dos diferentes modos de uso e cobertura do solo. Estas mudanças são resultado da evolução ocorrida ao longo de séculos no vale do rio Paraíba do Sul. Por estar localizada entre três Estados de grande importância política e econômica para o país (Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais), a bacia do rio Paraíba do Sul passou, ao longo de séculos, por diferentes tipos de uso e ocupação do solo e sofreu conseqüentemente, muitas mudanças em sua paisagem.

Originalmente, toda a região era ocupada por Mata Atlântica. Porém, no final do século XVIII até meados do século XIX, predominou na região o cultivo de café, que, pela sua grande força político-econômica, se expandiu descontroladamente por todo o vale do rio Paraíba, resultando na grande devastação da cobertura vegetal na região. Esta mudança na cobertura do solo promoveu alterações regionais nos regimes climáticos e hidrológicos (Dantas, 1995). Coelho Netto (1998) concluiu que a devastação da mata atlântica também provocou mudanças nas relações biota-água-solo e resultou na retomada da dissecação do relevo pela reativação de altas taxas de erosão nos depósitos quaternários dos fundos de vales, preenchidos por sedimentação aluvial e coluvial Quaternária.

No final do século XIX, após o declínio dessa atividade, observou-se no Sudeste e no Centro-oeste do país a expansão da fronteira agropecuária. Na bacia do rio Sesmária não foi diferente. As fazendas precisavam se sustentar e diversificar suas atividades. As encostas, já bastantes desgastadas pelo plantio extensivo do café, foram transformadas em extensos campos de gramíneas para a pecuária extensiva, o que gerou, novamente, alterações no regime hidrológico da região (DANTAS, 1995).

Nas décadas de 1940 e 1950, o crescimento da industrialização motivou a instalação de fábricas do setor automobilístico, aeroespacial e bélico na região. Em conseqüência disso, houve o crescimento dos núcleos urbanos no corredor Rio-São Paulo.

Desde o começo do século XXI, uma nova monocultura vem ganhando espaço. A expansão do cultivo do eucalipto em vastas áreas, que se iniciou em São Paulo, vem crescendo em direção ao Rio de Janeiro. De acordo com Sato (2008), no ano de 2000, 76% da área da bacia do rio Sesmária era composta por gramíneas e pastagens, enquanto manchas de cobertura arbórea (23%) concentravam-se no domínio montanhoso correspondente a Serra da Bocaina. A cidade de Resende ocupava 1% do território e não se observava plantio de eucalipto na bacia. Com a alta taxa de

expansão do plantio do eucalipto, atualmente observa-se várias fazendas da monocultura instaladas nos topos das colinas, ocupando a paisagem antes degradada. As gramíneas e pastagens passaram a representar 71% da região, as florestas 21% e o eucalipto 6%. Todavia, a parcela urbana da bacia passou a ocupar 2% do território, representada quase que unicamente pela área urbana de Resende. Estima-se um aumento ainda maior da área urbana, uma vez que a cidade está em pleno crescimento, o que pode ser observado pela instalação de condomínios residenciais em áreas rurais (Sato, 2008). A Figura 3.4 apresenta o mapa de uso e cobertura do solo atual da bacia

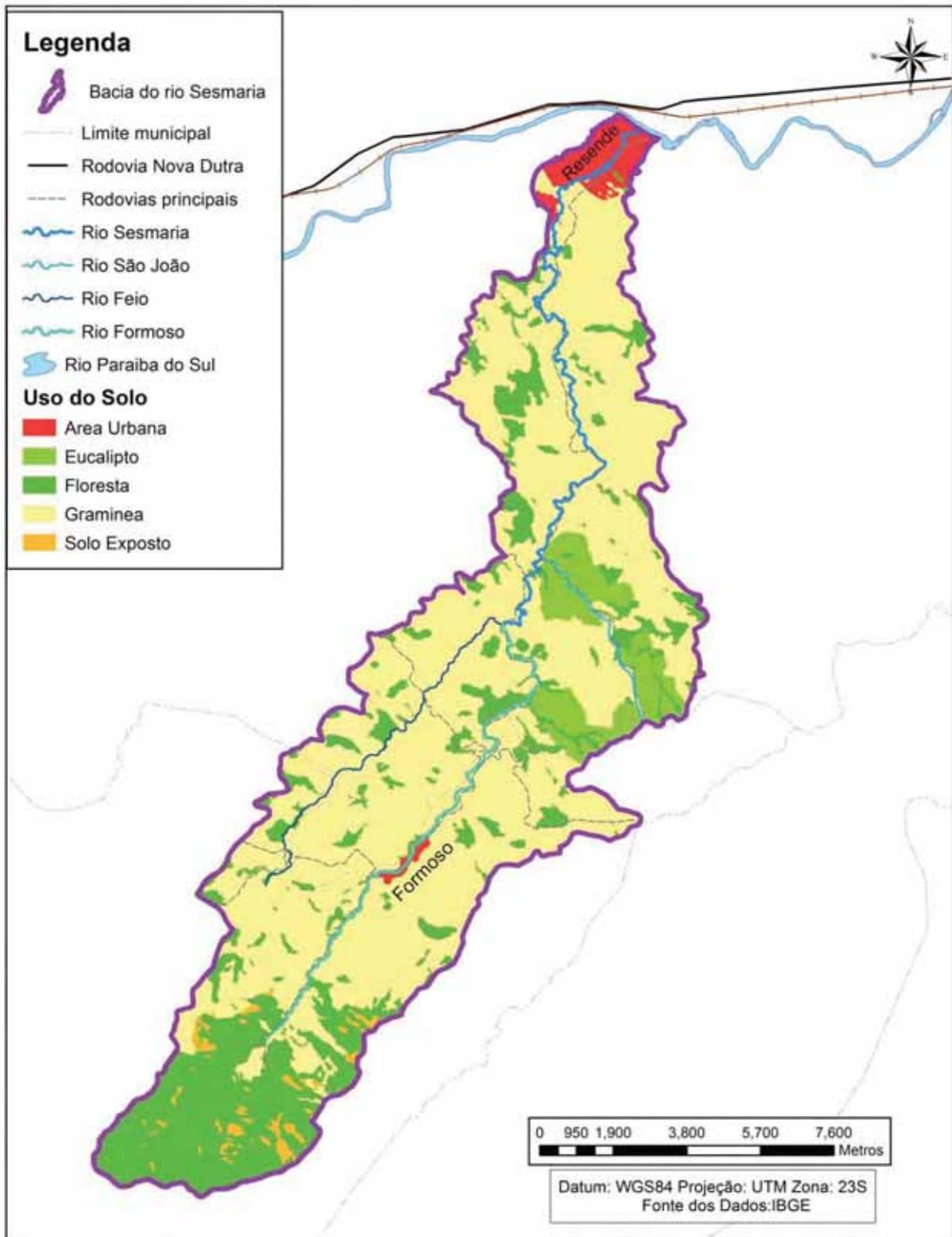


Figura 3.4: Mapa da bacia do rio Sesmaria e o uso e cobertura do solo. Fonte: adaptado de Sato (2008)

3.2 Histórico de enchentes

A bacia do rio Sesmaria, sempre sofreu com enchentes. Mais recentemente, em 2009, houve uma cheia que atingiu algumas casas, mas não provocou grandes estragos na cidade de Resende. No ano de 2010, a população sofreu com duas grandes enchentes consecutivas, uma em março e outra em dezembro. As duas cheias de 2010 alagaram muitos bairros da cidade e provocaram estragos em pontes e muros que estavam confinando o rio. Moradores afirmam que a enchente de dezembro de 2010 foi pior do que a que ocorreu em março. A Figura 3.5 mostra imagens da cheia do dia 16 março de 2010, quando mais de 100 casas e 7 bairros de Resende foram atingidos e uma ponte comprometida.



Figura 3.5: Imagens da enchente de março de 2010 mostrando o nível da água (A, B e C) e o estrago que a força da água fez na ponte na Av. Presidente Kennedy ao comprometer um de seus pilares. Fonte: Diário do Vale.

No evento dos dias 14 e 15 de dezembro de 2010, 9 bairros foram atingidos pela cheia e a ponte da Av. Saturnino Braga precisou ser interditada para evitar maiores prejuízos, pois a força do rio destruiu a cabeceira da ponte. A Figura 3.6 mostra imagens desta cheia e a destruição causada à ponte, além da erosão de uma das margens que derrubou uma parte de uma rua.



Figura 3.6: Imagens da cheia de dezembro (A e B) e da destruição da cabeceira da ponte (C) e em parte de uma rua que margeia o rio (D).

Em abril de 2012 o rio Sesmaria atingiu 1m acima do normal na cidade de Resende, preocupando a população, mas não chegou a transbordar. Estes eventos chamaram a atenção da população e das autoridades para esta bacia, que durante anos vem sendo degradada, tanto pelas modificações no uso e cobertura do solo quanto pela expansão imobiliária na região urbana, aumento do escoamento superficial e o confinamento da calha do rio pelas construções.

3.3 Estudos correlatos

São conhecidos alguns estudos realizados na bacia do rio Sesmaria, principalmente pelo Laboratório de Geohidroecologia (GEOHECO), que tem algumas estações pluviométricas e fluviométricas na região. Os estudos conhecidos estão relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Estudos correlatos na bacia do rio Sesmaria.

Estudos correlatos			
Tipo	Título	Autor	Ano
Artigo científico	Estudo geo-hidroecológico da introdução de monoculturas de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul	Anderson Sato <i>et al.</i>	2005
Artigo científico	Mapeamento de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sesmaria – médio vale do rio Paraíba do Sul	Lílian Gabriela Gomes Vianna	2006
Artigo científico	Hidrologia de encosta numa cabeceira de drenagem com cobertura de eucalipto na bacia do rio Sesmarias: médio vale do rio Paraíba do Sul	Anderson Sato <i>et al.</i>	2007
Dissertação de mestrado	Respostas geo-hidroecológicas à substituição das pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água	Anderson Sato	2008
Artigo científico	Bacia experimental do rio Sesmarias (médio vale do rio Paraíba do Sul): influência do eucalipto nos processos hidrológicos e erosivos	Anderson Sato <i>et al.</i>	2009
Artigo científico	Expansão do eucalipto no Vale do Rio Paraíba do Sul: subsídios: aos estudos hidrológicos de bacias	Lílian Gabriela Gomes Vianna <i>et al.</i>	2009
Monografia	Expansão do eucalipto no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: subsídios aos estudos hidrológicos de bacias	Lílian Gabriela Gomes Vianna	2010
Dissertação de mestrado	Respostas hidrológicas da bacia do rio Sesmaria, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: subsídios às transformações induzidas pelos plantios de eucalipto	Mariana de Araujo Abdalad	2011
Artigo científico	Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil	Anderson Sato <i>et al.</i>	2011
Tese de doutorado	Influência de Plantios de Eucalipto na Hidrologia e Erosão: Bacia do Rio Sesmaria, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul	Anderson Muluto Sato	2012

Foi realizado um estudo na bacia do rio Bananal, também localizada na região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e vizinha à bacia do rio Sesmaria, pelo geógrafo Marcelo Eduardo Dantas com orientação de Ana Luiza Coelho Netto como o título: *Controles naturais e antropogênicos da estocagem diferencial de sedimentos fluviais: bacia do rio Bananal (SP/RJ), Médio Vale do rio Paraíba do Sul* (DANTAS, 1995). Este estudo foi utilizado neste trabalho para estimar o perfil do rio no passado e será brevemente descrito a seguir.

Descrição do estudo de Marcelo Dantas para a bacia do rio Bananal

Este estudo visou analisar na bacia do rio Bananal e áreas adjacentes, o caráter não uniforme da sedimentação fluvial, no espaço e no tempo, resultante das transformações ambientais que modificaram o relevo em escala regional. Estas transformações ambientais ocorreram principalmente devido a dois eventos erosivos-deposicionais durante o Holoceno, identificados por COELHO NETTO *et al.* (1994), baseados em levantamentos estratigráficos. O primeiro registrado por volta de 10000 – 8000 anos atrás e o segundo registrado por volta de 200 anos atrás. O objetivo foi quantificar a magnitude de cada um dos dois eventos erosivo-deposicionais através do cálculo do volume de sedimentos fluviais estocados nas bacias fluviais e, com base na volumetria dos depósitos, estimar taxas de sedimentação e taxas de rebaixamento do relevo, no transcorrer dos dois eventos em análise.

O primeiro evento erosivo-deposicional é denominado de transição Pleistoceno-Holoceno. O segundo evento está relacionado à intervenção antropogênica. Está documentado nas planícies de inundação e associado ao desmatamento e à plantação de café em grandes áreas, que culminou na alteração da dinâmica hidrológica regional e promoveu generalizada erosão laminar nas vertentes.

Tendo em vista que a atual planície de inundação tem sua gênese associada à destruição da floresta nativa para a implantação de uma cultura de agro-exportação, gerando uma carga de sedimentos para os fundos de vales muito superior à sua capacidade de transporte, é possível determinar, com considerável precisão, o impacto geomorfológico resultante do ciclo cafeeiro numa bacia fluvial, através do cálculo de taxas de sedimentação dos depósitos de planície de inundação numa determinada bacia de drenagem. O período de tempo em que o solo esteve desprovido da cobertura vegetal capaz de evitar os processos laminares de carreamento dos sedimentos é equivalente a aproximadamente 100 anos.

Os cálculos das taxas de sedimentação foram obtidos pela fórmula:

$$T_s = D \times E \times t^{-1} \text{ (m}^3\text{/ano)} \quad (5)$$

Onde:

T_s = Taxa de sedimentação. (m³/ano)

D = Área do depósito. (m²)

E = Espessura do depósito. (m)

t = Duração do evento. (anos)

Para análise comparativa entre segmentos da mesma bacia, foi adicionado à fórmula o parâmetro comprimento do canal principal:

$$T_s = D \times E \times C \text{ (km}^{-1}\text{)} \times t^{-1} \text{ (em m}^3\text{/km/ano)} \quad (6)$$

Onde:

C = Comprimento do canal (km).

As taxas de sedimentação foram usadas para estimar taxas de rebaixamento do relevo nas áreas-fonte, ou seja, na bacia de drenagem em estudo. Os cálculos seguem a fórmula abaixo:

$$T_r = T_s \text{ (m}^3\text{/ano)} \times A \text{ (m}^2\text{)} \times 1000 \text{ (em mm/ano)} \quad (7)$$

Onde:

Tr = Taxa estimada de rebaixamento do relevo (mm/ano).

A = Área da bacia de drenagem (m).

Com base no entendimento dos processos que regulam uma produção e estocagem diferencial de sedimentos no tempo e no espaço, mensurou-se a magnitude destas transformações ambientais por meio de volumetria de depósitos. Para a bacia do rio Piracema, foram calculadas taxas de sedimentação da ordem de 97000 m³/ano para uma bacia de 130,6 km². A espessura dos depósitos de planície de inundação varia a montante, onde o depósito registra em média 2m de espessura e à jusante, 3,5 m de espessura. A velocidade de agradação dos fundos de vales é maior à jusante (3.637 m³/km/ano) do que à montante (1.275 m³/km/ano).

A Tabela 3.2 apresenta os valores encontrados na mensuração dos depósitos fluviais relativos ao período do café.

Tabela 3.2: Mensuração dos depósitos fluviais relativos ao ciclo do café. Fonte: DANTAS, 1995.

Bacia de drenagem	A (km ²)	D (km ²)	E (m)	V (m ³)	C (km)	Ts (m ³ /km/ano)	Tr (mm/ano)
Rio Piracema	130.6	3.5	2.8	9716000	26	3737	0.75
Rio Manso	50.4	1.5	2.5	3850000	12	3208	0.76
Rio Doce	28.1	0.5	2.0	1020000	8	1275	0.36
Rio da Fortaleza	13.8	0.3	2.3	782000	9	870	0.58

Onde: A (km²) é área da bacia de drenagem; D (km²) é a área ocupada pelo terraço fluvial; E (m) é a espessura média do terraço fluvial; V (m³) é o volume de sedimentos no terraço fluvial; C (km) é o comprimento do canal principal; Ts (m³/m/ano) é a taxa de sedimentação; e Tr (mm/ano) é a taxa de rebaixamento estimado do relevo.

4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho compreendeu as seguintes etapas (Figura 4.1) que serão detalhadas a seguir:

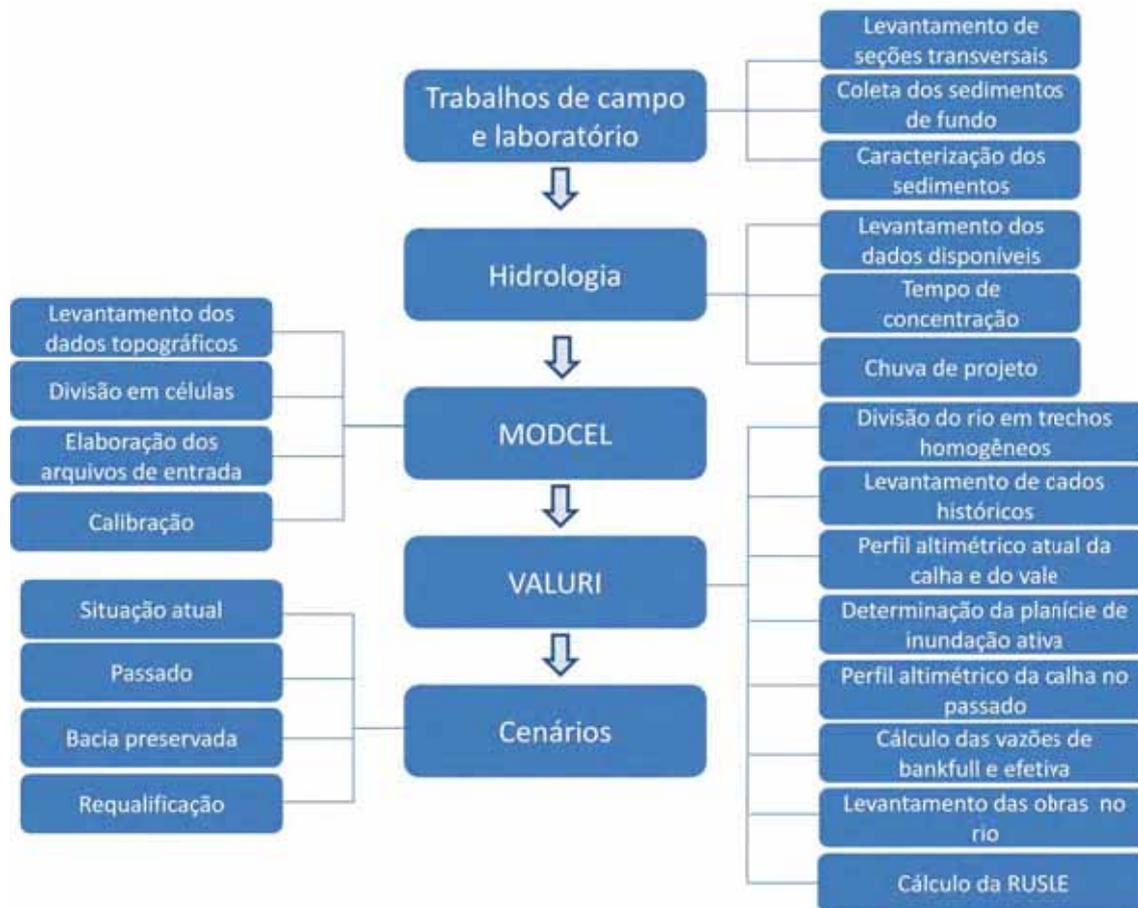


Figura 4.1: Fluxograma com as etapas da metodologia aplicada neste trabalho.

4.1 Trabalhos de Campo e Laboratório

4.1.1 Levantamento de seções transversais

Foi feito o levantamento de seções transversais no rio Sesmaria a fim de alimentar o modelo hidrodinâmico. Foram levantadas cinco seções transversais ao longo do rio, na parte rural da bacia, com a ajuda de duas alunas da graduação e do professor de Topografia da Poli - UFRJ. O número de seções levantadas foi função do tempo e material disponíveis buscando manter uma distância aproximada de 2 km entre elas. A localização destas seções está apresentada na Figura 4.2.

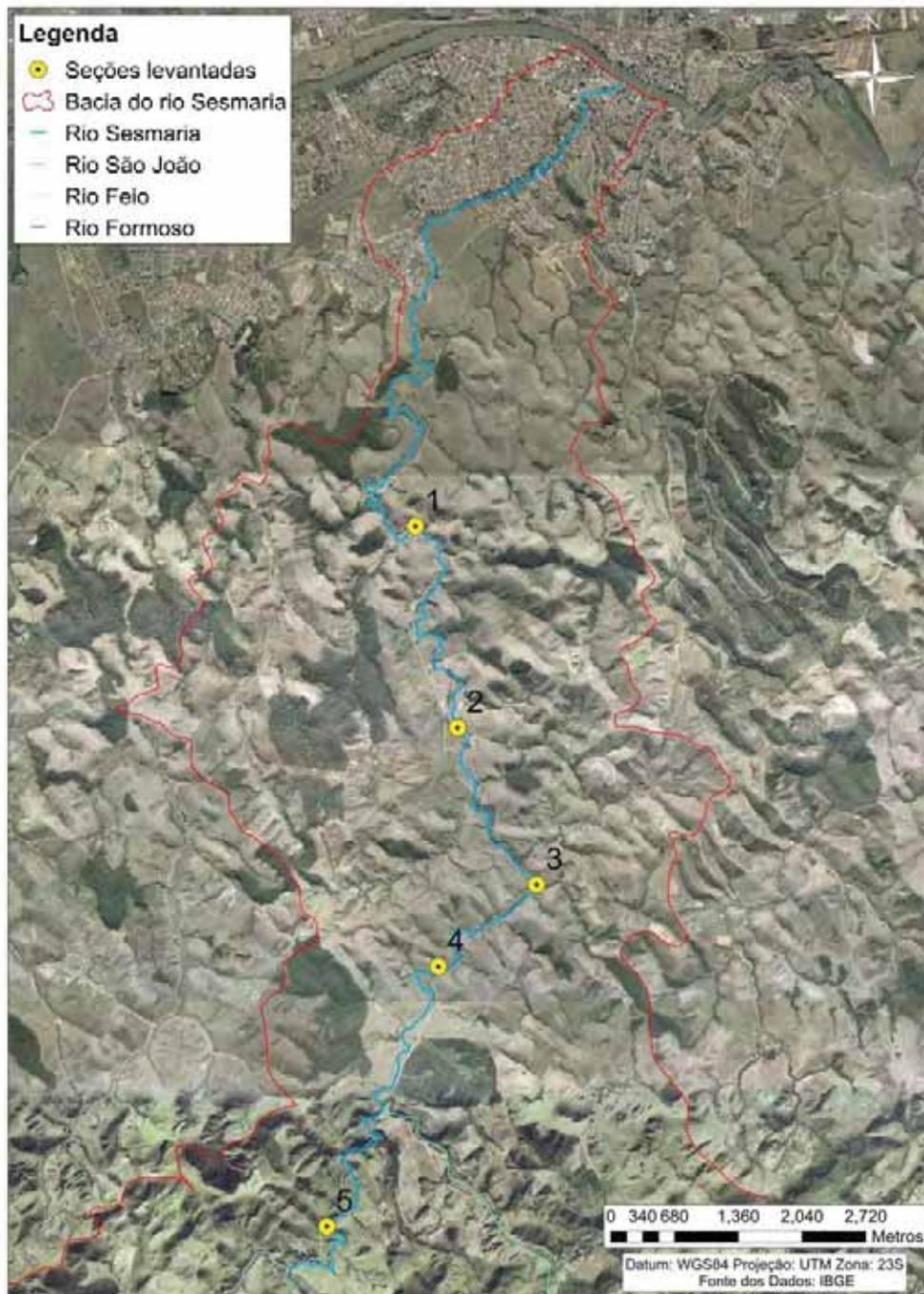


Figura 4.2: Localização das seções transversais levantadas no rio Sesmaria.

Para o levantamento dessas seções, foi utilizada uma estação Estação total Trimble modelo 3305dr, com um prisma e um rastreador GPS Garmin 60CXS.

Os pontos da seção do rio foram levantados a partir de vértices implantados nas margens, de onde foram medidas eletronicamente as distâncias inclinadas, ângulos horizontais e ângulos verticais. Foi necessário também medir a altura do prisma e a altura da estação total. A partir desses dados, com coordenadas dos vértices obtidas

por GPS, puderam ser calculadas as coordenadas N, E, e as cotas dos pontos das seções.

O registro fotográfico deste levantamento está apresentado no Apêndice 1.

4.1.2 **Medição de sedimentos de fundo**

Os sedimentos são materiais sólidos depositados no leito dos rios, lagos e reservatórios graças ao carreamento pelas enxurradas da bacia de contribuição; pela deposição de matéria orgânica em decomposição (originada na bacia ou na própria água); ou por outro meio. A presença de sedimentos, assim como a mobilidade do leito e suas irregularidades, podem alterar profundamente a dinâmica do escoamento em cursos d'água naturais (VIEIRA E WILSON JR., 2005). Os sedimentos são considerados como o compartimento que reflete todos os processos que ocorrem em um ecossistema aquático e, portanto, é importante conhecer suas características a fim de compreender melhor a dinâmica do rio.

As amostras de material do leito, como areias ou partículas mais finas disponíveis para transporte pela corrente, devem ser coletadas na margem esquerda, margem direita e centro da seção transversal para garantir a determinação da granulometria do sedimento de fundo. A definição do tipo e da granulometria do material do leito são necessárias para a solução de algumas equações hidráulicas e para o cálculo de grande parte das equações ou métodos de obtenção da descarga sólida (CARVALHO, 2008).

Para a medição dos sedimentos de fundo do rio Sesmaria, foram escolhidas três seções estratégicas ao longo do rio (Figura 4.3). Em cada seção foram coletados sedimentos da margem direita, do meio e da margem esquerda do canal. A coleta foi feita manualmente através de movimento vertical encostando o amostrador junto ao fundo do leito e promovendo o transporte do sedimento para o interior do amostrador. Cada amostra foi colocada em saco plástico e devidamente etiquetada de acordo com a seção e com a localização da amostra na seção (margem direita, esquerda ou centro) para posterior análise em laboratório.

Estes sedimentos foram coletados com o objetivo de se obter os diâmetros característicos do sedimento de fundo nestas seções.

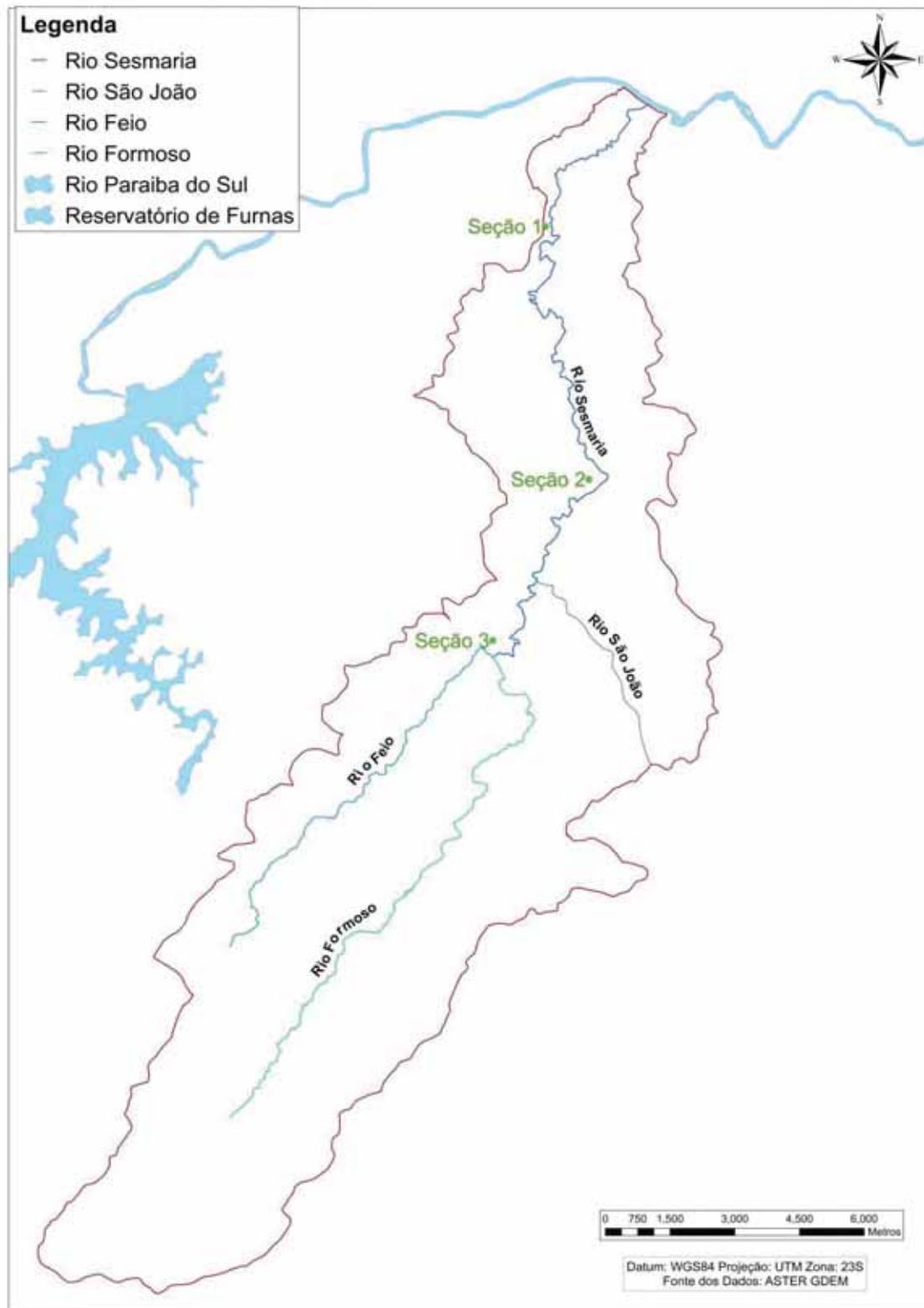


Figura 4.3: Mapa com a localização das seções de coleta de sedimentos.

4.1.3 Caracterização dos sedimentos de fundo

Para determinar as propriedades das amostras de sedimentos coletadas no rio Sesmaria, foram executados ensaios de caracterização física. As amostras foram devidamente preparadas conforme o procedimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os ensaios para determinação dos diâmetros dos sedimentos foram realizados no Laboratório de Dinâmica dos Sedimentos Coesivos - LDSC – COPPE/UFRJ. As normas utilizadas para a análise granulométrica foram a NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização, e a NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica.

O material do leito coletado ao longo de uma seção transversal pode apresentar uma grande diversidade granulométrica, desde material grosso (pedregulho e areia), até material mais fino (silte e argila). Quando há uma quantidade considerável de material fino, uma análise desse material exige métodos diferentes para sua completa definição. O material grosso deve ser analisado por peneiramento, enquanto o fino deve ser analisado com o uso do densímetro, de pipetas ou mesmo com o tubo de retirada pelo fundo (VIEIRA da SILVA E WILSON-JR., 2005).

No caso do rio Sesmaria, as amostras eram constituídas de fração grossa e média, e, portanto, realizou-se o ensaio por peneiramento.

Em laboratório, as amostras foram secas em estufa a aproximadamente 60° C por cerca de 24 horas. Posteriormente foram desagregadas e separadas. As amostras foram divididas pelo repartidor de amostras até que se obteve uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Foram utilizadas peneiras de aberturas de malha variando de 16 mm (5/8" da ABNT) a 0.062 mm (230 da ABNT). As peneiras de aberturas maiores são colocadas uma sobre as outras com as aberturas das malhas crescendo de baixo para cima. Embaixo da peneira de menor abertura deve ser colocado o prato, que recolherá os grãos que por ela passarem, e em cima da peneira de maior abertura deve ser colocada a tampa, para que se evite a perda de partículas no início do processo de vibração. O conjunto de peneiras é colocado no agitador de peneiras por aproximadamente 15 min, como mostra a Figura 4.4.

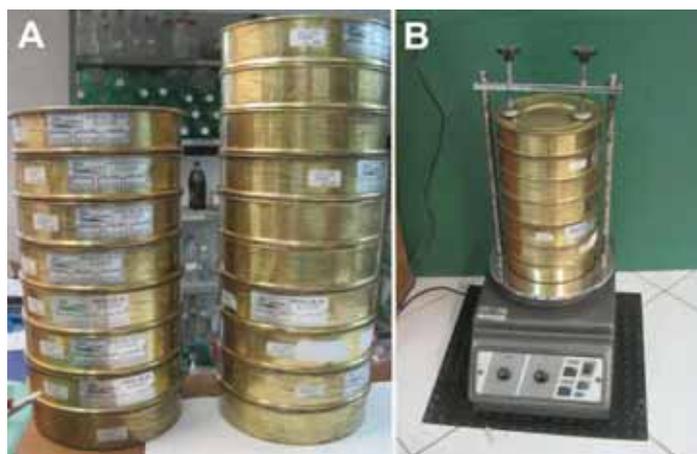


Figura 4.4: A - Jogo de peneiras. B – Agitador de peneiras.

Após retirar os sedimentos de cada peneira, com a ajuda de uma escova quando necessário, pesa-se a fração de solo retida em cada peneira (W_{ri}) e calcula-se a percentagem retida em relação ao peso seco ($P_{ri} = W_{ri}/W_t$, sendo W_t o peso seco total da amostra), e a percentagem de grãos mais finos ($P_f = 100 - (P_{ri} \cdot 100)$). A partir dos valores calculados, traça-se a curva de distribuição granulométrica, marcando-se no eixo das abcissas, em escala logarítmica, os diâmetros das partículas e no eixo das ordenadas, em escala natural, os percentuais das partículas menores do que os percentuais de solo que passaram nas peneiras. A partir da curva são obtidos os diâmetros característicos.

Para calcular a granulometria média da seção de coleta, fez-se a análise granulométrica de cada amostra separadamente (lado direito, centro e lado esquerdo) e depois foi calculado o diâmetro médio da seção.

Os registros fotográficos das etapas estão apresentados no Apêndice 2.

4.2 Hidrologia

Os dados de precipitação de 12 estações pluviométricas, localizadas na região da bacia hidrográfica do rio Sesmaria e em suas proximidades, foram levantados no banco de dados hidrometeorológicos da Agência Nacional de Águas (ANA) – HIDROWEB e com o Laboratório de Geohidroecologia (GEOHECO) da UFRJ. A Tabela 4.1 apresenta as características das estações pluviométricas levantadas no HIDROWEB e a Tabela 4.2 apresenta as estações levantadas junto ao GEOHECO.

Tabela 4.1: Estações levantadas no sistema de informações Hidroweb - ANA.

Código	Estação	Município	Período dos dados
2244006	São José do Barreiro	São José do Barreiro	Janeiro/1943 – Dezembro/2002
2244020	Núcleo Col. Bandeirantes	São José do Barreiro	Janeiro/1913 – Dezembro/1967
2244152	Formoso	São José do Barreiro	Janeiro/1995 – Fevereiro/2012
2244009	Arapeí	Arapeí	Janeiro/1969 – Abril/1996
2244092	Resende	Resende	Janeiro/1911 – Dezembro/1998
2244161	Resende (Aeroporto)	Resende	Novembro/2004 – Novembro/2012

Tabela 4.2: Estações levantadas junto ao GEOHECO.

Estação	Município	Período dos dados
Fazenda da Barra	Resende	Junho/2009 - Abril/2011
Fazenda Monte Alegre	Resende	Setembro/2008 - Abril/2011
Formoso (GEOHECO)	Resende	Novembro/2008 - Abril/2011
Feio	Resende	Novembro/2008 - Abril/2011
São João	Resende	Novembro/2008 - Abril/2011
Sesmaria	Resende	Novembro/2008 - Abril/2011

A Tabela 4.3 apresenta as precipitações médias mensais e anuais das estações levantadas e a Figura 4.5 apresenta a localização dessas estações.

Tabela 4.3: Precipitações médias mensais e anuais de Estações Pluviométricas na Região de Interesse.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
São José do Barreiro	265	234	218	90	50	33	30	37	73	132	180	235	1560
Núcleo Col. Bandeirantes	269	234	202	97	42	33	22	28	57	123	157	233	1497
Formoso	272	206	168	75	46	25	33	33	69	130	176	212	1444
Arapeí	266	214	204	110	73	39	30	39	70	117	168	237	1552
Resende	279	226	217	95	41	24	19	27	59	123	177	252	1553
Resende (aeroporto)	318	258	213	97	42	24	22	22	63	114	212	266	1729
Fazenda da Barra	357	112	411	146	18	6.5	55	28	106	143	250	497	1927
Fazenda Monte Alegre	326	190	236	95	48	23	36	25	116	106	184	363	1815
Formoso (GEOHECO)	293	192	243	92	62	22	36	26	107	129	198	386	1768
Feio	268	205	252	85	51	20	36	27	104	120	186	399	1809
São João	273	245	268	85	40	18	41	26	107	120	214	394	1899
Sesmaria	294	196	260	78	42	18	45	26	102	116	232	400	1960

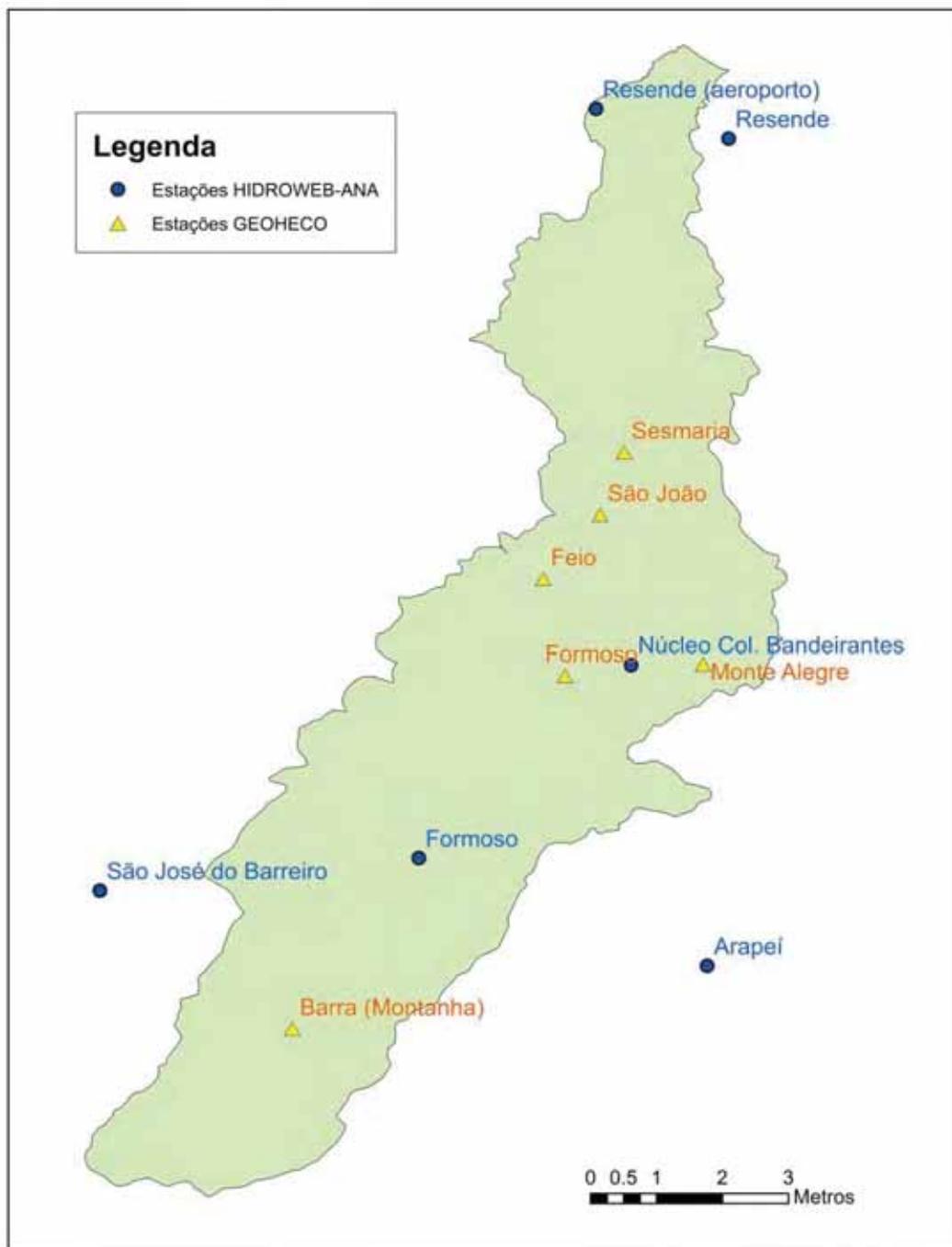


Figura 4.5: Localização das estações pluviométricas na região de interesse.

Para representar a chuva que causou enchentes na cidade de Resende, no dia 15 de dezembro de 2010, foram utilizadas as estações do GEOHECO. A área de influência de cada estação foi obtida através do método dos Polígonos de Thiessen e está apresentada na Tabela 4.4. Este método é indicado quando os postos pluviométricos não estão distribuídos uniformemente dentro da bacia hidrográfica e consiste em atribuir um fator de peso aos totais precipitados medidos em cada estação pluviométrica, proporcionais à área de influência de cada estação. Foram

considerados os postos inseridos dentro da bacia com dados de precipitação na data do evento.

Tabela 4.4: Áreas de influência pelo método dos polígonos de Thiessen de cada estação.

Estação	Área de influência (m ²)	Porcentagem da área total (%)
Sesmaria	38699400	25
São João	7788460	5
Monte Alegre	10974700	7
Feio	9875530	6
Formoso (GEOHECO)	36274700	24
Fazenda da Barra	49001600	32

A Tabela 4.5 apresenta a estação fluviométrica presente no rio Sesmaria, levantada no sistema de informações da ANA, HIDROWEB.

Tabela 4.5: Características da estação fluviométrica no rio Sesmaria, levantadas no Hidroweb.

Código	Estação	Município	Rio	Área de drenagem (km ²)	Dados disponíveis	Período dos dados
58247000	Fazenda da Bahia	Resende	Rio Sesmaria	126	Vazões	Outubro/1979 - Janeiro/1983
					Cotas	Fevereiro/1968 - Janeiro/1983
					Resumo de descarga	Fevereiro/1968 - Janeiro/1983

4.2.1 Cálculo do tempo de concentração

O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica esteja contribuindo com a água sobre ela precipitada, desde o início da chuva, para uma determinada seção do curso de água ou da superfície da bacia objeto de análise. O conhecimento do tempo de concentração é fundamental para a determinação da vazão máxima de projeto que estará contribuindo para um determinado local da bacia após o início da chuva. A determinação do tempo de concentração tem por objetivo determinar a duração da precipitação de projeto (igual ao tempo de concentração da bacia) bem como uma discretização temporal que é importante para caracterizar adequadamente o ramo ascendente do hidrograma afluente (TUCCI *et al.*, 1995).

Os fatores que influenciam no tempo de concentração de uma bacia hidrográfica são:

- Forma da bacia.
- Declividade média da bacia.
- Tipo de cobertura vegetal.

- Comprimento e declividade do curso principal e afluentes.
- Distância horizontal entre o ponto mais afastado bacia e sua saída.
- Condições do solo em que a bacia se encontra no início da chuva.

O valor do tempo de concentração varia de forma consoante com a fórmula utilizada. Neste estudo utilizou-se a fórmula de Kirpich (8).

$$t_c = 3,99 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (8)$$

Onde:

L = comprimento do talvegue

S = declividade.

4.2.2 Elaboração da chuva de projeto

A obtenção da chuva de projeto está relacionada à fixação do período de retorno associado à duração da chuva crítica, para uma determinada área de drenagem. Uma das maneiras utilizadas para determinar a chuva de projeto é através das equações de chuvas intensas. Chuvas intensas são aquelas chuvas que provocam cheias no sistema de drenagem de modo que as vazões de pico atingem valores próximos ou superiores à capacidade do sistema, resultando em inundações.

Neste trabalho a chuva de projeto foi calculada a partir da equação de chuvas intensas do tipo Otto Pfafstetter.

Otto Pfafstetter (1957) desenvolveu equações de chuva para 98 postos pluviográficos no Brasil e organizou tabelas, fornecendo a precipitação relativa para diversas durações e tempos de recorrência da chuva para estes postos tratados. A precipitação relativa é definida pela expressão (8):

$$P = K \times [at + b \times \log(1 + ct)] \quad (9)$$

Sendo:

$$K = TR^{\alpha + \beta/TR^{0,25}} \quad (10)$$

Onde: D é a duração da chuva em horas, TR é o tempo de recorrência em anos, e P é a precipitação em milímetros. Os valores de a, b e c são dependentes do posto considerado e α e β são função do tempo de duração da chuva (Tabela 4.6). No caso

deste trabalho foi utilizado o posto de Resende; os valores de a , b e c referentes a este posto estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Valores de α e β de acordo com o tempo de duração da chuva.

t	5 min.	15 min.	30 min.	1h	2h	4h	8h	24h	2d	4d	6d
α	0.108	0.122	0.138	0.156	0.166	0.174	0.176	0.170	0.166	0.156	0.152
β	0	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Tabela 4.7: Equação de Chuvas Intensas ajustadas pelo Eng. Otto Pfafstetter – Valores de a , b e c para a Estação de Resende - RJ.

Parâmetro	Valor
a	0.3
b	31.0
c	20.0

4.2.3 Chuvas de projeto com o modelo HIDRO-FLU

Para a modelagem hidrológica utilizou-se como ferramenta o modelo HIDRO-FLU, desenvolvido na COPPE/UFRJ, que permitiu a determinação da chuva de projeto para os cenários propostos neste trabalho. A seguir apresenta-se uma breve descrição baseada no manual do programa e em MAGALHÃES (2005), onde se encontram informações mais detalhadas.

Descrição do modelo

O HIDRO-FLU é um sistema computacional para realização de rotinas hidrológicas com foco em pequenas bacias, que permite a geração de hidrogramas, a partir de uma chuva medida ou de uma chuva de projeto (MAGALHÃES, 2005). Dentre as suas múltiplas aplicações, pode servir como um modelo chuva-vazão do tipo concentrado.

No HIDRO-FLU, o cálculo de um hidrograma é feito a partir de um hietograma de projeto e é dividido em quatro etapas principais:

- Caracterização da Bacia Hidrográfica;
- Hietograma de Projeto;
- Separação dos Escoamentos;
- Hidrograma de Projeto.

A sequência metodológica para o cálculo das vazões de cheia e da chuva de projeto em uma bacia hidrográfica está apresentada na Figura 4.6.

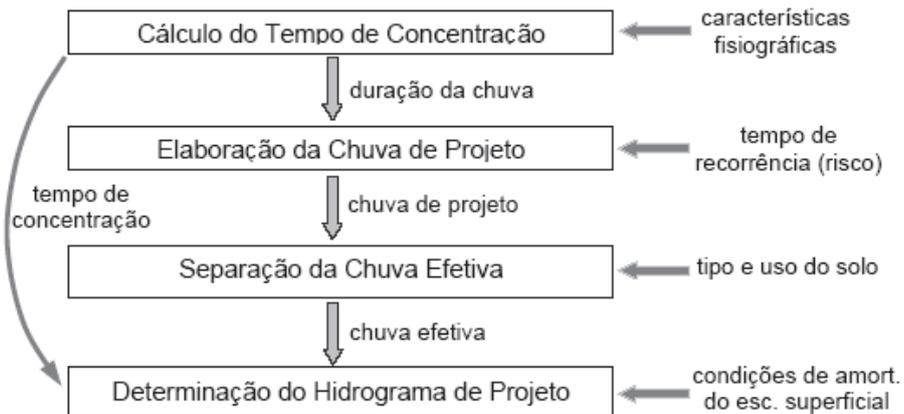


Figura 4.6: Etapas do Hidro-Flu para o cálculo de um hidrograma de projeto.

Cada etapa necessária para a realização do cálculo está apresentada e descrita a seguir.

Cálculo do tempo de concentração

Esta etapa tem por objetivo determinar o tempo de concentração da bacia. Para esta determinação são necessárias as seguintes variáveis:

- Área de Drenagem da Bacia Hidrográfica, em km^2 (A);
- Extensão do Curso d'Água Principal, em km (L);
- Declividade do Curso d'Água Principal, em m/m (S);
- Desnível entre o ponto mais elevado e o exutório, em metros;
- Velocidade Média do Escoamento no Curso d'Água Principal, em m/s (v);
- Vazão de Base, em m^3/s (Q_b);
- Coeficiente de Cobertura Vegetal (p).

A partir destas variáveis, determina-se o tempo de concentração da bacia hidrográfica utilizando quatro equações empíricas disponíveis na literatura técnica, apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Fórmulas para cálculo do Tempo de Concentração utilizadas no Hidro-Flu

Nome	Fórmula
Cinemática	$t_c = \sum \frac{L}{v}$
Califónia Culverts Practice	$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$
Dooge	$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,385}}$
Kirpich	$t_c = 3,99 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$
George Ribeiro	$t_c = \frac{16. L}{(1,05 - 0,2. p)(100. S)^{0,04}}$

Elaboração da chuva de projeto

A chuva de projeto a ser utilizada na simulação poderá ser calculada a partir de equações de chuvas intensas ou pode-se utilizar uma sequência de chuva qualquer, como em casos de simulação de eventos já ocorridos. Neste último caso, é necessária apenas a entrada direta dos valores de altura de chuva.

No caso de chuva de projeto, é necessário definir a distribuição temporal da chuva. Para esta distribuição o HIDRO-FLU possui duas opções:

Método do *Bureau of Reclamation*: Cada temporal é dividido em uma sequência de blocos de chuva de forma que o mais intenso é colocado na posição central, e os demais são colocados, à direita e à esquerda, alternadamente.

Chuva Constante no Tempo: Para a forma de chuva constante faz-se uma média das alturas de chuva geradas para cada intervalo de tempo por uma das equações, e adota-se esta média como a altura de chuva por toda a sua duração.

Pode-se utilizar, com relação à distribuição espacial da chuva na bacia, a opção de redução do volume de chuva gerada em função da área de drenagem. O sistema pode fazer essa redução baseada no cálculo do coeficiente de redução, através de uma fórmula ajustada para algumas bacias de médio porte. A fórmula apresenta-se da seguinte forma:

$$c = -0,0915 \times \ln(A) + 1,1894 \quad (11)$$

Onde A é área de drenagem da bacia.

Separação da chuva efetiva

O Hidro-Flu possui três métodos implementados, que manipulam parâmetros dos principais fenômenos hidrológicos atuantes na separação do escoamento superficial em bacias de pequeno e médio porte: Método Racional, Método do SCS (*Soil Conservation Service*, USA) e Método dos Índices.

Determinação do hidrograma de projeto

Esta etapa consiste na transformação da chuva excedente em um hidrograma de projeto. No HIDRO-FLU esta etapa é executada através da aplicação do método de Hidrograma Unitário Sintético (HUS), que pode ser interpretado como uma composição entre o Hidrograma Triangular do Método Racional adaptado para chuvas complexas e o Hidrograma Unitário Sintético do SCS.

Como o Hidrograma Triangular do Método Racional superestima a vazão de pico, o programa acrescenta a este uma fórmula que representa a passagem por um reservatório linear, promovendo, assim, um amortecimento segundo um coeficiente de depleção (k), calibrado pelo HIDRO-FLU para ajustar a vazão de pico à vazão de pico do método do SCS. Este procedimento corrige as vazões de projeto e também reflete o amortecimento do escoamento superficial decorrente do fluxo e do armazenamento deste sobre a superfície da bacia e na calha fluvial.

Esse amortecimento é feito utilizando-se a Equação da Continuidade aplicada a um volume de controle, dada por:

$$I - O = \frac{dR}{dt} \quad (12)$$

E o Princípio do Reservatório Linear:

$$R = KO \quad (13)$$

Onde: I é a vazão de entrada no reservatório; O é a vazão de saída do reservatório; R é o armazenamento no reservatório; e K é o coeficiente de depleção do reservatório linear.

A equação da continuidade é resolvida através do Método das Diferenças Finitas, considerando um esquema explícito e progressivo no tempo, resultando em:

$$O^{t+1} = \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^{t+1} + \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^t + \left(\frac{2 - \Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) O^t \quad (14)$$

O reservatório linear promove o amortecimento do hidrograma e tem seu funcionamento definido pelo valor do Coeficiente de Depleção. A atuação do reservatório linear depende de igual forma da relação $\Delta t/K$ e do Δt . Este parâmetro pode ser ajustado automaticamente pelo sistema ou definido manualmente. Na calibração automática utiliza-se um procedimento baseado no Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do SCS. Neste método, a recessão apresenta duração igual ao produto da ascensão por um Coeficiente Beta (β), usualmente igual a 1,67. A Tabela 4.9 apresenta alguns valores típicos para β .

Tabela 4.9: Valores típicos para o coeficiente β (Wanielista *et al.*, 1997).

Descrição da bacia	Coeficiente β	Razão de amortecimento
Fórmula do Método Racional	1.00	1.00
Área urbana, alta declividade	1.25	0.89
Valor típico SCS	1.67	0.75
Ocupação mista (urbana e rural)	2.25	0.62
Área rural, alta declividade	3.33	0.46
Área rural, declividade suave	5.50	0.31
Área rural, declividade muito baixa	12.00	0.15

4.3 MODCEL

O MODCEL (MIGUEZ, 2001) foi usado para a análise hidrodinâmica. Uma descrição do modelo baseada em MIGUEZ (2001) é apresentada a seguir:

4.3.1 Histórico

O primeiro modelo matemático bidimensional relevante foi proposto e construído na década de 1960, na *Société Grenobleise d'Etudes et Applications Hydrauliques* (SOGREAH), a pedido da UNESCO, para o delta do rio Mekong. Este modelo foi apresentado em 1968 por Zanobetti e Lorgeré em artigo na revista *La Houille Blanche*. O modelo desenvolvido tinha por princípio a divisão da bacia do rio em células de escoamento, com capacidade de armazenamento, que representavam trechos de rio e de planície (MIGUEZ, 2003).

No Brasil, este conceito de modelação por células foi abordado na Tese de Mestrado defendida por Miguez (MIGUEZ, 1994). A partir de 1996, MIGUEZ e MASCARENHAS resgataram este trabalho, adaptando os conceitos envolvidos na modelação por células, para aplicação a uma bacia urbana, modificando o foco inicial do modelo, buscando a adaptação do modelo de células ao contexto urbano. Este novo estudo visava complementar o modelo inicialmente construído, procurando contemplar o máximo possível da diversidade apresentada em um movimento de cheia em uma

área urbana. Posteriormente, a partir de 1998, uma nova versão do modelo de células foi construída com a finalidade de realizar novas implementações de conceitos físicos, visando incrementar o seu grau de representatividade para as cheias urbanas, definindo-se novos tipos de células e de ligações, resultando na tese de doutorado defendida por MIGUEZ (2001).

A partir de então, uma série de projetos, estudos e trabalhos foram e vêm sendo desenvolvidos com o uso do MODCEL no Laboratório de Hidráulica Computacional – COPPE/UFRJ com a implementação de novos tipos de células e de ligações, permitindo incrementar a sua capacidade de representação em um processo continuado.

4.3.2 Descrição

O MODCEL é um modelo de células de escoamento capaz de simular diferentes cenários hidrológicos e hidráulicos. Parte do princípio de que uma bacia pode ser subdividida em um conjunto de compartimentos homogêneos, que, em grupo ou isoladamente, representam paisagens, num arranjo tal que reproduz os padrões de escoamento, dentro ou fora da rede de drenagem, a partir das interações entre as células modeladas.

A bacia é subdividida em diferentes células com ligações entre si e o escoamento entre as células é calculado por equações hidráulicas unidimensionais definidas de acordo com o padrão topográfico e de urbanização da região, através de relações hidráulicas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, na sua forma completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias. Pode ser considerado um modelo quasi-2D, uma vez que a região subdividida em células forma uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca. Os resultados calculados pelo modelo permitem delimitar as manchas de inundação resultantes da resposta do sistema de macrodrenagem a um evento hidrológico.

Cada célula comunica-se hidráulicamente com células vizinhas, recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão. Às vazões trocadas com as células vizinhas somam-se a vazão resultante da transformação da chuva.

As hipóteses de aplicação do modelo de células em bacias são:

1. A bacia pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento.
2. Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos; uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente superior ou inferior
3. As características de cada célula são associadas a um ponto de referência nesta célula, chamado de centro da célula, por onde se considera passar o escoamento. Este centro não necessariamente se refere ao centro geométrico. A ligação de todos os centros determina o padrão geral de escoamento.
4. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas como, por exemplo, a Equação Dinâmica de Saint-Venant, entre outras.
5. Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal e a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma.
6. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
7. O volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma.
8. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.

O modelo de células de escoamento possui um conjunto de tipo de células pré-definido (Figura 4.7), conforme listado a seguir:

- Células tipo rio, ou canal, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta, porém, aproximadamente retangulares;
- Células tipo galeria, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- Células tipo planície, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas;
- Células tipo encosta, para representação das áreas de contribuição;
- Células tipo reservatório, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial.

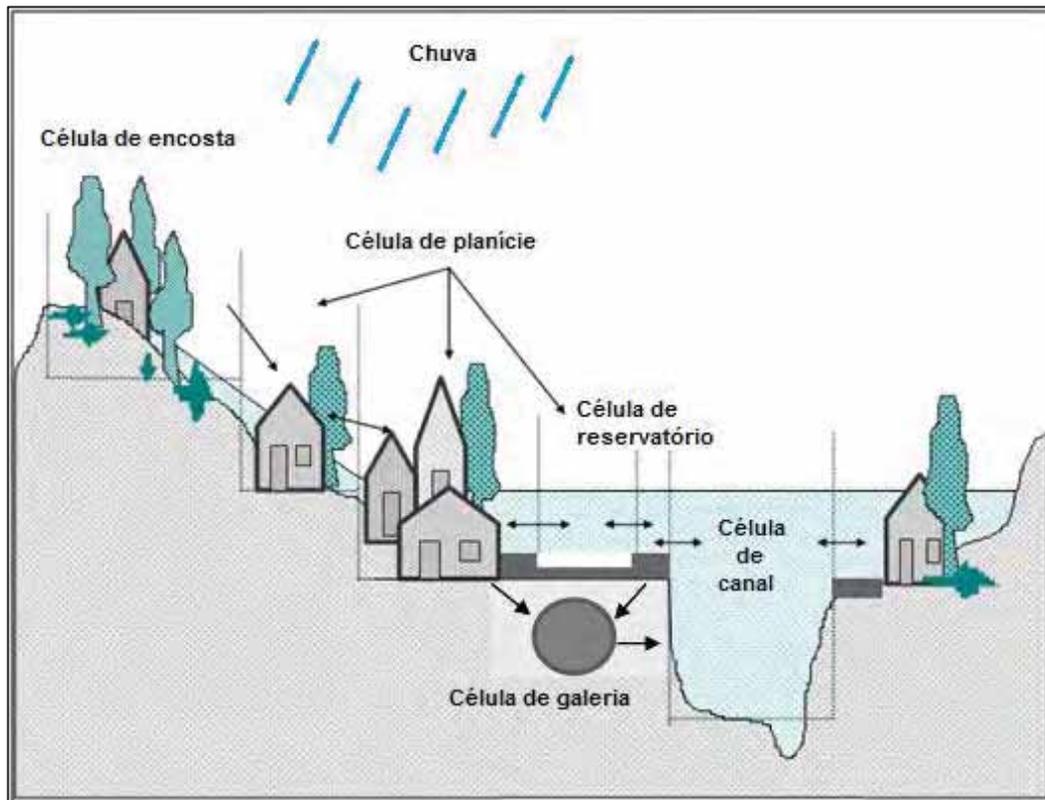


Figura 4.7: Representação esquemática de uma região dividida em células.

A modelação hidráulica e topográfica de uma bacia hidrográfica, portanto, refere-se à forma como esta bacia é representada no modelo, ou seja, ao modo como se dá forma à realidade física dentro do modelo.

Faz parte desta modelação:

- a identificação de áreas alagáveis e das direções principais de escoamento, o que por sua vez definirá o mapa geral do padrão do escoamento;
- a definição das características hidráulicas e geométricas das seções de escoamento em trechos de rio;
- a definição geométrica de áreas homogêneas de armazenamento;
- e a definição das interações que ocorrem entre os diversos elementos topográficos ou estruturas hidráulicas identificados.

A variação do volume d'água em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de massa nesta célula. Assim, em termos diferenciais, tem-se a equação da continuidade representada a seguir:

$$A_{s_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (2)$$

onde:

Q = vazão entre as células i e k, vizinhas entre si;

Z = cota do nível d'água no centro da célula i;

A = área superficial do espelho d'água na célula i;

P = vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula i e disponível para escoamento;

t = variável independente relativa ao tempo.

A formulação numérica do modelo proposto inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial que, originalmente contínua, passa a ser considerada em termos de incrementos finitos. No caso do modelo de células adotado neste estudo, a discretização temporal da equação diferencial (2), representativa da conservação da massa, é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, a fim de simplificar o modelo numérico.

As ligações definem leis hidráulicas que descrevem a relação de troca entre as células. Cabe ao modelador definir estas de acordo com as características observadas pela análise topográfica e urbanística da região a ser modelada. Para representar os possíveis escoamentos na bacia durante um evento de inundação, o modelo de células dispõe dos seguintes tipos de ligações:

- Ligação Tipo-Rio
- Ligação Tipo-Planície;
- Ligação Tipo-Transição Canal/Galeria (entrada e saída de galerias);
- Ligação Tipo-Galeria sob Pressão;
- Ligação Tipo-Vertedouro;
- Ligação Tipo-Orifício;
- Ligação Tipo-Descarga de Galeria em Rios ou Canais Principais;
- Ligação Tipo-Bueiro;
- Ligação Tipo-Equação Cota x Descarga (para estruturas especiais calibradas em modelo reduzido);

- Ligação Tipo-Bombeamento;
- Ligação Tipo-Comporta FLAP.

O processo de modelagem por células de escoamento inicia-se pela análise da região através de levantamentos e plantas topográficos, aerofotogrametrias, imagens de satélite e visitas de campo, entre outras fontes de informações disponíveis. A partir destas informações, faz-se a divisão da bacia em células, de acordo com o uso do solo e com a topografia da área. Após essa divisão, é necessário construir um esquema topológico que integra a rede de células, mostrando as suas interações com as células vizinhas e com as condições de contorno, localizadas nas fronteiras da área modelada. O esquema topológico apresenta a articulação das células e as possíveis interações entre elas, podendo cada célula possuir ligações com outras células de seu próprio grupo, de um grupo anterior ou posterior. A montagem desse esquema faz parte da entrada de dados para permitir a solução numérica do modelo. Na Figura 4.8, são apresentadas todas as etapas da modelagem hipotética de uma área, desde a topografia até a divisão em grupos.

Após a divisão em células e em grupos devem ser confeccionados os arquivos de entrada necessários à modelagem. Estes arquivos compreendem os dados e parâmetros de cada célula da divisão, as suas ligações e as condições de contorno necessárias para a modelagem, bem como a chuva de projeto ou um evento medido

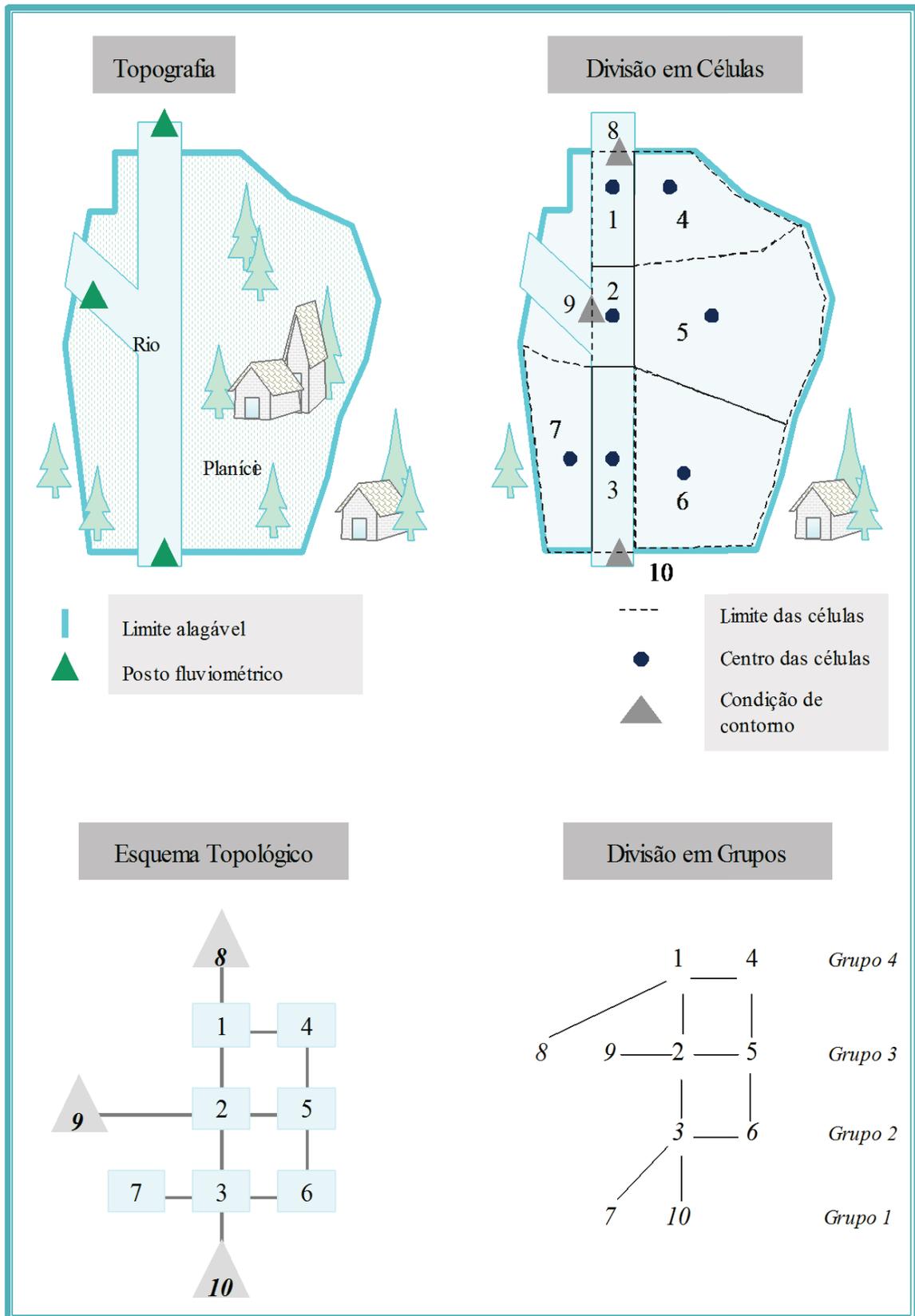


Figura 4.8: Etapas da modelagem de uma região hipotética.

Para a aplicação do modelo de células, algumas informações básicas são necessárias: dados topográficos, hidrológicos e de uso e ocupação do solo. Estas informações são a fonte dos dados de entrada do modelo. As informações hidrológicas foram produzidas através do programa HIDRO-FLU, conforme métodos descritos no item anterior.

Para o levantamento dos dados de topografia e uso e cobertura do solo, as principais fontes de informação foram:

- Cartas do IBGE na escala 1:50.000;
- Metadados do produto Modelo Digital de Elevação 1:25.000 do Projeto RJ-25 do IBGE;
- Metadados do produto Ortofoto 1:25.000 do Projeto RJ-25 do IBGE;
- Imagens do satélite *Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer* – ASTER;
- Visitas de campo para conhecimento da área de estudo e realização de registros fotográficos;
- Levantamentos de seções transversais realizados pela autora com o auxílio de alunas de graduação da UFRJ e do professor de topografia desta mesma universidade (Apêndice 1);
- Imagens de satélite do *software Google Earth*.

A partir destes dados foi possível obter a topografia da região. Isto permitiu a análise da região e a divisão da bacia em células de escoamento, que devem representar os caminhos do escoamento superficial. Após a divisão em células, é necessário definir as leis hidráulicas que representem a comunicação entre células e que simulem os padrões de escoamento entre estas e construir o esquema topológico, que irá alimentar o modelo matemático. No esquema topológico são representadas as interações entre as células, definidas as suas posições relativas e as condições de contorno necessárias à modelagem.

Desta etapa, resultaram 425 células de superfície, sendo 83 células representando os rios e mais 342 células representando as planícies e as encostas. Essa divisão pode ser observada na Figura 4.9.

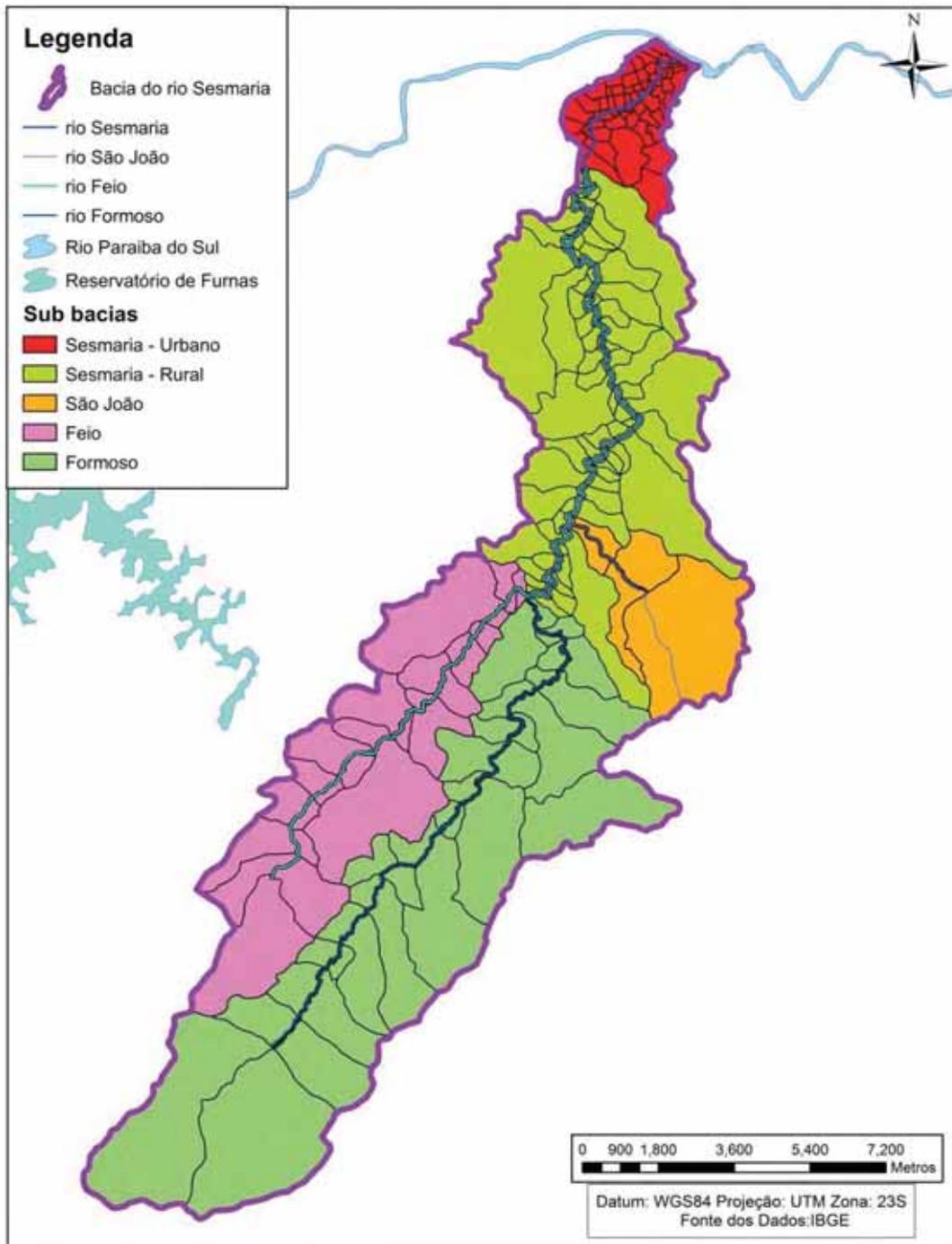


Figura 4.9: Bacia do rio Sesmaria dividida em células de escoamento.

4.3.3 Entrada de dados do modelo

Nesta etapa são construídos todos os arquivos necessários para a modelagem, sendo:

- Arquivo de condições iniciais: apresenta os dados iniciais necessários para a simulação, como o intervalo de tempo de simulação e as subdivisões, o número de células, as características da urbanização da bacia (nível médio das calçadas, edificações, etc.) o arranjo topológico das células, as cotas de terreno e de nível d'água inicial de cada célula, e são listadas as células para as quais se deseja obter os resultados de nível d'água e vazão.
- Arquivo de base de dados: contém as informações das células, apresentando todos os parâmetros necessários (tipo de célula, área total, área de armazenamento e coeficiente de escoamento superficial) e suas ligações com as células vizinhas, tipo de ligação e coeficientes necessários para cada tipo de ligação.
- Arquivo de precipitações: contém as características das precipitações para cada intervalo de tempo de simulação. Estas precipitações podem ser definidas através de eventos medidos ou de projeto para determinados tempos de recorrência.
- Arquivos de condições de contorno: apresentam as informações que fazem fronteira com a área modelada e que influenciam no funcionamento desta, tais como variação de nível d'água provocado por maré, vazão de base de um rio afluente, entre outras. As condições de contorno podem ser introduzidas de três maneiras: nível d'água em função do tempo $Z(t)$; vazão em função do tempo $Q(t)$; e relação entre vazão e nível d'água $Q(Z)$.

Neste trabalho as condições de contorno foram: vazões de base dos rios afluentes, vazões afluentes a um trecho do rio Paraíba do Sul, onde descarrega o rio Sesmaria, e níveis d'água na saída deste mesmo trecho do rio Paraíba do Sul. A Figura 4.10 representa as condições de contorno utilizadas na modelação e sua localização na bacia.

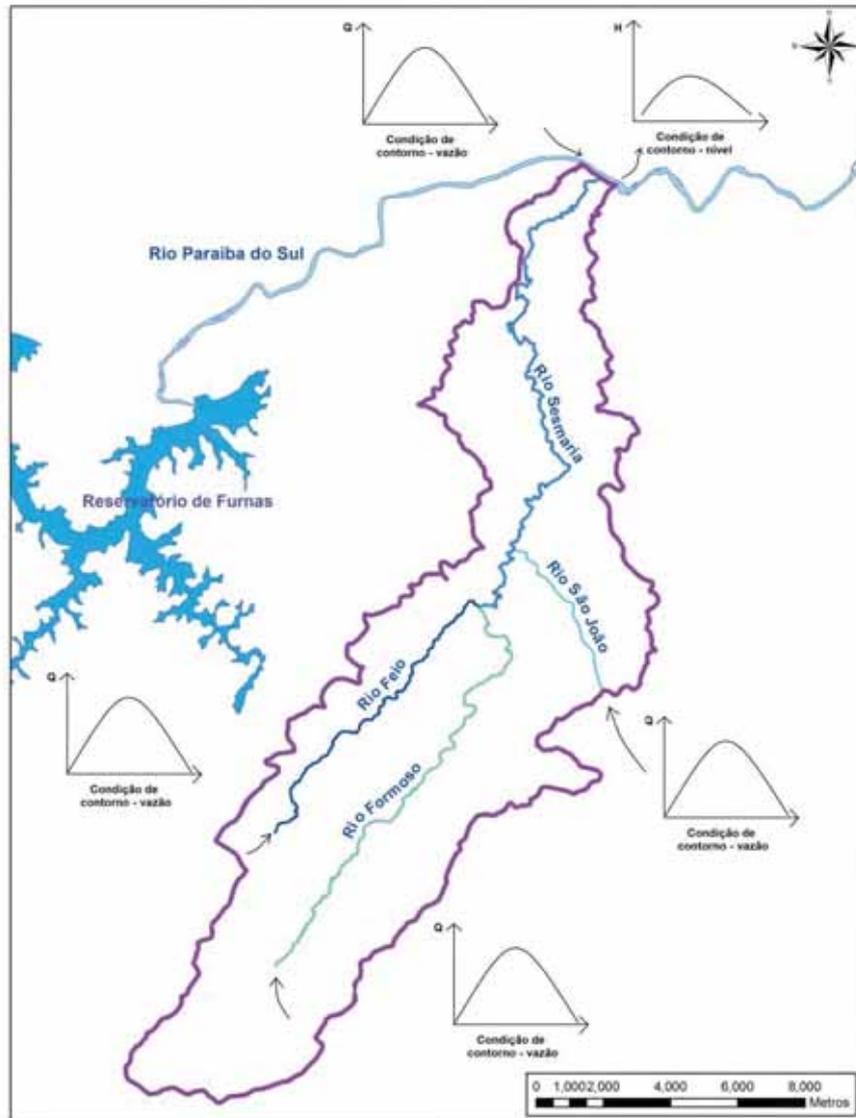


Figura 4.10: Condições de contorno para a modelagem da bacia.

4.3.4 Calibração do modelo

Devido à indisponibilidade de dados de nível d'água e vazão no rio Sesmaria, a calibração do modelo foi feita a partir dos pontos de inundação registrados na última enchente ocorrida. Foi feito um cenário de simulação para a data do evento (14 e 15 de dezembro de 2010) e verificados os pontos de alagamento e nível d'água na cidade. As informações referentes aos pontos de alagamento e nível d'água foram obtidas em notícias referentes ao evento e com moradores da região.

4.4 VALURI

4.4.1 Descrição

Uma descrição desta metodologia baseada em NARDINI e PAVAN (2012) é feita a seguir:

O VALURI é uma metodologia semi-quantitativa que integra diversos critérios, desde a análise histórica da evolução geomórfica, raciocínio da mecânica dos rios, até o uso de fórmulas qualitativas empíricas e suporte analítico da geomorfologia fluvial e hidráulica clássica. É uma ferramenta de avaliação integrada de apoio a projetos de ajuste hidráulico-morfológico do rio, que seja eficiente, sustentável e ambientalmente adequado para combater o risco hidráulico. Foi desenvolvido pelo Centro Italiano de Requalificação Fluvial (CIRF) com o apoio da Universidade de Udine e da Autoridade da Bacia Hidrográfica do Rio Po, na Itália. O ponto chave desta ferramenta está na previsão da morfologia e geometria que um rio assumirá após a implantação de um projeto de requalificação fluvial, a partir da avaliação das mudanças introduzidas no sistema.

Esta metodologia considera o rio na escala do corredor, com a sua morfologia atual, padrão planimétrico, perfil longitudinal, profundidade e largura de *bankfull*, forma e substrato da seção transversal, o regime hídrico e a vegetação marginal, em conjunto com todas as ações antrópicas que atuam sobre o rio, em termos de obras que visam a proteção contra inundações, obras de exploração/regulação, manutenção do canal, e gestão da retirada de águas. Este conjunto de elementos se refere como "a configuração do rio". As entradas de vazão líquida e sólida a partir da captação a montante são consideradas dadas e não variando entre as alternativas, a não ser que afetem a bacia hidrográfica a montante. Isso conforma um cenário sob o qual a previsão está sendo realizada.

A metodologia VALURI se inicia considerando um conjunto de alternativas de configurações do rio. Para cada uma das alternativas, um conjunto inicial de novas obras contra inundações e de exploração é definido em conjunto com uma morfologia inicial possivelmente modificada, como consequência, por exemplo, de remoção de barragens, desmantelamento de diques ou reconexão entre o canal e a planície. O problema que se coloca é prever qual será o equilíbrio morfológico para cada alternativa possível de intervenção em um rio.

Abordagem proposta para previsão geomorfológica

A abordagem proposta baseia-se na evolução histórica geomorfológica, análise do equilíbrio atual, juntamente com o raciocínio baseado na mecânica dos rios, apoiada pela hidráulica analítica.

Para a aplicação do Método VALURI, são necessárias algumas informações:

- Dados históricos (informações, mapas, imagens, registros);
- Vazão líquida;
- Vazão sólida;
- Característica dos sedimentos;
- Aporte de sedimentos;
- Dados topográficos;
- Unidades geomorfológicas;
- Uso e cobertura do solo.

Análise geomorfológica

A análise geomorfológica histórica, ou seja, a história do rio, juntamente com a avaliação do estado de equilíbrio atual, leva a uma teoria interpretativa que tenta capturar e explicar como se comportou o rio e por quê. A hipótese é, então, que o rio tenta, por si só, seguir sua própria natureza exceto quando uma mudança irreversível tenha ocorrido. Seguir sua própria natureza, não implica em retornar a mesma configuração, mas recuperar uma morfologia e comportamento coerente. Por exemplo, após a remoção de uma obra de canalização, o rio pode voltar a ser sinuoso, mas talvez a um nível inferior, dentro da planície de inundação, devido à uma incisão muito forte. Em qualquer caso, o ponto mais importante é a suposição de que a compreensão, a partir da história do rio, de como o rio respondeu no passado (teoria interpretativa), é um apoio fundamental para inferir como ele provavelmente vai responder no futuro às intervenções já realizadas e às novas intervenções. Este é o escopo da teoria interpretativa.

Racionalização a partir da mecânica dos rios

A base mecânica, o raciocínio de engenharia morfológica, juntamente com as relações qualitativas de geomorfologia fluvial (LANE, 1955; SCHUMM, 1977), fornecem um guia para inferir que mudanças podem ocorrer. Uma consideração chave diz respeito à capacidade de transporte sólido: *o rio vai evoluir buscando uma nova morfologia consistente com a capacidade de transporte referente às (possivelmente modificadas) entradas sólidas e líquidas, dadas as (modificadas) limitações físicas (obras,*

topografia, substrato, tipo de sedimentos dos bancos, etc.). As relações qualitativas da geomorfologia fluvial também podem ser usadas para validar este tipo de raciocínio. A Relação Teórica de LANE (1955), obtida a partir das equações da hidráulica fluvial, ou as Relações de SCHUMM (1977), que incluem a geometria da seção transversal do rio, podem, em parte, apoiar o processo, especialmente quando uma mudança nas variáveis de controle, vazão líquida (Q) e vazão sólida (Q_s), está prevista, como mostram as equações abaixo:

$$Q \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \uparrow, \lambda \uparrow, S \downarrow, h \uparrow \quad (3)$$

$$Q_s \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \downarrow, \lambda \uparrow, S \uparrow, p \downarrow, h \downarrow \quad (4)$$

Onde D_{50} é diâmetro da partícula para o qual 50% do material do leito são mais finos, S é a declividade, w é a largura de *bankfull*, λ é o comprimento de onda dos meandros, h é a profundidade e p é o índice de sinuosidade.

Suporte analítico da hidráulica fluvial e da geomorfologia fluvial

Das etapas anteriores, ainda permanece uma gama muito ampla de arbitrariedade. Este critério adicional fornece uma restrição quantitativa entre as várias incógnitas para reduzir a tal arbitrariedade. A principal hipótese aqui apresentada é que, em trechos totalmente aluviais, a vazão de *bankfull* Q_B coincide com a vazão efetiva Q_E , ou seja, a vazão que maximiza o transporte sólido esperado, porque esta vazão é relativamente elevada, mas bastante frequente, e, portanto, na média é capaz de determinar a forma ativa do leito do rio. Isto, definitivamente, não é verdade para algumas categorias de trecho de rio (leito fixo, por exemplo, regime hídrico árido; muito artificializado, etc), mas pode ser considerada uma hipótese de trabalho a ser aplicada com conhecimento especializado.

Esta etapa consiste na prática de uma busca iterativa da morfologia do canal que produz uma vazão de *bankfull* Q_B aproximadamente igual à vazão efetiva Q_E . Isto implica, para cada trecho do rio, um procedimento não trivial para cada tempo de retorno T_R . Uma vazão correspondente $Q(T_R)$ é determinada hidrológicamente para o trecho. Então, para cada valor iterado de declividade (assumindo a forma da seção transversal e o coeficiente de rugosidade) a lâmina d'água correspondente (e a largura, etc.) é determinada de tal forma que sua vazão $Q_H(T_R)$, obtida a partir das relações clássicas da hidráulica (Manning ou Chézy), coincida com o valor hidrológico $Q(T_R)$. Esta última etapa, geralmente, requer resolver uma equação implícita que não possui solução analítica (a não ser que a forma de seção transversal seja simples). A geometria correspondente é então usada para determinar a vazão sólida $Q_s(Q(T_R))$.

Um suporte adicional é oferecido por relações empíricas derivadas da geomorfologia fluvial que podem ser utilizados como um teste para verificar se a tipologia futura inferida é consistente com algumas das variáveis consideradas, como por exemplo, dada a vazão e declividade, a tipologia deve ser 'sinuoso'.

Consistência

A morfologia prevista do rio deve ser coerente tanto com a topografia do entorno quanto intimamente coerente entre os trechos.

A análise histórica é fundamental, particularmente em rios que sofreram sérias alterações antrópicas. Esta análise fornece uma compreensão do tipo de rio e seu comportamento e reação a diversos tipos de alterações. Em essência, a idéia é que, por saber como o rio reagiu no passado a dadas intervenções ou modificações nas variáveis de controle, tem-se uma base sólida para inferir como ele vai se comportar no futuro, também como consequência de novas intervenções.

A metodologia de predição, na prática

Uma vez que as alternativas relevantes foram definidas, os critérios definidos anteriormente são aplicados na sequência de uma série de etapas. Primeiramente, é preciso identificar os trechos geomorfológicamente homogêneos. Então, para cada trecho (o que não exclui olhar para o rio como um todo), é necessário seguir as seguintes etapas:

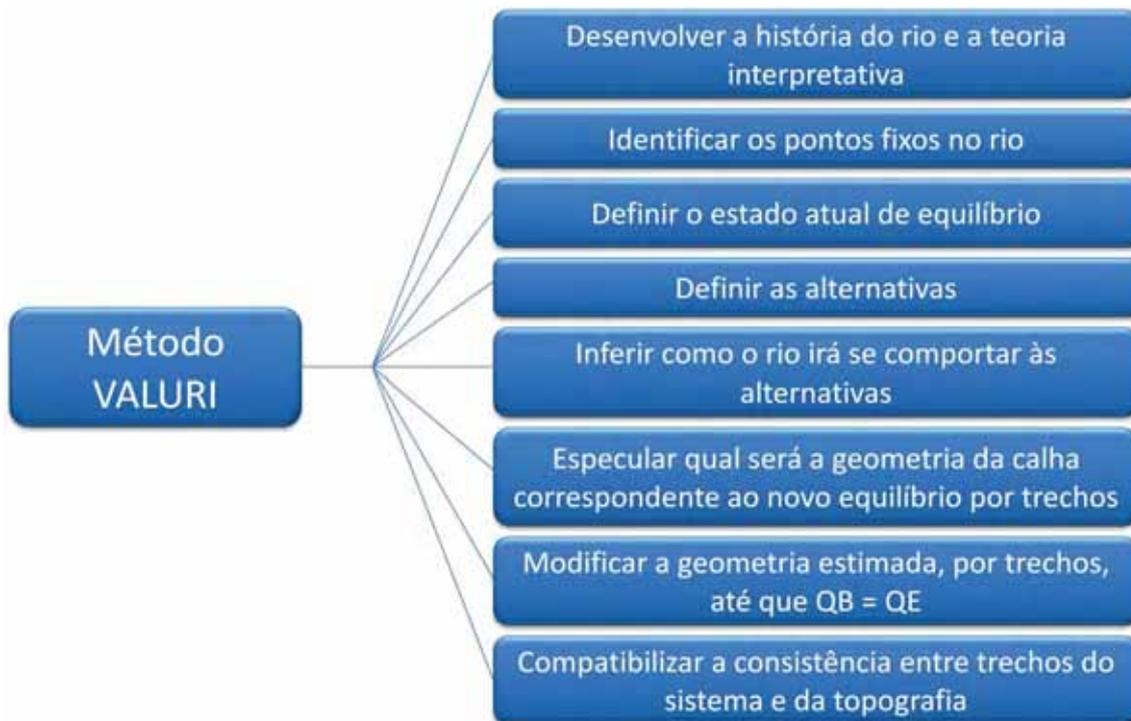


Figura 4.11: Etapas para a aplicação do Método VALURI.

A vazão efetiva, do inglês *efficient flow* ou *effective discharge*, (Q_E) é a medida calculada da descarga de formação do canal. O cálculo de Q_E requer medições em longo prazo de água e sedimentos. Como este tipo de dado normalmente não está disponível para cursos d'água a serem requalificados, dados modelados ou calculados são, por vezes, substitutos. A descarga efetiva pode ser calculada para canais estáveis ou em evolução. A vazão de *bankfull* (Q_B) ocorre quando a água começa a sair do canal e se espalhar na planície de inundação, é a chamada vazão de calha cheia. Esta vazão será considerada equivalente à descarga de formação do canal (conceitual) e efetiva (calculada).

Para cada trecho deve-se resumir as ações previstas na alternativa considerada, e também as conclusões do desenvolvimento histórico, pensando numa interação montante–jusante. Posteriormente, deve-se supor a declividade, altura de *bankfull* futura e ainda a largura do leito maior e sua rugosidade, além de coeficientes para o leito menor. A partir destas informações calcula-se a vazão de *bankfull* (Q_B). Deve-se verificar se a Q_E é razoavelmente igual à Q_B , ou reitera-se até encontrar valores próximos.

Para todo o corredor do rio, a geometria tem que ser traduzida em planta respeitando a tipologia prevista e considerando evidências geomórficas e o fato de que a evolução do rio vai, de alguma forma ser controlada, evitando, na medida do possível, alterar

assentamentos urbanos (por meio de intervenções pontuais de bioengenharia). Este é o ponto mais fraco da metodologia, pois é extremamente difícil estimar uma nova posição para o rio. Entretanto, a envoltória de posições possíveis define uma faixa fluvial provável.

O método VALURI, em resumo, baseia-se muito pouco em equações. Sua base está na investigação histórica e no conhecimento de engenharia mecânica do comportamento dos rios. As equações são adotadas somente depois e de duas maneiras diferentes e complementares:

- quando significativo (ou seja, em trechos aluviais), assumimos que $Q_B = Q_E$ como um apoio para reduzir a indeterminação das incertezas. Para aplicar esse critério operacional, uma equação específica deve ser utilizada para o transporte sólido e para o perfil hidráulico, a fim de determinar os dois elementos, e, então, por tentativa e erro, encontrar a geometria adequada que satisfaça tal condição. A escolha da equação a ser utilizada é totalmente aberta e dependente do contexto.
- por outro lado, e em paralelo, equações empíricas são usadas apenas como uma verificação para orientar a previsão (somente para aqueles trechos em que a validade da fórmula pode ser razoavelmente presumida). Se a geometria prevista é consistente com o que a fórmula indica, a previsão é considerada definitivamente mais confiável do que no caso oposto. Neste último, a busca por uma geometria mais coerente é realizada.

Exemplo: Caso de estudo do rio Chiese

Esta metodologia foi aplicada a um rio italiano. Este caso de estudo está descrito, resumidamente, a seguir, tendo sido originalmente relatado por NARDINI e PAVAN (2012).

Foi realizado um estudo de caso no rio Chiese, a jusante do lago Idro, no Norte da Itália, até a confluência com o rio Oglio (Figura 4.12). A maior parte do rio está em área semi-rural, passando por diversas cidades pequenas e assentamentos rurais. Quase todo o seu curso é altamente artificializado, com açudes de grande porte, defesas longitudinais semi-contínuas e grandes barragens. A Tabela 4.10 apresenta as principais características do rio Chiese.

Para este rio a Autoridade de Bacia do rio Po (AdBPo, 2004) desenvolveu um estudo de viabilidade (EdV) a fim de definir a configuração hidráulica adequada para combater riscos de inundação, a proposta do EdV inclui algumas intervenções de restauração

parcial, a maioria de revegetação do corredor fluvial e remoção de defesas obsoletas, mas também diversas novas defesas ou ajustes das defesas já existentes.

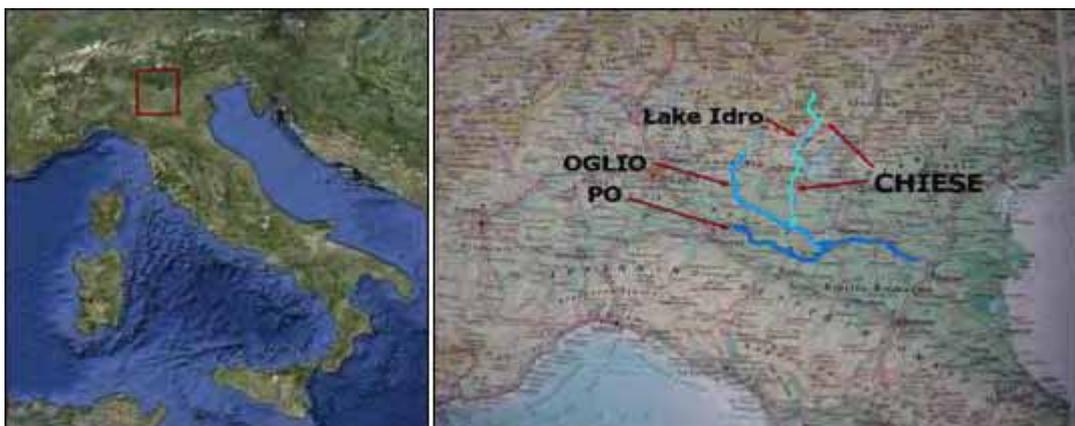


Figura 4.12: Localização do rio Chiese.

Tabela 4.10: Principais características do rio Chiese.

Área da bacia	1400 km ²
Comprimento do rio	180 km
Trecho estudado	80 km
Vazão média	33 m ³ /s
Vazão máxima ($T_R = 200$ anos)	750 m ³ /s
Volume do lago Idro	747 Mm ³
Volume de regulação do lago Idro	75.5 Mm ³

As alternativas analisadas para o rio Chiese foram:

- ALT_0: Alternativa "*quasi-business-as-usual*", o que implica custos elevados de manutenção, a fim de manter o funcionamento dos sistemas de defesa e exploração e algumas intervenções pontuais urgentes, que foram consideradas obrigatórias pela Autoridade da Bacia do rio Po (AdBPo).
- ALT_EdV: representa a solução proposta pela AdBPo (2004), que basicamente defende o critério de colocar o corredor do rio em condições seguras - onde o uso da terra seja outro qualquer que não apenas áreas naturais inexploradas – para uma inundação com tempo de recorrência (T_R) de 200 anos.
- ALT_Base: este é um primeiro passo de restauração, que implementa o critério de eliminar, tanto quanto possível, as obras de concreto, mantendo o impacto sobre o sistema antropogênico tão baixo quanto possível. Pode-se dizer que esta alternativa implementa uma estratégia "prudente", porque dá um passo a

frente para melhorar o estado ecológico do sistema fluvial, sem interferir muito na área urbana, buscando maior eficiência através da economia nos custos de manutenção.

O objetivo deste estudo foi investigar se uma solução diferente, com muito menos concreto no rio, poderia implicar em economia, em termos de obras não executadas e/ou redução dos custos de manutenção e operação, e ainda assim manter o risco suficientemente baixo e melhorar sua situação ecológica.

Para o estudo de caso do rio Chiese, foram realizadas as seguintes etapas:

- homogeneização e fixação da base de dados cartográficos;
- coleta de dados em diversas fontes de informação;
- análise de documentos históricos (arquivos estaduais das cidades de Brescia, Milão, Mantova, Veneza) para investigar sobre a história do rio e, em particular, sobre as intervenções implementadas no passado;
- definição das parametrizações econômicas (valor de uso da terra; vulnerabilidade; custos de gestão ordinária e extraordinária de obras baseadas em dados reais);
- visitas de campo para conhecer o rio, verificar e completar as informações disponíveis e solucionar algumas dúvidas;
- definição de alternativas de configuração do rio para a avaliação;
- definição de cenários de hidrologia para executar simulações (vazão de pico e hidrogramas para diversos tempos de retorno: 2, 5, 10, 20, 50, 200, 500);
- aplicação da metodologia e da ferramenta de suporte para as previsões geomorfológicas;
- elaboração do arquivo shape SIG requerido (calhas de *bankfull*, zonas erodíveis);
- preparação de uma ferramenta de modelagem (Mike 11) para a simulação hidráulica;
- elaboração do SIG relevante (zonas inundadas para cada tempo de retorno e para cada alternativa);
- avaliação Custo-Benefício e Multicritério e análise de sensibilidade;
- reunião com as principais partes interessadas e especialistas (associações de irrigação, especialistas geomorfológicos, etc.);

Para este caso de estudo, foram encontrados mapas antigos que datavam do início dos anos 1900, além de registros de cerca de 1400, anotações de engenheiros, partes interessadas e dos administradores daquele tempo. Com base nestas informações, a história do rio foi reconstruída para cada trecho geomorfológico do rio, o que possibilitou a elaboração da teoria interpretativa. Esta teoria foi acompanhada dos resultados da análise de equilíbrio atual. A análise mostrou que alguns trechos, principalmente os mais artificializados, ainda não encontraram seu novo equilíbrio, o que implica custos contínuos com manutenção das obras.

Conclusões

A metodologia VALURI tem uma vantagem significativa: permite espaço para a integração de critérios muito diferentes, mesclando informações qualitativas e quantitativas em um quadro global de longo prazo (décadas), e previsão morfológica de amplo espectro (escala de segmento do rio). Apesar de bastante complexa, é aplicável. Os resultados obtidos mostraram pontos fortes, tais como:

- O cumprimento da condição $Q_B = Q_E$ levou a definir a morfologia de acordo com o que era esperado da previsão qualitativa, baseada na história do rio e no raciocínio da mecânica dos rios. Além disso, mostrou-se geralmente direta e robusta para os trechos totalmente aluviais, ou seja, os únicos para os quais se pode assumir esta premissa;
- o tipo morfológico previsto foi quase sempre de total acordo com a resposta das fórmulas empíricas descritas anteriormente e, de novo, principalmente para trechos totalmente aluviais;
- a morfologia obtida se mostrou consistente com a topografia do vale e, apenas no trecho que, de acordo com os dados históricos, era naturalmente meandrante, a previsão da geometria mostrou, consistentemente, mudanças repentinas.

Alguns pontos fracos também foram identificados:

- **Suposições:** Uma suposição feita foi que a granulometria de cada trecho do rio não varia no trecho homólogo após o ajuste morfológico, o que não é verdadeiro, pois com a capacidade de transporte modificada e os processos de erosão dos bancos, a granulometria padrão também está sujeita a modificações; também não se considerou o efeito que a vegetação marginal, associada à requalificação, pode induzir, embora esta pudesse ser prevista com o julgamento de especialista. A forma como a morfologia prevista é traduzida na geometria das seções transversais deixa espaço para algumas

arbitrariedades. Os cálculos da vazão de *bankfull* e do transporte sólido foram assumidos como constantes, e utilizadas fórmulas de escoamento uniforme, o que, naturalmente, não é a realidade.

- **Trechos que não são totalmente aluviais:** nestes trechos, a condição analítica introduzida para apoiar a determinação da geometria não pode ser aplicada. Analogamente, as fórmulas empíricas não devem ser consideradas, porque elas são significativas apenas para trechos totalmente aluviais. Além disso, a sua utilização em rios com alta artificialização pode ser questionada, e em qualquer caso, eles apenas fornecem uma verificação *a posteriori*.
- **Variações nas variáveis de controle vazão líquida (Q) e vazão sólida (Q_S):** Neste estudo Q e Q_S muito provavelmente não sofreram modificações e, portanto, foram as mesmas para todas as alternativas consideradas. Em casos mais gerais, com possíveis alterações de Q e Q_S, o quadro geral proposto ainda é válido, mas definitivamente a previsão é mais difícil e menos confiável, pois há casos ambíguos, por exemplo, o gradiente do canal e a profundidade podem aumentar ou diminuir em resposta a um aumento em Q e Q_S, como também indicado por SCHUMM (1977).
- **Arbitrariedade no comportamento planimétrico do rio:** definitivamente, o ponto mais fraco da metodologia VALURI é a previsão do padrão planimétrico, tendo em vista que o mesmo tipo morfológico, comprimento e sinuosidade podem ocorrer com uma infinidade de posições do rio.
- **Processo de transição:** a metodologia desenvolvida praticamente desconsidera o que acontece a partir do momento em que as intervenções são feitas até que o novo equilíbrio é (supostamente) alcançado. CHIN (2006), na sua revisão de alterações nos rios urbanos, concluiu que este novo equilíbrio existe na maior parte dos casos, desde que as variáveis sejam forçadas a um estado estacionário. No entanto, o processo da busca pelo equilíbrio é extremamente variável e pode durar décadas.
- **Informação histórica:** nem sempre está disponível ou acessível.

Mesmo diante deste quadro de dúvidas relativos ao Método VALURI, é preciso buscar prever a morfologia do rio a fim de se implementar projetos com maior chance de sucesso e para a melhor gestão dos rios.

A Tabela 4.11 mostra, resumidamente, as etapas da metodologia VALURI.

Tabela 4.11: Etapas da metodologia VALURI e as observações a serem feitas em cada etapa.

Etapas da metodologia	Observações
Definir alternativas relevantes	<p>Para cada alternativa um novo conjunto de obras de defesa contra inundação e obras de exploração é definido em conjunto com a possibilidade de modificações na morfologia inicial</p> <p>Em correspondência com cada alternativa, um novo equilíbrio dinâmico é estabelecido</p>
Desenvolvimento da história do rio e teoria interpretativa	<p>A análise histórica geomorfológica do rio (história do rio) juntamente com a avaliação do estado de equilíbrio atual, leva a uma teoria interpretativa que tenta capturar e explicar como se comportou rio e por quê.</p> <p>A história do rio é fundamental, principalmente em rios que sofreram fortes alterações antrópicas. Possibilita uma compreensão sobre o tipo de rio e seu comportamento frente a diversas alterações.</p> <p>O rio é considerado na escala do corredor, com sua morfologia atual, padrão planimétrico, perfil longitudinal, profundidade e largura da calha cheia, forma e substrato da seção transversal, regime hídrico, em conjunto com todas as ações antrópicas inerentes a ele em termos de obras que visam a proteção contra inundações e obras de exploração/regulação, manutenção do canal e gestão da retirada de águas.</p>
Definir/avaliar o estado atual de equilíbrio	<p>Equações utilizadas em apenas duas situações: 1) para trechos aluviais, assumindo que a vazão de calha cheia (Q_B) é igual à vazão efetiva (Q_E); 2) a fim de reduzir as incertezas; deve-se utilizar uma fórmula específica para o transporte sólido e para o perfil hidráulico (de livre escolha) para determinar estes elementos. Por tentativa e erro, encontrar a geometria adequada. - equações empíricas são usadas para guiar e checar a previsão.</p> <p>Baseia-se muito pouco em equações Tem sua base na investigação histórica e no conhecimento da mecânica dos rios.</p> <p>$Q \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \uparrow, \lambda \uparrow, S \downarrow, h \uparrow$ $Q_s \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \downarrow, \lambda \uparrow, S \uparrow, p \downarrow, h \downarrow$</p> <p>Necessidade de algumas informações sobre os sedimentos (D_{50}), declividade do trecho, sinuosidade, meandramento, etc...</p>

Etapas da metodologia	Observações
<p>Identificar pontos fixos no rio que foram assumidos na alternativa considerada e que fixam, a determinada extensão, alguns pontos do leito do rio</p>	<p>Identificar pontos fixos tais como barragens, diques, canalização, formações rochosas, etc., que impedem o desenvolvimento natural do rio.</p>
<p>Supor/concluir por inferência como o trecho do rio vai responder à alternativa considerada em termos qualitativos</p>	<p>$Q \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \uparrow, \lambda \uparrow, S \downarrow, h \uparrow$ $Q_s \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \downarrow, \lambda \uparrow, S \uparrow, p \downarrow, h \downarrow$</p> <p>Necessidade de algumas informações sobre os sedimentos (D_{50}), declividade do trecho, meandramento, etc...</p>
	<p>Deve-se inferir a partir da teoria interpretativa e da resposta da avaliação do equilíbrio.</p>
<p>Especular qual será a geometria da calha correspondente ao novo equilíbrio (declividade, comprimento ou sinuosidade, largura e profundidade.</p>	<p>Relações qualitativas de geomorfologia fluvial também podem ser usadas para validar este tipo de raciocínio. A Relação Teórica de Lane (1955), obtida a partir das equações da hidráulica fluvial, ou Relação de Schumm (1977) que inclui a geometria da seção transversal do rio, podem, em parte, apoiar o processo, especialmente quando uma mudança nas variáveis de controle vazão líquida (Q) e sólida (Q_s) está prevista.</p>
	<p>A base mecânica, o raciocínio de engenharia morfológica, juntamente com as relações qualitativas de geomorfologia fluvial (LANE, 1955; SCHUMM, 1977), fornecem um guia para inferir que mudanças podem ocorrer. Uma questão fundamental diz respeito à capacidade de transporte sólido: o rio vai evoluir buscando uma nova morfologia compatível com sua capacidade de transporte associada.</p>
<p>Modificar a geometria estimada até que, por tentativa e erro, a correspondente vazão de <i>bankfull</i> Q_B aceitável seja igual ao escoamento eficiente Q_E (<i>efficient</i></p>	<p>$Q \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \uparrow, \lambda \uparrow, S \downarrow, h \downarrow$ $Q_s \uparrow \rightarrow w \uparrow, D_{50} \downarrow, \lambda \uparrow, S \uparrow, p \downarrow, h \downarrow$</p> <p>Necessidade de algumas informações sobre os sedimentos (D_{50}), declividade do trecho, meandramento, sinuosidade, etc...</p> <p>Para trechos totalmente aluviais a vazão de <i>bankfull</i> (Q_B) coincide com a vazão efetiva (Q_E - vazão que maximiza o transporte sólido esperado).</p>

Etapas da metodologia	Observações
<p>flow ou effective discharge) e verificar, com relações empíricas, se as características identificadas são consistentes com a evidência empírica.</p>	<p>A vazão efetiva (Q_E) é a medida calculada da descarga de formação do canal. O cálculo de Q_E requer medições em longo prazo de água e sedimentos. A vazão de <i>bankfull</i> (Q_B) ocorre quando a água começa a sair do canal e se espalhar na planície de inundação.</p>
<p>Para todo o corredor do rio, eventualmente iterar sobre a geometria assumida para todos os trechos até que a consistência do sistema e da topografia seja encontrada.</p>	<p>Esta etapa consiste, na prática, de uma busca iterativa da morfologia do canal que produza uma vazão de calha cheia (Q_B) aproximadamente igual à vazão efetiva (Q_E).</p>
	<p>Um apoio adicional é oferecido pelas relações empíricas provenientes da geomorfologia fluvial, que pode ser utilizada como um teste para checar se a tipologia futura prevista é consistente com algumas das variáveis consideradas.</p>
	<p>A morfologia prevista pro rio deve ser coerente com a topografia do entorno e intimamente coerente entre os trechos do rio.</p>
	<p>Para o corredor do rio, a geometria tem que ser traduzida em planta respeitando a tipologia e duração prevista e considerando evidências geomórficas e ao fato de que a evolução do rio vai de alguma forma ser controlada evitando, na medida do possível, alterar assentamentos urbanos (por meio de intervenções pontuais de bioengenharia).</p>

4.4.2 Etapas para a aplicação do Método VALURI

O Método VALURI, conforme descrito no item 4.4.1, necessita de diversas informações históricas para sua aplicação. Como no Brasil não há uma cultura de conservar memórias e na bacia do rio Sesmaria há poucas informações, foi necessária uma adaptação do método a este estudo de caso. Esta adaptação contou com a colaboração do engenheiro Andrea Nardini, um dos desenvolvedores do método, que esteve no Brasil no final de 2012. As etapas referentes a esta adaptação estão apresentadas na Tabela 4.12, Tabela 4.13, Tabela 4.14 e Tabela 4.15, a seguir. As etapas de prioridade 1 são as mais importantes e também as mais factíveis, enquanto as de prioridade 4, em geral, mais difíceis de cumprir e, no escopo deste trabalho, menos essenciais.

Tabela 4.12: Etapas da Metodologia VALURI adaptadas à bacia do rio Sesmaria (Parte 1).

Etapa	Título	Produto	Informação disponível	Operação	Prioridade
1	Descrição básica da bacia e determinação dos trechos homogêneos	1) Mapa Base de contexto contendo: limites físicos e administrativos; assentamentos; rede hidrográfica; estradas; uso do solo; MDE (modelo digital de elevação); estações de monitoramento. 2) Mapa com os trechos homogêneos; 3) Tabela com atributos adotados para definir os trechos homogêneos.	Todas as informações disponíveis	Uso do ArcGis para elaboração dos mapas e metodologia <i>River Styles</i> (ou semelhante) para a divisão em trechos homogêneos	1
		Perfil altimétrico do VALE atual reconstruído com MDE	MDE, curvas de nível	Uso do ArcGis	1
2	Perfil Altimétrico do VALE e da CALHA	Perfil altimétrico da CALHA atual	Levantamento de seções recentes, observações em campo e MDE	Perfil do talvegue das seções recentes acrescentadas das seções onde se encontram as pontes.	1
		Perfil altimétrico da CALHA no passado	Observação em campo sobre o estado/processo de incisão ou assoreamento; informação histórica em arquivos (Prefeitura, outros); entrevistas com moradores e técnicos.	Modificar o perfil atual com base na informação de campo. Assim, obter indicadores quantitativos (declividade média) para cada trecho.	2
		Tabela resumida com os dados das seções (forma, e medidas características).	Observações de campo, MDE e seções levantadas recentemente.	Uma vez definidas as seções, calcular valores médios por trecho geomorfológico de: largura, profundidade e área da seção retangular equivalente	1
3	Geometria das seções (largura, profundidade e forma)	Reconstituição das seções do passado (uma seção representativa por cada trecho)	Algumas fotos aéreas com baixa resolução. Mapas históricos.	Trata-se de reconstruir "como era antes" a seção modificando a atual: comparação de fotos aéreas; análise de evidências topográficas e morfológicas no terreno (ficha de levantamento); entrevista com moradores.	3

Tabela 4.13: Etapas da Metodologia VALURI adaptadas à bacia do rio Sesmaria (Parte 2).

Etapa	Título	Produto	Informação disponível	Operação	Prioridade
4	Unidades Geomorfológicas	a) <i>bankfull</i> , paleo canais, ilhas e barras identificados e mapeados em escala apropriada (por exemplo. 1:25000 ou 10:000 para o <i>bankfull</i> e corredor; 1:100-500 para barras). b) Também são úteis alguns indicadores quantitativos médios por trecho (sinuosidade, número de barras, ilhas)	Fotos aéreas - Mais antiga de 1965; imagens do Google Earth de 2003 e de 2010; Imagens LANDSAT.	Listar todas as imagens e fotos que existem; Georreferenciar, ortorectificar e carregar em SIG. Inspeção visual e marcação de polígonos. Cálculo de indicadores	1
		Determinação da planície de inundação ativa (atual) e indicadores associados (ex: largura da planície de inundação média para cada trecho)	MDE e ortofoto + observações de levantamento de campo + entrevistas	1) Inspeção visual do MDE e da ortofoto, a fim de identificar a planície de inundação. 2) Integrar com a verificação em campo e entrevistas. 3) Verificação da coerência Q efetiva = $Q_{bankfull}$	1
		Determinação da planície de inundação do passado e indicadores	MDE e ortofoto, planície de inundação atual e observações de levantamento em campo + entrevistas	Entender onde anteriormente o rio era mais alto e estava ocupando uma porção de planície de inundação que agora é terraço (ou vice versa) e estender/modificar o polígono da planície de inundação atual.	2
		<i>Bankfull</i> anteriores e indicadores associados	MDE e ortofoto, planície de inundação atual e observações de levantamento em campo + entrevistas	Determinar em cada foto aérea o <i>bankfull</i> para ver se ocorreu alguma mudança.	2
5	Granulometria dos sedimentos	Tabela e gráfico com os diâmetros característicos ao longo do rio e afluentes.	Análise granulométrica de 3 seções na área rural	Integração com a informação do levantamento em campo para entender onde os sedimentos são semelhantes e onde são diferentes.	1
6	Obras hidráulicas de controle e aproveitamento	Inventário (tabela e shape Gis) com as obras existentes.	Ortofoto e outras fotos aéreas, além de mapa do IBGE. Possivelmente outras informações de áreas técnicas (Prefeitura, empresa de águas)	Usar símbolos gráficos para gabiões, muros, pontes. Possivelmente classificar as obras por ano e tipo de construção.	1

Tabela 4.14: Etapas da Metodologia VALURI adaptadas à bacia do rio Sesmaria (Parte 3).

Etapa	Título	Produto	Informação disponível	Operação	Prioridade
7	Hidrologia/Hidráulica	Vazões de cheia e zonas inundáveis para diversos TR, e vazão de <i>bankfull</i> e efetiva em cada trecho	Respostas do MODCEL (vazão e nível d'água), postos pluviométricos e medições pontuais.	Lista com todas as informações: 1- registro de vazões; 2- medições pontuais; 3- registros históricos de precipitações + modelo hidrológico.	1
				Análise da sensibilidade com fórmula de transporte sólido para verificar se TR é menor que 1.	3
8	Aporte sólido	Verificação que na situação atual Qs é >> que no passado. Assegurar a coerência do procedimento e dos dados.	Taxa de sedimentação obtida para Bananal; medições recentes.	Vazões e zonas inundáveis obtidas no MODCEL para 2 10, 25, 50 e 100 anos.	1
				Vazão de <i>bankfull</i> com busca hidráulica (Q calculado com Manning, Chézy ou parecida que enche a seção) e vazão efetiva (com base na definição e utilizando uma fórmula de transporte sólido com a granulometria medida e curva de duração e TR).	3
9	Vegetação marginal atual	Vegetação marginal do passado	Fotos aéreas, visitas em campo	1- Aplicar RUSLE para o presente e para o passado, obtendo o volume de sólidos gerado na bacia; 2- Estimativa de volume sedimentado extrapolando a taxa medida em bacia semelhante por geomorfólogos;	4
				1) Preencher uma ficha geomorfológica em campo; 2) Analisar foto aérea e "calibrar" a interpretação com o que foi visto em campo; 3) Criar um shape GIS para cada margem com vegetação	1
			Fotos aéreas, entrevistas, documentos históricos.	Modificar a informação gerada para situação atual de forma qualitativa	2

Tabela 4.15: Etapas da Metodologia VALURI adaptadas à bacia do rio Sesmaria (Parte 4).

Etapa	Título	Produto	Informação disponível	Operação	Prioridade
10	Intervenções	Lista com as intervenções ocorridas na bacia	Fotos aéreas, entrevistas, documentos históricos.	1- Observar mudanças no uso do solo e desmatamento; 2- Obras hidráulicas de controle e aproveitamento; 3 - Modificações morfológicas do canal (dragagem, retificações)	1
11	Análise de equilíbrio atual	Juízo qualitativo (conclusão). Equilíbrio ou desequilíbrio, forte ou moderado.		1- Verificar se houve mudança recente (últimos 10 anos) de largura de <i>bankfull</i> e elevação (cota); 2- Informações locais em campo verificando se o tipo de erosão que está ocorrendo é "natural" ou não. 3- Comparação diferencial de capacidade de transporte sólido por trechos e ver se é coerente com as informações anteriores.	3
12	História do rio	Gráfico com evolução nos anos (a partir do estado original) das variáveis chaves.	Toda a informação anteriormente gerada	Gráficos com as variáveis chave de estado do rio (para cada trecho e para o rio todo): largura do <i>bankfull</i> , sinuosidade, cota; e se possível outros como: largura da planície de inundação; número de barras, ilhas. Por outro lado as "causas": área vegetada, obras, extração de areia, vegetação marginal.	1
		Teoria interpretativa	Historia do rio + conhecimento	Descrever como foi o processo de evolução.	1
13	Predição morfológica	Nova morfologia (planimetria, perfil altimétrico, geometria seções, granulometria, etc.) para cada alternativa de configuração e uso do solo			2

As etapas do método VALURI adaptado são descritas a seguir.

4.4.3 **Divisão do Rio Sesmaria em trechos homogêneos:**

Com a finalidade de identificar o comportamento do rio de forma mais detalhada, para produzir uma análise preliminar, o rio Sesmaria foi dividido em trechos geomorfológicos, de acordo com o comportamento em planta do rio (meandrado ou mais retilíneo), a conformação do vale (confinado, aluvial, parcial), a declividade média por trecho e o uso do solo. Levou-se em consideração também a compatibilidade com a divisão em células de escoamento do MODCEL, pois a partir desta modelagem é possível obter resultados de vazão e nível d'água para os trechos considerados. A entrada de afluentes não foi considerada, pois não foram observadas mudanças significativas após a entrada destes e por serem rios de pequeno porte.

Os critérios adotados usaram como referência a metodologia australiana *River Styles*, desenvolvida por BRIERLEY e FRYIRS (2005). No entanto, por ser esta uma metodologia extensa, de forte cunho morfológico, optou-se por utilizá-la como base, adotando alguns de seus critérios como referência, mas adaptando-a de maneira mais simples. O primeiro estágio da divisão em trechos consistiu no levantamento das características e comportamento de cada trecho do rio, analisando fotografias aéreas, imagens de satélite, modelos digitais de elevação (MDE) e realizando visitas de campo. Posteriormente, tentou-se identificar os diferentes trechos do rio, analisando o confinamento do vale, o comportamento em planta e o uso do solo. Com o levantamento dessas informações, foi possível identificar 18 trechos.

4.4.4 **Perfil altimétrico do vale atual**

O perfil altimétrico do vale foi feito com o uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do rio Sesmaria e o *aplicativo* ArcGis. Foram levantadas cotas ao longo de todo o vale e, com estas cotas e as distâncias foi construído o perfil no EXCEL.

4.4.5 **Perfil altimétrico da calha atual**

O perfil altimétrico da calha atual teve como base as seções levantadas em campo, o MDE da bacia e observações durante as visitas em campo.

4.4.6 **Determinação da planície de inundação**

As planícies de inundação, definidas por trecho, foram levantadas com o uso do programa ArcGis e do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia, adquirido através do sítio eletrônico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, representa o modelo numérico das características altimétricas da superfície, articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro. Abrange um quadrilátero geográfico de 07'30" de latitude por 07'30" de longitude. Os MDE's servem para determinar a superfície matemática e, a partir deles, se pode conhecer aspectos tais como altura, declividade, perfis transversais, volumes, desníveis, áreas sujeitas a inundação e bacias hidrográficas (IBGE, 2012).

Utilizaram-se também as ortofotos deste mesmo projeto, também disponíveis no sítio eletrônico do IBGE, e as imagens de satélite disponíveis no aplicativo Google Earth. Buscou-se identificar e demarcar as áreas mais planas próximas ao fundo do vale do rio Sesmaria e que são alagadas em períodos de cheia.

4.4.7 Perfil altimétrico da calha no passado

Na busca por informações históricas, constatou-se que a bacia do rio Sesmaria passou por um processo de degradação e consequente sedimentação do vale, provocado pela destruição da mata nativa e implantação do cultivo do café.

O rio Bananal, também afluente do rio Paraíba do Sul e localizado no Médio Vale deste rio, possui morfologia semelhante e passou pelo mesmo processo de degradação ocorrido na bacia do rio Sesmaria. DANTAS (1995) calculou para a bacia do rio Bananal a espessura do pacote sedimentar gerado pela degradação da bacia, a partir do cálculo de uma taxa obtida através de levantamentos estratigráficos e datações por radiocarbono, realizados por COELHO NETTO *et al.* (1994).

DANTAS (1995) encontrou para o rio Piracema, afluente do rio Bananal, de área de drenagem 130,06 km², muito semelhante ao rio Sesmaria, um volume de sedimentos estocados nas planícies de inundação de 9.700.000 m³, o que gerou uma taxa de 0,075 m³/m². Essa taxa de sedimentação indica o volume de sedimentação na bacia por área e é resultado de 100 anos em que o solo esteve desprovido de cobertura vegetal capaz de evitar os processos laminares de carreamento de sedimentos ("*sheet-wash erosion*"), ou seja, entre a destruição da mata nativa até a retirada dos cafezais envelhecidos para plantação de gramíneas, e, portanto, correspondente à duração do evento agradacional que originou as atuais planícies de inundação (DANTAS, 1995). O autor encontrou um pacote sedimentar nas planícies do rio Piracema de 2,0 m a montante e 3,5 m a jusante, o que indica que a velocidade de degradação nos fundos de vales é maior a jusante quando comparada à montante. Isto se deve, principalmente, ao aumento da área de contribuição de sedimentos a jusante,

bem como a maior capacidade de transporte a montante, que transfere sedimentos para jusante.

Como a bacia do rio Sesmaria possui características semelhantes à bacia do rio Bananal, como ambos passaram pelos mesmos processos erosivos-deposições, considerando a proximidade das bacias e a ausência desta informação específica para a bacia do rio Sesmaria, adotou-se esta mesma taxa como referência para o rio em estudo, a fim de estimar a espessura do pacote sedimentar e o perfil do rio no passado.

Para estimar a espessura do pacote sedimentar no rio Sesmaria, identificou-se primeiramente as planícies de inundação (etapa descrita no item 5.4.3) e os pontos de controle no rio, com maior declive. A partir desta identificação, a bacia foi dividida em três grandes trechos (Figura 4.13). Posteriormente, foram calculadas as áreas de contribuição de cada grande trecho e as áreas de floresta remanescentes. Calculou-se o volume de sedimentação por área de planície de inundação, descontando as áreas de floresta ainda presentes na bacia e que não contribuíram ao aporte sólido. Esta área foi multiplicada pela taxa encontrada por DANTAS (1995). Nos trechos de maior declividade não se considerou que houvesse sedimentação e as pequenas áreas de planície foram agregadas ao trecho a jusante. Calculou-se, então a espessura do pacote sedimentar para cada grande trecho.

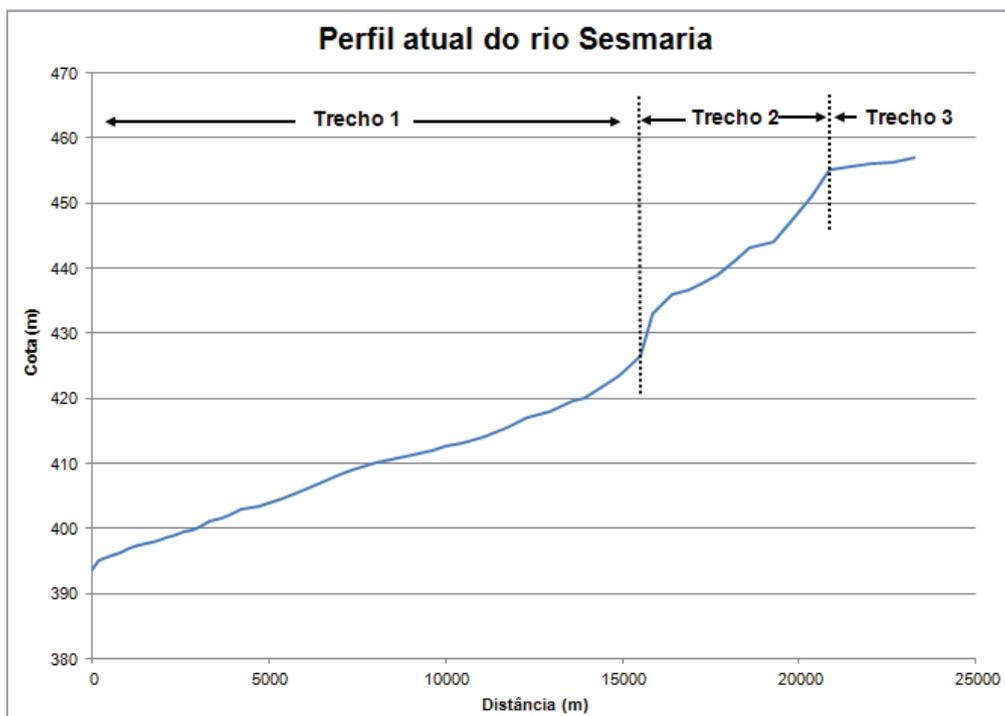


Figura 4.13: Perfil atual do rio Sesmaria indicando os trechos considerados para o cálculo da sedimentação.

A fim de representar melhor a realidade e como o vale fluvial tem a forma de um triângulo adotou-se que a espessura do pacote no fundo do vale deverá ser dobrada, pois considerando o vale em formato triangular, a espessura do pacote sedimentar no fundo dos vales seria o dobro do valor da altura do pacote médio, que seria representativo das planícies (Figura 4.14).

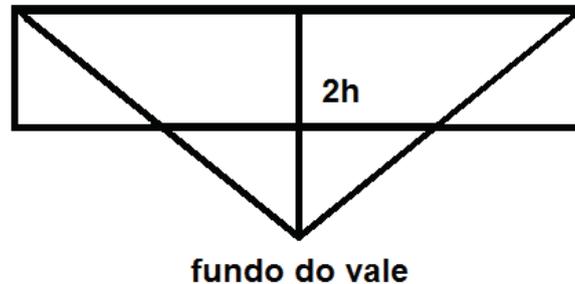


Figura 4.14: Vale triangular indicando que a espessura do pacote sedimentar no fundo do vale é duas vezes maior.

Como DANTAS (1995) encontrou valores crescentes de espessura de montante (2,0 m) para jusante (3,5 m), calculou-se a espessura do pacote através da distribuição da taxa por área, tendo como base os valores obtidos pelo autor, que encontrou uma altura de pacote sedimentar a jusante 75% maior quando comparado com o valor encontrado a montante. Foi utilizada esta variação até 75%, conforme aumenta a área de contribuição, preservando o volume calculado pela contribuição das áreas através de um fator de correção obtido pela razão entre o volume calculado em função da taxa de sedimentação por área e o volume obtido pela soma dos volumes por trecho geomorfológico.

4.4.8 Levantamento de dados históricos

Foi feito o levantamento de dados históricos, tais como mapas, fotografias e relatos relacionados à área de estudo. Foram levantadas informações junto à Prefeitura de Resende, ao Instituto Histórico Geográfico Brasileiro e à Biblioteca Nacional.

4.4.9 Cálculo da vazão de *bankfull*

A vazão de *bankfull* foi calculada com fórmula de Manning (15), para a seção transversal considerada por trecho. Foi considerada a área da seção plena, antes do transbordamento, para caracterizar o *bankfull*. A definição da seção plena foi balizada também por verificações de campo.

$$Q = \frac{A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (15)$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s);

A = área da seção (m^2);

R_h = raio hidráulico (m);

S = declividade do fundo (m/m); e

n = coeficiente de Manning.

O coeficiente de Manning, também chamado de coeficiente de rugosidade, foi definido a partir dos parâmetros apresentados no livro *Open Channel Hydraulics*, de Ven Te Chow, 1959 (Tabela 4.16). A fórmula desenvolvida por Chow considera diversos parâmetros, tais como: material do leito, irregularidade do fundo, variação da seção transversal, vegetação, entre outros. Os parâmetros foram definidos através de observações de campo e de imagens de satélite.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_0 \quad (16)$$

Onde:

n_0 = material do leito;

n_1 = grau de irregularidade do leito;

n_2 = variação da seção transversal;

n_3 = efeitos de obstruções;

n_4 = vegetação;

m_0 = grau de meandramento do canal.

Tabela 4.16: Parâmetros considerados no cálculo do coeficiente de Manning. Fonte: Chow, 1959

Condições do Canal		Valores	
Material do leito:	1 - Terroso	n_0	0.02
	2 - Rochoso		0.025
	3 - Cascalho fino		0.024
	4 - Cascalho grosso		0.028
Grau de irregularidade do fundo:	1 - Suave	n_1	0
	2 - Pequeno		0.005
	3 - Moderado		0.01
	4 - Severo		0.02
Variação de seção transversal:	1 - Gradual	n_2	0
	2 - Ocasional		0.005
	3 - Freqüente		0.010 - 0.015
Efeitos da obstrução:	1 - Desprezível	n_3	0
	2 - Pequeno		0.01 - 0.015
	3 - Considerável		0.02 - 0.03
	4 - Severo		0.04 - 0.06
Vegetação:	1 - Baixa	n_4	0.005 - 0.01
	2 - Média		0.01 - 0.025
	3 - Grande		0.025 - 0.05
	4 - Muito elevada		0.05 - 0.1
Grau de meandramento:	1 - Pequeno	m_0	1
	2 - Apreciável		1.15
	3 - Severo		1.3

4.4.10 Cálculo da vazão efetiva

A vazão efetiva de um canal se refere à vazão, ou conjunto de vazões que, ao longo do tempo, transporta a maior quantidade de sedimentos (DOYLE *et al.*, 2007). Também pode ser chamada de vazão geradora ou dominante, uma vez que é a responsável pela forma do canal. Esse conceito é muito usado nas estratégias de requalificação de rios. É calculada multiplicando-se a curva de probabilidade de ocorrência de uma vazão pela curva da vazão sólida e encontrando o produto máximo.

Para o cálculo da vazão sólida foi escolhida a fórmula de MEYER-PETER e MULLER, pois ela é indicada para o cálculo da vazão de arraste quando o material do leito for grosso, ou seja, quando o diâmetro médio for superior a 0.4 mm (VIEIRA da SILVA E WILSON-JR., 2005). O diâmetro médio das três seções onde foram coletados sedimentos no rio Sesmaria é superior a 0.4 mm, sendo recomendada a utilização desta fórmula.

A fórmula de MEYER-PETER e MULLER (1948), para o cálculo da descarga de sedimentos por arrasto, é uma fórmula baseada em dados experimentais e tem sido extensivamente testada e utilizada para rios com sedimentos relativamente grosseiros. Baseia-se, basicamente, em duas hipóteses: 1) a declividade da linha de energia é uma característica da interação entre o movimento sólido e o líquido de um escoamento com transporte de sedimentos. Uma porção de energia é consumida no transporte sólido e a energia remanescente é consumida no movimento líquido; e 2) os mesmos fenômenos que governam o transporte de sedimentos também governam o início do movimento.

Para a sua aplicação é necessário conhecer alguns parâmetros, tais como: peso específico dos sedimentos, diâmetros característicos do material de fundo, a declividade da linha de energia, a vazão e a forma da seção transversal do canal.

A equação de transporte geral para a função de Meyer-Peter Muller é representada pela equação número 17 (MEYER-PETER e MULLER, 1948):

$$\left(\frac{k_r}{k_s}\right)^{3/2} \gamma R_b S = 0.047(\gamma_s - \gamma) d_m + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{2/3} g_s^{2/3} \quad (17)$$

Onde:

g_s = taxa de transporte de sedimentos por unidade de largura (peso/tempo/unidade de largura);

k_r = coeficiente de rugosidade;

k_r' = coeficiente de rugosidade baseado nos sedimentos;

γ = peso específico da água;

γ_s = peso específico do sedimento;

g = aceleração da gravidade;

d_m = diâmetro médio do material de fundo;

R_h = raio hidráulico; e

S = gradiente de energia.

4.4.11 Levantamentos das obras hidráulicas de controle e aproveitamento

Foi feito o levantamento das obras existentes ao longo do rio a partir das observações em campo e das imagens de satélite do aplicativo Google Earth. De posse destas informações foi feita uma tabela com a listagem das obras e um shape Gis com a localização destas.

4.4.12 RUSLE

Para cada trecho geomorfológico estimou-se a perda de solo da bacia contribuinte ao trecho, através da fórmula de RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Este método foi desenvolvido por WISCHMEIER e SMITH em 1965, e é um dos métodos mais conhecidos para a estimativa da perda de solo pela erosão hídrica. A Equação da RUSLE é dada pela equação número 18.

$$A = R . K . LS . C . P \quad (18)$$

Sendo:

A= perda anual de solo do solo devido ao escoamento superficial (ton/ha/ano);

R= fator de erosividade da chuva, que expressa a erosão potencial (MJ/ha)/(mm/h));

K= fator de erodibilidade do solo (ton/MJ/ha/(mm/h)).

LS= fator de declividade e comprimento de encosta (adimensional)

C= fator que expressa uso e manejo do solo e cultura (adimensional)

P= fator que expressa a prática conservacionista do solo (adimensional)

Essa estimativa visa confirmar a possibilidade de produção do pacote sedimentar que foi considerado, em analogia com o processo desenvolvido na bacia do rio Bananal. Para a bacia do rio Sesmaria, a RUSLE foi estimada para o período pré-desmatamento e para o período atual.

4.5 Cenários propostos

Para este trabalho são propostos 5 cenários de simulação:

- *Situação atual de alagamentos em Resende:* neste cenário a bacia será simulada tal como é, com todas as intervenções já realizadas no rio Sesmaria e com a situação atual de uso e cobertura do solo.
- *Situação de alagamentos no passado, com a bacia antes do desmatamento:* este cenário será uma simulação da bacia antes de qualquer intervenção antrópica, ainda com a vegetação nativa e sem a cidade de Resende.
- *Situação de alagamentos em Resende, caso a bacia tivesse se preservado ao longo do tempo:* neste caso apenas a área rural da bacia foi preservada, portanto, considera-se a urbanização de hoje na foz, mas as feições do passado no restante da bacia, como as cotas do terreno e a cobertura do solo;
- *Situação de alagamentos em Resende, caso seja adotado um processo de requalificação fluvial:* neste cenário a faixa marginal de proteção será demarcada e revegetada, assim como os topos de morro recuperados e efetivados como APA (conforme prevê a legislação). Considera-se essa alternativa o início de requalificação fluvial, devido ao estabelecimento de um espaço mínimo destinado ao rio. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, novas propostas poderão ser incorporadas a estas intervenções mínimas, em função da análise interpretativa gerada;
- *Situação de alagamentos em Resende, caso seja reflorestada apenas a faixa marginal de proteção:* neste cenário a faixa marginal de proteção será demarcada e revegetada.

5 Resultados

5.1 Aplicação do VALURI

A aplicação do VALURI visou elaborar o diagnóstico morfológico da bacia e a teoria interpretativa, a fim de inferir como o rio irá se comportar diante de novas alterações ou caso nenhuma alteração seja feita.

5.1.1 História do rio

Para a história do rio e teoria interpretativa, foram aplicadas as etapas apresentadas no capítulo Metodologia no item 4.4.2.

Primeiro elaborou-se o mapa da bacia, apresentado no capítulo Caracterização da Área de estudo (Figura 3.4 do item 3.1). Posteriormente foram identificados os trechos geomorfológicos, baseado na metodologia do River Styles (BRIERLEY e FRYIRS, 2005). O rio Sesmaria foi dividido em 18 trechos geomorfológicos, apresentados no mapa da Figura 5.1 e da Figura 5.2. A Tabela 5.1 mostra as características de cada trecho. Uma descrição fotográfica dos trechos é apresentada no Apêndice 3.

Foram levantadas 5 seções transversais em campo com o uso de estação total e GPS. Essas seções são referentes aos trechos 6, 9, 11, 13 e 18. As demais seções são resultado de observações em campo e interpolações feitas a partir do modelo digital de elevação da bacia do rio Sesmaria. As seções transversais referentes a cada trecho geomorfológico estão apresentadas na Tabela 5.2.

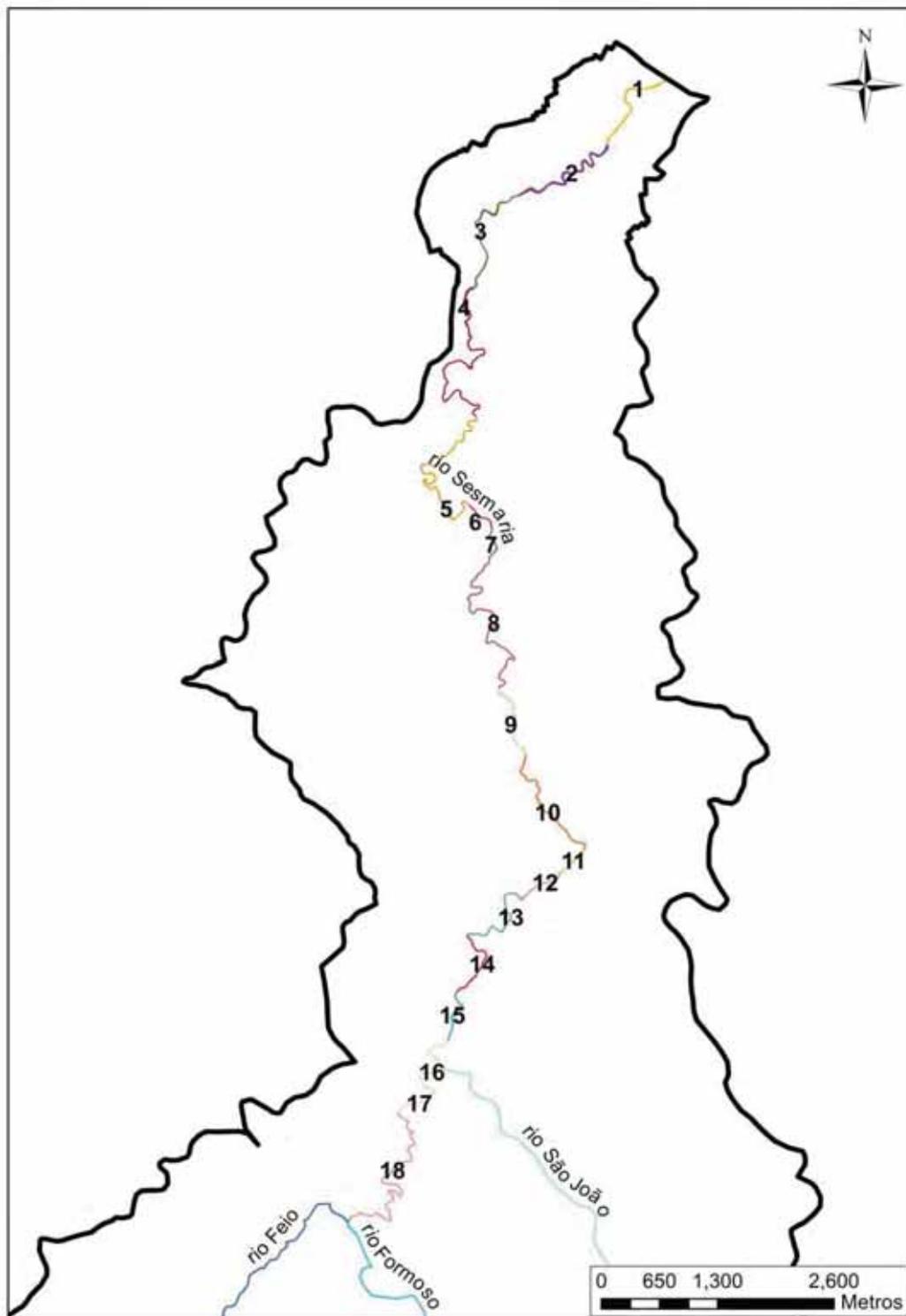


Figura 5.1: Mapa do rio Sesmaria dividido em trechos geomorfológicos.

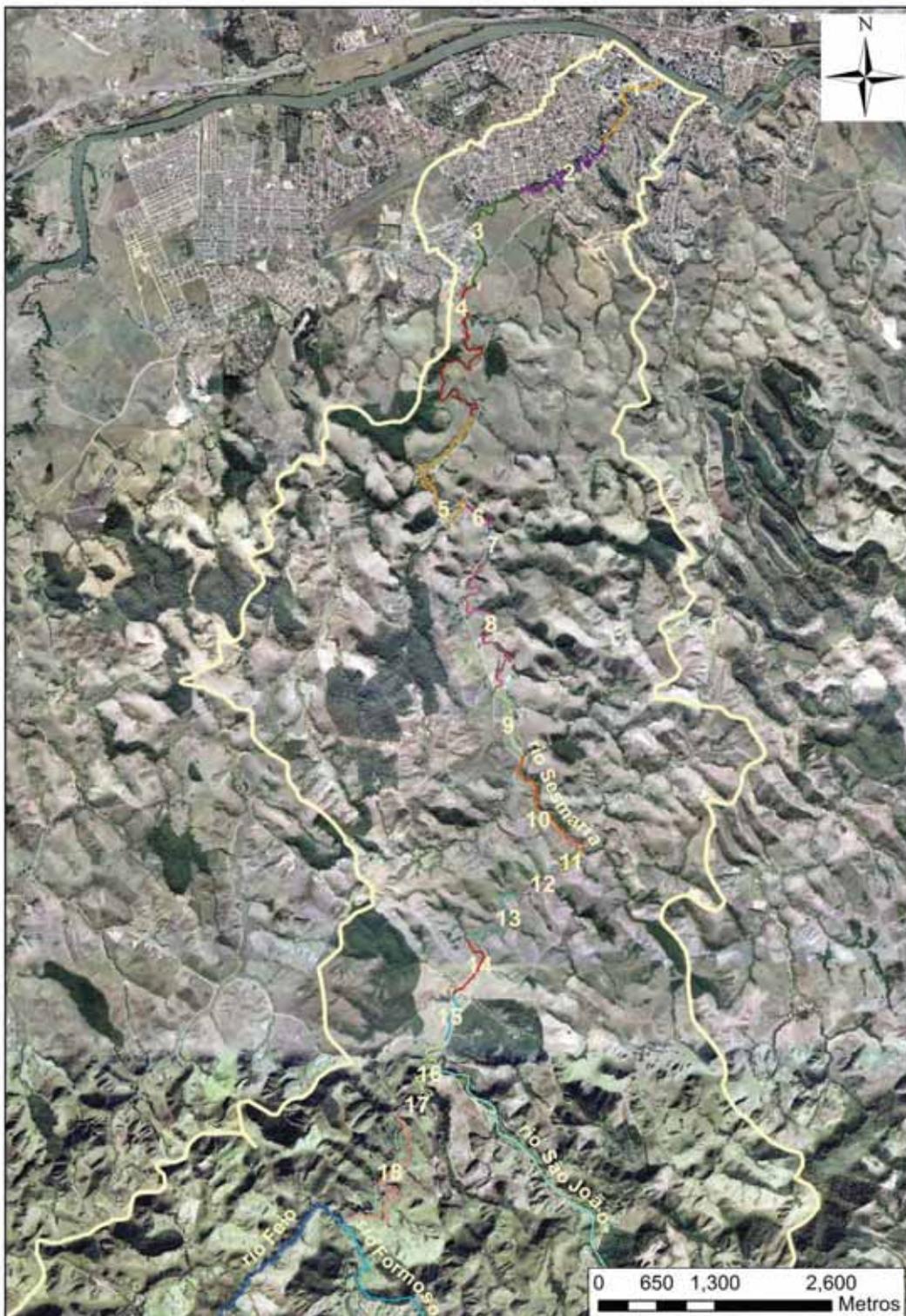


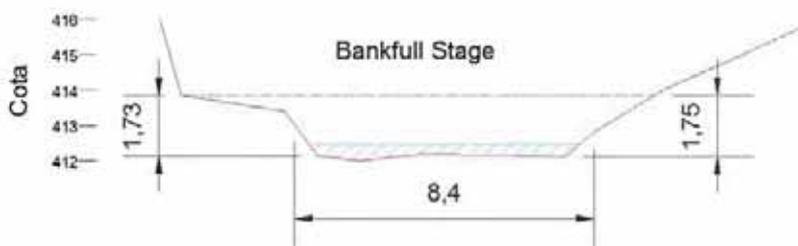
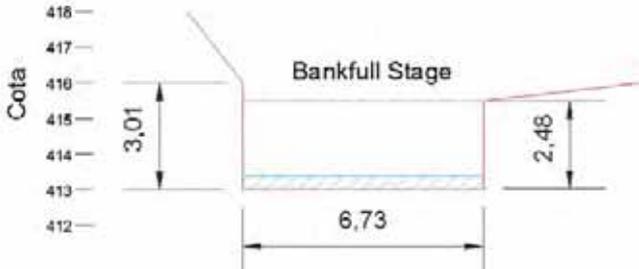
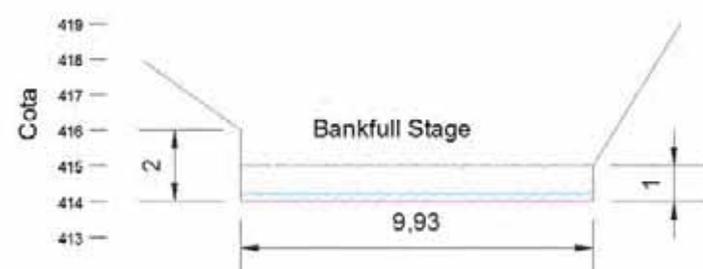
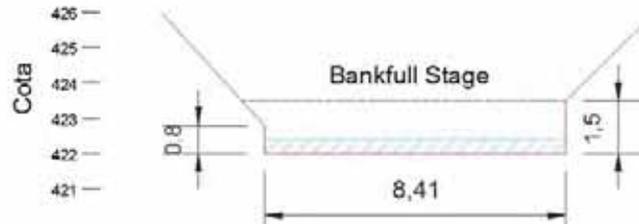
Figura 5.2: Mapa do rio Sesmaria dividido em trechos geomorfológicos.

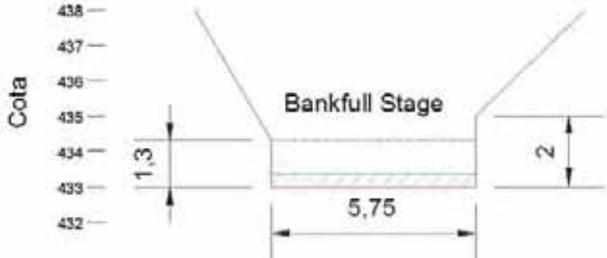
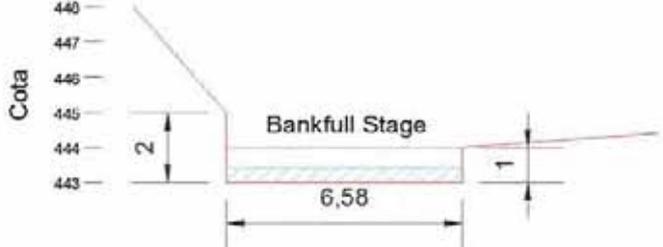
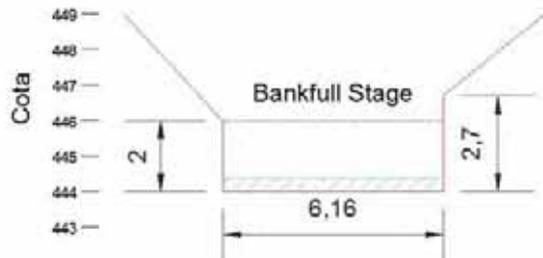
Tabela 5.1: Trechos homogêneos e suas características (L_r=comprimento do rio; L_v=comprimento do vale; P=sinuosidade e S=declividade)

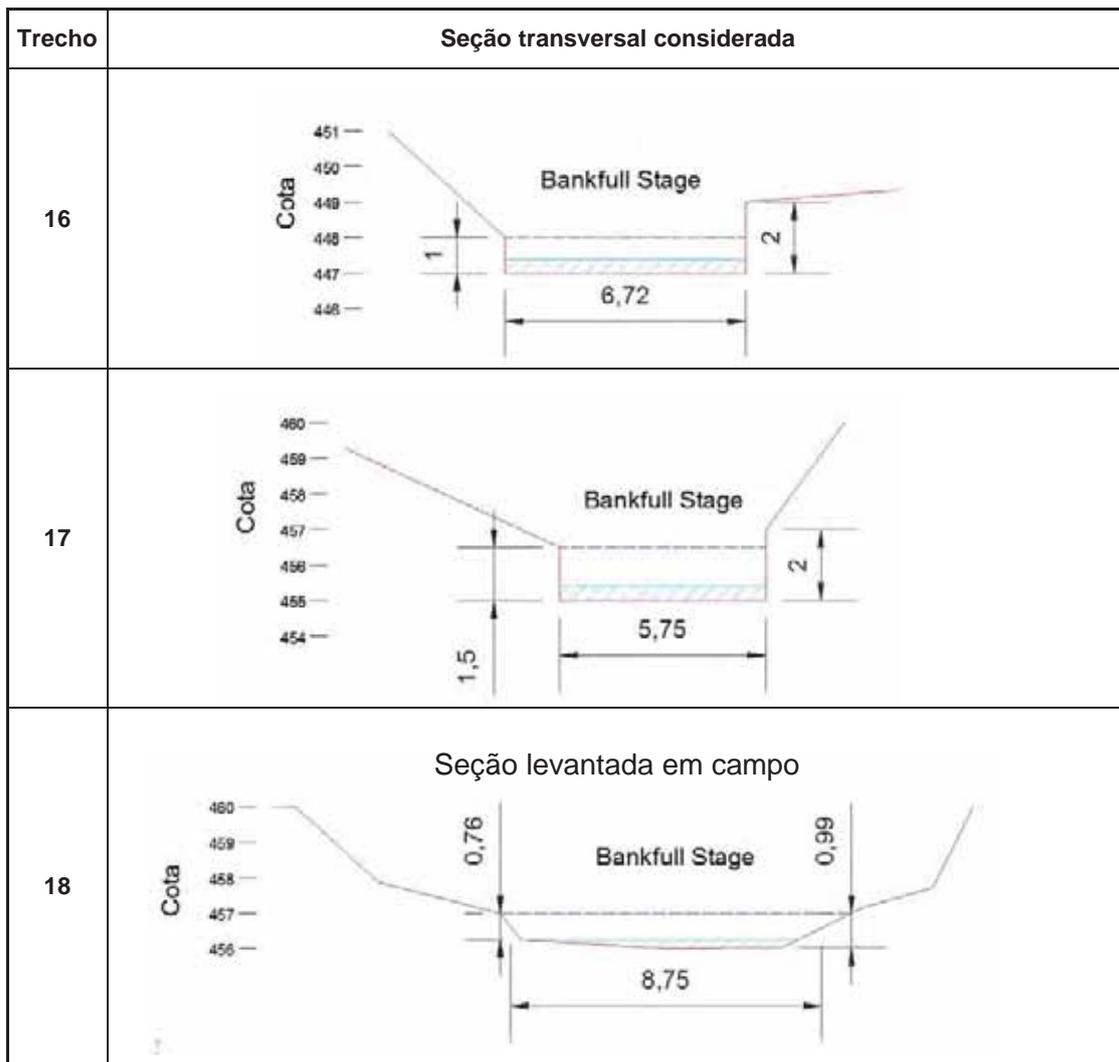
Trecho	L _r (km)	L _v (km)	P	Células	Comportamento em planta	Conformação do vale	S (m/m)	Uso do solo
1	1.25	1.07	1.16	1 a 8	mais retilíneo	Planície ampla	0.00260	Urbano – denso
2	1.53	1.07	1.42	8 a 13	meandrado	Planície ampla	0.00164	Urbano – denso
3	1.61	1.34	1.20	13 a 20	mais retilíneo	Planície ampla	0.00214	Urbano - pouco denso
4	2.77	1.55	1.78	20 a 112	meandrado	Bolsões de várzea ocasionais	0.00192	Rural - pastagem, fragmentos de floresta
5	2.60	1.59	1.64	112 a 116	meandrado	Planície descontínua sinuosa	0.00142	Rural - pastagem, fragmentos de floresta
6	0.39	0.35	1.13	116 a 117	mais retilíneo	Bolsões de várzea ocasionais	0.00180	Rural – pastagem
7	0.47	0.40	1.19	117 a 118	mais retilíneo	Planície descontínua	0.00064	Rural – pastagem
8	2.50	1.45	1.72	118 a 122	meandrado	Planície descontínua sinuosa	0.00199	Rural - pastagem, fragmentos de floresta
9	0.99	0.81	1.22	122 a 124	levemente meandrado	Planície descontínua	0.00202	Rural – pastagem
10	1.58	1.29	1.22	124 a 127	levemente meandrado	Planície descontínua	0.00415	Rural – pastagem
11	0.35	0.33	1.05	127 a 128	mais retilíneo	Confinado	0.01810	Rural – pastagem
12	0.52	0.49	1.06	128 a 129	retilíneo	Confinado	0.00574	Rural – pastagem
13	1.27	0.84	1.51	129 a 132	meandrado	Planície descontínua sinuosa	0.00235	Rural – pastagem
14	0.92	0.76	1.21	132 a 134	mais retilíneo	Planície descontínua de baixa sinuosidade	0.00432	Rural – pastagem
15	0.66	0.55	1.21	134 a 135	levemente meandrado	Parcialmente confinado	0.00150	Rural - pastagem, plantação de eucalipto
16	1.09	0.66	1.66	135 a 137	meandrado	Parcialmente confinado com bolsões de várzea ocasionais	0.00641	Rural - pastagem, plantação de eucalipto
17	0.49	0.45	1.11	137 a 138	mais retilíneo	Confinado	0.00812	Rural - pastagem, fragmentos de floresta
18	2.70	1.49	1.81	138 a 142	meandrado	Planície descontínua sinuosa	0.00083	Rural – pastagem

Tabela 5.2: Seção transversal considerada por trecho.

Trecho	Seção transversal considerada
1	<p>Diagram 1: Cross-section of a channel with a 'Bankfull Stage' width of 13,65. The left bank height is 2,41 and the right bank height is 3,8. The elevation scale (Cota) ranges from 396 to 401.</p>
2	<p>Diagram 2: Cross-section of a channel with a 'Bankfull Stage' width of 9,97. The left bank height is 3,9 and the right bank height is 3,1. The elevation scale (Cota) ranges from 399 to 404.</p>
3	<p>Diagram 3: Cross-section of a channel with a 'Bankfull Stage' width of 8,25. The left bank height is 2,1 and the right bank height is 1,6. The elevation scale (Cota) ranges from 400 to 405.</p>
4	<p>Diagram 4: Cross-section of a channel with a 'Bankfull Stage' width of 10,18. The left bank height is 2,89 and the right bank height is 2,62. The elevation scale (Cota) ranges from 404 to 409.</p>
5	<p>Diagram 5: Cross-section of a channel with a 'Bankfull Stage' width of 8,04. The left bank height is 3,43 and the right bank height is 2. The elevation scale (Cota) ranges from 409 to 414.</p>

Trecho	Seção transversal considerada
6	<p style="text-align: center;">Seção levantada em campo</p>  <p style="text-align: center;">Bankfull Stage</p>
7	 <p style="text-align: center;">Bankfull Stage</p>
8	 <p style="text-align: center;">Bankfull Stage</p>
9	<p style="text-align: center;">Seção levantada em campo</p>  <p style="text-align: center;">Bankfull Stage</p>
10	 <p style="text-align: center;">Bankfull Stage</p>

Trecho	Seção transversal considerada
11	<p style="text-align: center;">Seção levantada em campo</p> 
12	
13	<p style="text-align: center;">Seção levantada em campo</p> 
14	
15	



Características dos sedimentos - análise granulométrica

Coletou-se material do leito do rio Sesmaria em 3 seções, em campanhas de campo, e posteriormente foi feita a análise granulométrica a fim de determinar os diâmetros característicos destas seções. Os locais da coleta do material, assim como os diâmetros encontrados para cada seção estão apresentados na Figura 5.3. Observa-se que os diâmetros característicos D_{50} encontrados seguem a tendência natural, conforme mostra a Tabela 5.3, na foz dos rios encontra-se materiais finos devido à baixa declividade e à diminuição das velocidades de escoamento. Na medida em que se sobe o rio, os sedimentos vão ficando mais grossos.

Tabela 5.3: Diâmetros encontrados nas seções de coleta de sedimentos e os trechos correspondentes.

Seção	D84 (mm)	D50 (mm)	D16 (mm)
1	1.12	0.56	0.24
2	17.32	1.03	0.25
3	8.76	1.27	0.47

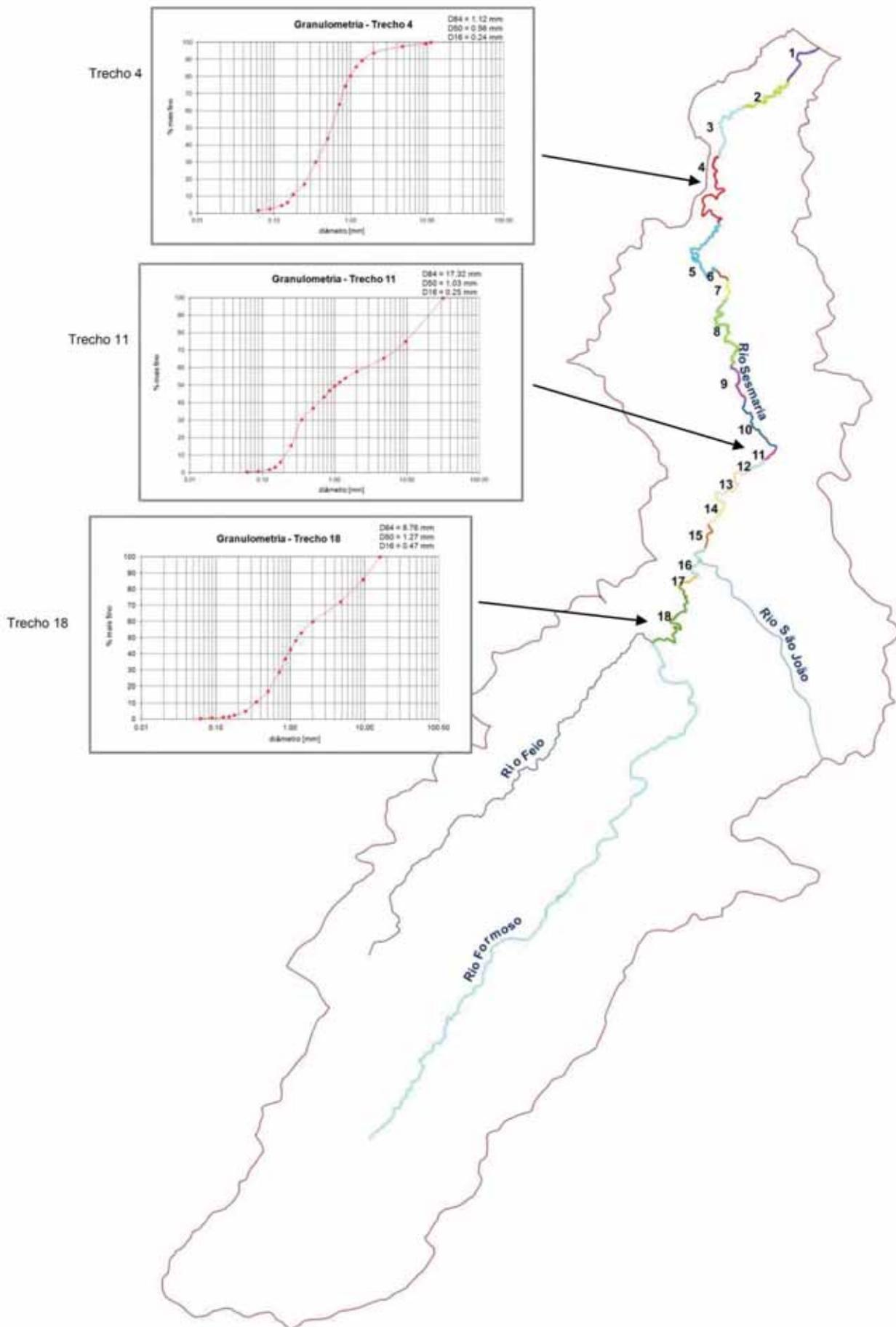


Figura 5.3: Locais da coleta de sedimentos e curva granulométrica por amostra.

Vazão efetiva

Foi calculado o transporte de sedimento de fundo para as três seções onde foram coletados sedimentos (trechos 4, 11 e 18) e foi determinada a vazão efetiva. Os resultados por trecho estão apresentados na Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6. As vazões referentes a cada tempo de recorrência (TR) foram calculadas com o uso do modelo hidrodinâmico MODCEL a partir das chuvas com a mesma recorrência. Como pode ser visto, a vazão efetiva é semelhante à vazão para uma chuva com tempo de recorrência de 1 ano, ou menos, o que indica que há transporte sólido significativo com vazões relativamente baixas.

A partir do *software* HIDRO-FLU, foram calculadas as chuvas de projeto para diversos tempos de recorrência e, com o uso do MODCEL, foram obtidos os resultados de vazão para cada tempo de recorrência por trecho. Com fórmula de Manning calculou-se a vazão de *bankfull* para as seções representativas dos trechos e, nas seções onde foram coletadas amostras de sedimentos, foi calculada também a vazão efetiva a partir da fórmula de MEYER-PETER e MULLER (1948). Estas vazões estão apresentadas na Tabela 5.4.

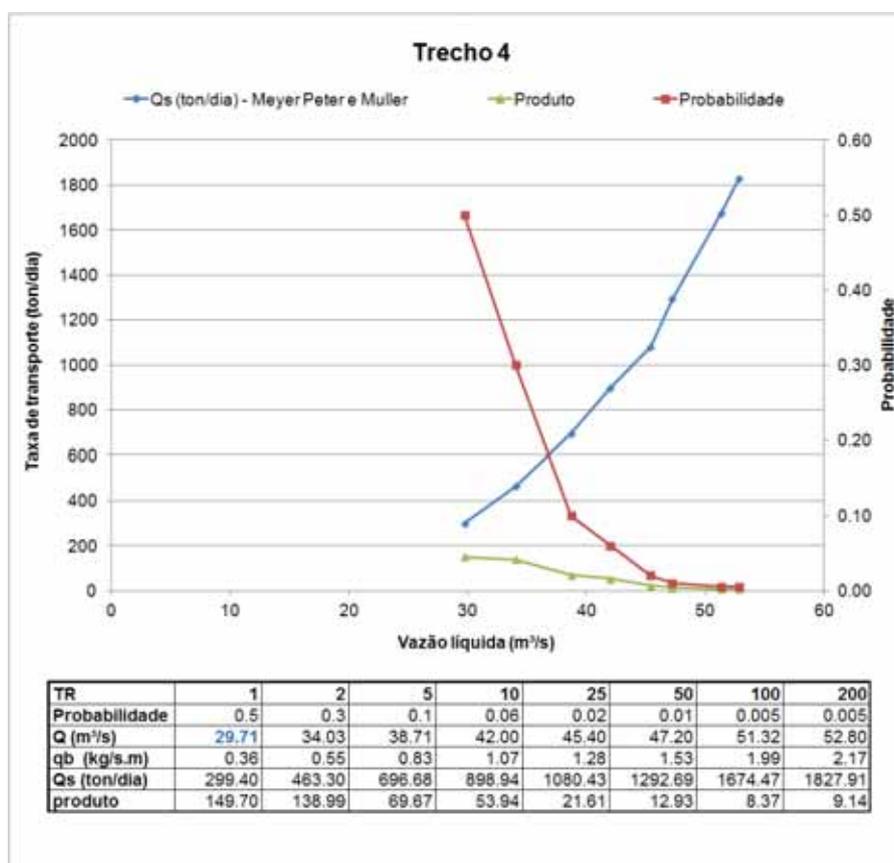


Figura 5.4: Transporte de sedimentos e vazão efetiva para o trecho 4. A vazão efetiva está assinalada em azul.

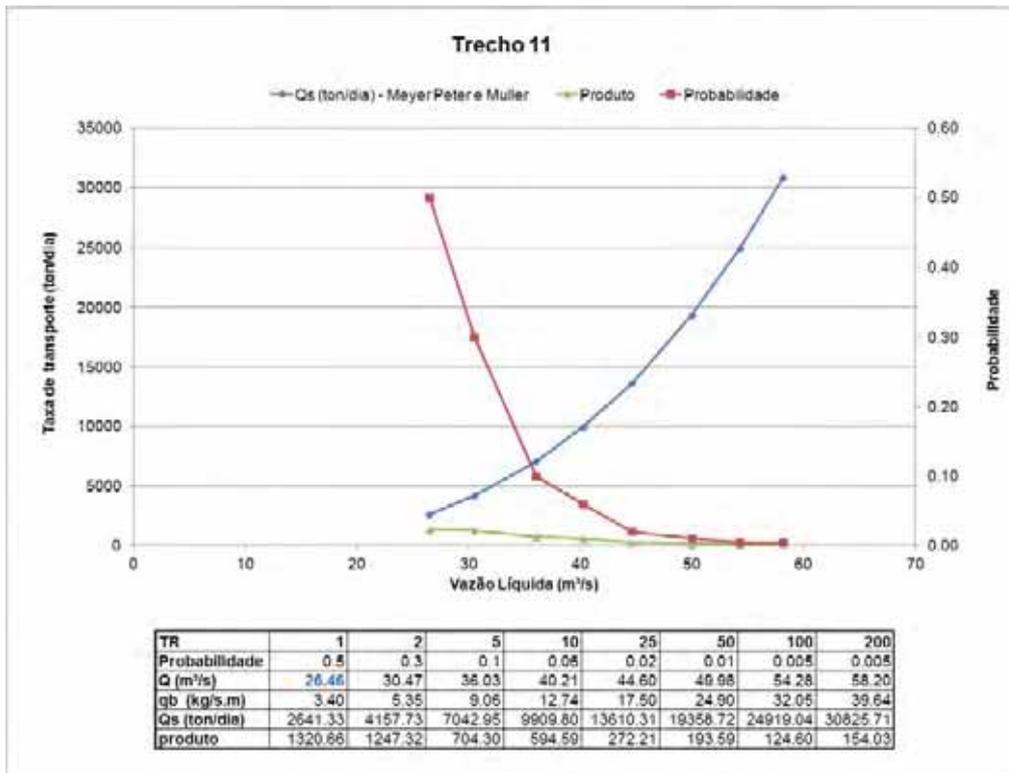


Figura 5.5: Transporte de sedimentos e vazão efetiva para o trecho 11. A vazão efetiva está assinalada em azul.

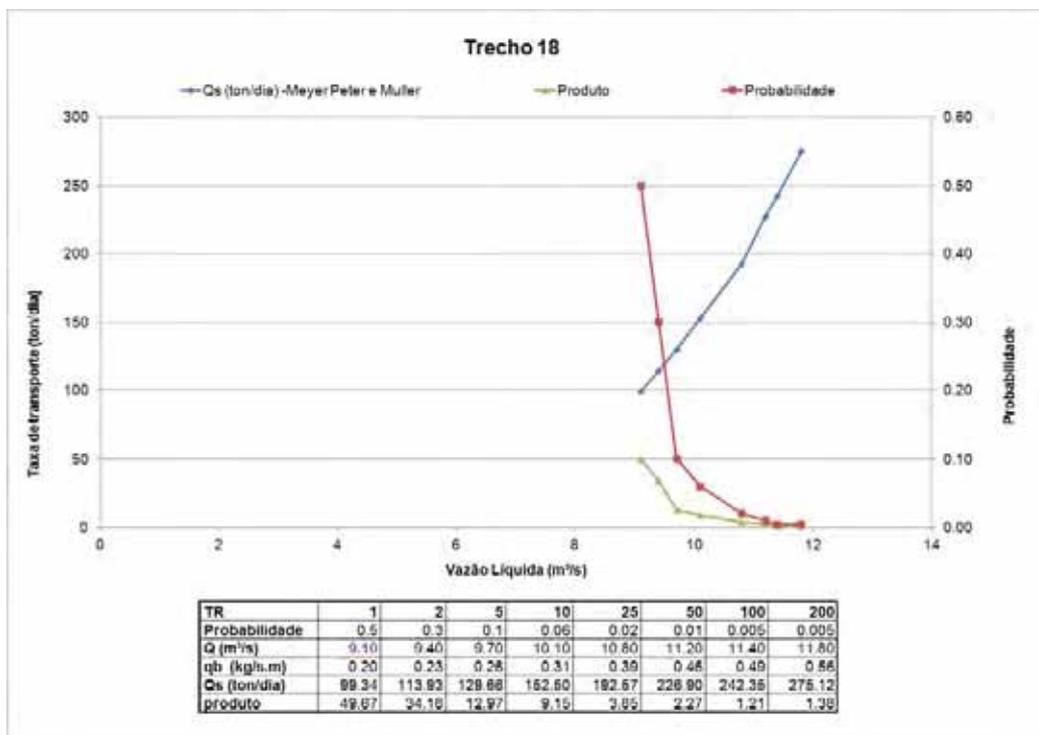


Figura 5.6: Transporte de sedimentos e vazão efetiva para o trecho 18. A vazão efetiva está assinalada em azul.

Tabela 5.4: Vazões obtidas no MODCEL para cada TR, vazão de *bankfull* e vazão efetiva calculadas por trecho.

Trecho	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	Q TR 25	Q TR 50	Q TR 100	Q <i>bankfull</i>	Q efetiva
1	29.8	35.5	43.4	48.9	54.4	59.4	64.9	25.7	-
2	29.8	35.3	42.2	43.7	43.2	44.3	44.9	27.8	-
3	20.1	22.1	24.1	25.5	26.9	28.1	29.5	19.3	-
4	29.7	34.0	38.7	41.9	43.1	47.2	51.3	26.3	≤ 29.7
5	25.6	28.4	31.8	34.4	36.4	38.8	41.9	11.7	-
6	21.1	23.1	24.8	25.6	26.9	28.1	29.4	11.4	-
7	28.1	31.9	36.1	38.7	40.7	42.8	45.2	13.1	-
8	19.3	20.8	22.7	24.4	26.9	29.2	31.9	10.0	-
9	19.7	22.0	24.1	25.6	27.7	29.5	31.5	12.4	-
10	24.5	26.8	30.0	32.3	35.6	37.7	39.4	14.8	-
11	26.5	30.5	36.0	40.2	45.9	50.0	54.3	24.7	≤ 26.5
12	20.1	28.1	31.4	33.6	36.2	38.4	41.4	21.9	-
13	10.4	15.0	16.4	17.7	19.1	20.3	22.2	12.9	-
14	16.5	17.8	19.6	20.9	23.0	24.6	27.1	10.7	-
15	17.5	19.0	20.5	21.7	24.3	26.4	28.9	15.5	-
16	15.6	16.7	18.5	19.9	20.8	21.5	24.3	9.2	-
17	18.0	19.1	20.3	21.3	22.6	23.7	24.6	11.9	-
18	10.9	11.7	12.6	13.4	14.5	15.5	16.5	4.7	≤ 9.1

Mudanças na geometria do rio

Na busca por mudanças recentes na bacia, foram analisadas as imagens de satélite disponíveis em escala que permita verificar as mudanças ocorridas. Com a ajuda do aplicativo Google Earth foram encontradas imagens de Julho de 2003 e de Agosto de 2010, ambas do período seco, o que facilitou a análise comparativa. Estas imagens foram cuidadosamente analisadas e detectou-se o alargamento da calha do rio em quase toda a sua extensão, como pode ser visto na Tabela 5.5. Estas larguras médias por trecho foram obtidas pela relação entre a área do trecho e seu comprimento. Como pode-se verificar, a mudança na largura do rio foi significativa em um curto espaço de tempo. As maiores responsáveis por este alargamento, provavelmente, foram as enchentes que ocorreram nos meses de março e dezembro de 2010 e que arrastaram grandes quantidades de sedimentos da calha do rio.

Tabela 5.5: Larguras por trecho nos anos de 2003 e 2010 e diferença entre as larguras.

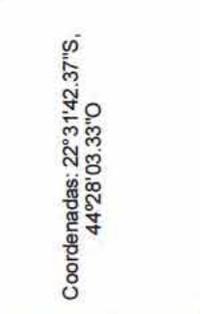
Trecho	Largura 2003 (m)	Largura 2010 (m)	Diferença (m)
1	8.00	10.00	2.00
2	6.00	9.00	3.00
3	5.00	8.00	3.00
4	6.00	9.00	3.00
5	4.00	7.00	3.00
6	5.00	6.00	1.00
7	5.00	7.00	2.00
8	6.00	8.00	2.00
9	5.00	7.00	2.00
10	4.00	7.00	3.00
11	5.00	9.00	4.00
12	6.00	9.00	3.00
13	7.00	10.00	3.00
14	5.00	7.00	2.00
15	5.00	7.00	2.00
16	7.00	8.00	1.00
17	5.00	7.00	2.00
18	4.00	6.00	2.00

Obras no rio

Outra informação importante, para compreender o comportamento do rio Sesmaria e os efeitos que sua forma sofre, diz respeito às obras introduzidas na calha do rio. A Tabela 5.6 apresenta as pontes presentes no rio, sua localização e o trecho correspondente. A Tabela 5.7 apresenta os muros de contenção, assim como sua localização no rio e o trecho.

Tabela 5.6: Pontes ao longo do rio Sesmaria.

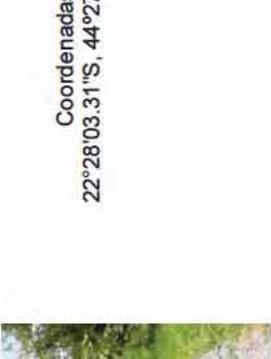
PONTES		OBRAS		TRECHO
Ponte na foz do rio Sesmaria	 <p>Visão mais geral da ponte.</p>	 <p>O rio Sesmaria desaguando no rio Paraiba do Sul.</p>	 <p>Coordenadas: 22°27'58.78"S, 44°27'00.06"O</p>	1
Penúltima ponte - próxima à foz		 <p>Coordenadas: 22°28'01.24"S, 44°27'05.46"O</p>		1
Ponte em área urbana	 <p>Visão mais geral da ponte.</p>	 <p>A esquerda, sentido montante.</p>	 <p>Coordenadas: 22°28'10.23"S, 44°27'13.46"O</p>	1
Ponte em condomínio	 <p>Coordenadas: 22°28'14.05"S, 44°27'16.58"O</p>			1

PONTES		OBRAS		TRECHO	
Ponte próxima à Universidade Estácio			2		
Ponte próxima a uma estação de gás - área rural				5	
Ponte em área particular - área rural	<p>Visão geral da ponte.</p> 	<p>Olhando para montante.</p> 	<p>Coordenadas: 22°31'42.37"S, 44°28'03.33"O</p> 	8	
Ponte em área particular - área rural			<p>Coordenadas: 22°31'54.33"S, 44°27'58.75"O</p>	9	

OBRAS		TRECHO
<p>Ponte em área particular - área rural</p> 		<p>10</p> <p>Coordenadas: 22°32'40.53"S, 44°27'30.25"O</p>
<p>Ponte na área rural</p> 		<p>13</p> 
<p>Ponte em área particular - área rural</p> 	<p>Visão geral da ponte.</p> 	<p>14</p> <p>Coordenadas: 22°33'33.28"S, 44°28'18.84"O</p>
<p>Ponte de madeira - área rural</p> 	<p>Visão geral da ponte.</p> 	<p>16</p> <p>Coordenadas: 22°34'10.14"S, 44°28'32.17"O</p>

PONTES

Tabela 5.7: Muros de contenção do longo do rio Sesmaria.

MURAS DE CONTENÇÃO		OBRAS		TRECHO
Muro próximo a penúltima ponte				1 Coordenadas: 22°28'02.48"S, 44°27'08.13"O
Muro na curva próximo à penúltima ponte				1 Coordenadas: 22°28'03.31"S, 44°27'14.85"O
Muro próximo à Universidade Estácio				2 Coordenadas: 22°28'26.96"S, 44°27'26.16"O

MURROS DE CONTENÇÃO		OBRAS		TRECHO
Muro próximo à rua Sesmarta	 		2	
Muro na área rural		<p>Coordenadas: 22°28'40.02"S, 44°27'50.34"O</p>  <p>Coordenadas: 22°32'59.81"S, 44°27'57.99"O</p>	13	

Perfil do rio no passado

A estimativa do perfil do rio no passado foi obtida através de um estudo realizado em bacia vizinha, bacia hidrográfica do rio Bananal, com características semelhantes à bacia do rio Sesmaria. Foi estimada a altura do pacote sedimentar gerado após o desmatamento de grande parte da bacia para a plantação de café. A Tabela 5.8 apresenta os valores deste pacote para o rio e para as planícies. O pacote foi calculado por trechos, conforme descrito no capítulo Metodologia, item 5.4.5. Nos trechos em que a deposição foi considerada igual a zero, admitiu-se que, por serem trechos de quebra de declividade, não houve sedimentação durante este período e, sendo assim, a área de contribuição para estes trechos foi somada à área mais a jusante.

Tabela 5.8: Mensuração da espessura do pacote sedimentar (E) no rio Sesmaria.

Grande trecho	Trecho	Área contribuindo para o trecho (m ²)	Áreas de planície por trecho (m ²)	Áreas de floresta (m ²)	E (m) rio Sesmaria	E* (m) corrigido	E (m) planícies
1	1	1164823	621820	65794	3.83	3.08	1.54
	2	1904442	322570	80994	3.49	2.80	1.40
	3	3768571	815933	364105	2.61	2.10	1.05
	4	3022211	169127	151828	2.43	1.95	0.98
	5	8370600	112763	62983	2.31	1.85	0.93
	6	3534011	11781	1224283	2.30	1.84	0.92
	7	199900	19011	246501	2.28	1.83	0.91
	8	2986382	206290	67785	2.05	1.65	0.82
	9	906671	78081	72022	1.97	1.58	0.79
	10	6676276	93358	346917	1.87	1.50	0.75
2	11	937903	13769	-	-	-	-
	12	2791827	16562	672002	1.31	1.31	0.65
	13	1171319	59082	-	0.45	0.45	0.22
	14	3324891	56542	-	0.64	0.64	0.32
	15	1946052	39456	-	1.16	1.16	0.58
3	16	11458684	41209	-	-	-	-
	17	2969551	18632	-	-	-	-
	18	2940302	177325	334615	2.19	2.19	1.10

A espessura corrigida se refere ao valor final obtido, que garante a igualdade do volume total com o volume calculado por trechos.

O volume total sedimentado por trecho está apresentado na Tabela 5.9. O volume total sedimentado na bacia do rio Sesmaria foi estimado em aproximadamente 6×10^6 m³.

Tabela 5.9: Volume sedimentado por trecho.

Trecho	Volume total (m³)
1	5729721.86
2	129921.85
3	388669.22

O perfil do rio no passado, o perfil do rio atual e o perfil do vale atual estão apresentados na Figura 5.7. O perfil atual do vale foi obtido através do uso do MDE da bacia do rio Sesmaria.

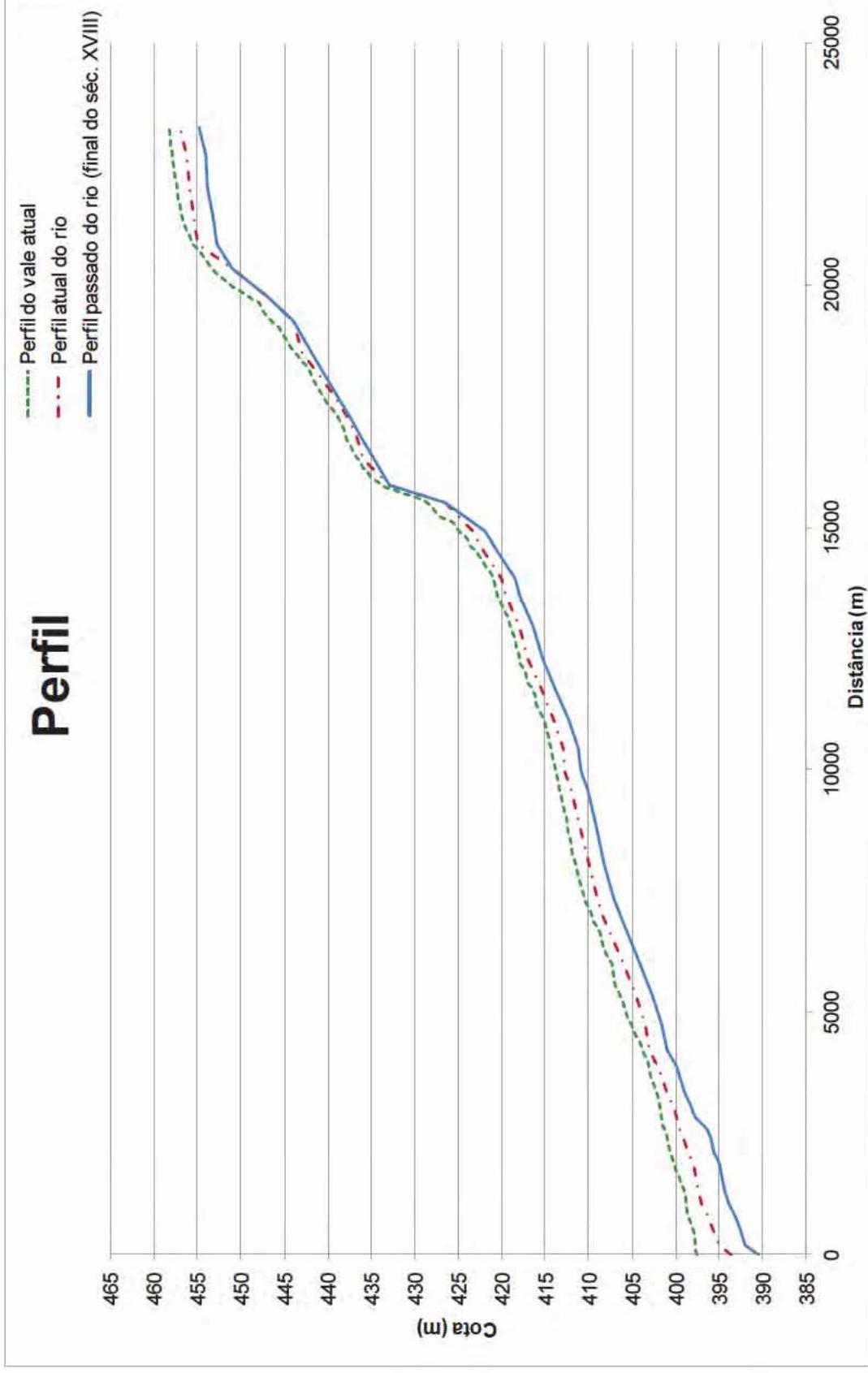


Figura 5.7: Perfil atual do rio Sesmaria, perfil atual do vale e perfil anterior ao desmatamento.

Perda de solo por erosão hídrica – RUSLE

Para cada trecho geomorfológico estimou-se a RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Neste estudo a RUSLE foi estimada para o período pré-desmatamento e para o período atual, como pode ser visto na Tabela 5.10. Para o período anterior ao desmatamento, considerou-se que toda a região era ocupada por floresta. Os valores encontrados confirmam que a retirada da mata nativa da bacia aumentou a perda de solo. A perda de solo calculada com a RUSLE, para o período, ficou próxima dos valores encontrados com a taxa de sedimentação calculada por DANTAS (1995). Com a RUSLE, para toda a área de planícies do rio Sesmaria, obteve-se um total de 14×10^4 ton/ano e com a taxa de sedimentação para a mesma área obteve-se um total de 12×10^4 ton/ano.

Tabela 5.10: Valores encontrados para a perda anual de solo para o período pré-desmatamento e para o período atual.

Trecho	A (ton/ha/ano) - Período anterior	A (ton/ha/ano) - Período atual
1	2.94	5.88
2	3.40	6.79
3	1.81	3.61
4	7.68	15.35
5	11.32	22.64
6	14.37	28.75
7	16.49	32.98
8	19.36	38.72
9	14.98	29.96
10	14.77	29.55
11	17.44	34.88
12	18.69	37.39
13	25.49	50.97
14	25.33	50.65
15	25.31	25.31
16	20.19	20.19
17	13.72	27.45
18	24.24	48.48
Total	277.54	509.57

Modificações nas Vazões Líquida e Sólida

A partir das estimativas realizadas para o comportamento da bacia, no que diz respeito à descarga sólida, é possível concluir que houve um aumento considerável no aporte de sedimentos, em função da mudança no uso do solo, sem o manejo adequado

A fim de estimar a mudança ocorrida na vazão líquida atual em relação à anterior, foi feito o cálculo do *runoff* ponderado. O coeficiente de *runoff* utilizado para o período anterior ao desmatamento foi de 0.15 para toda a bacia e o coeficiente atual variou para as áreas urbanas (0.75), área rural modificada com vegetação mais densa (0.25-0.3) e área rural com gramínea (0.45). O *runoff* ponderado para o período atual foi de 0.31 e para o período anterior foi de 0.15, o que indica que a vazão atual é provavelmente cerca de duas vezes maior que a anterior.

Todo esse incremento na vazão e no volume de sedimentos produzidos na bacia do rio Sesmaria provocou uma série de mudanças na morfologia do rio, que ainda hoje parece tentar alcançar um novo equilíbrio. A partir de estudos realizados por SCHUMM (1977) e LANE (1955) e do Método VALURI, é possível entender a dinâmica do rio e também estimar como ele está se comportando e como irá se comportar no futuro.

Relações de Schumm

Segundo as relações de Schumm o aumento da vazão líquida gera: aumento da largura, aumento da profundidade, aumento do comprimento do meandro, diminuição da declividade, diminuição da sinuosidade. O aumento da vazão sólida provoca: aumento da largura, diminuição da profundidade, aumento do comprimento do meandro, aumento da declividade, diminuição da sinuosidade.

No rio Sesmaria concluiu-se que houve tanto o aumento da vazão sólida quanto da vazão líquida o que produz canais mais largos, menos sinuosos e com maior comprimento de meandro. A tendência para as variações de profundidade e de declividade não são claramente definidas.

Balança de Lane

Lane concluiu que um canal poderia se manter em equilíbrio dinâmico por alterações de equilíbrio na carga de sedimentos e no tamanho dos sedimentos compensando alterações na descarga líquida e na declividade do rio, conforme apresentado no Capítulo 2, item 2.2.

As relações de Lane indicam que a vazão líquida está diretamente relacionada à carga de material do leito e o tamanho do grão e inversamente relacionado à declividade. Considerando que a declividade sofre pequenas variações, mal definidas, segundo as relações de Schumm discutidas acima, essas variações de vazão líquida deveriam ser compensadas por uma carga maior de sedimentos mais grossos sendo transportados pelo rio, segundo interpretação da balança de Lane.

5.1.2 Teoria interpretativa

A bacia hidrográfica do rio Sesmaria, assim como todo o Médio Vale do rio Paraíba do Sul, passou por transformações em sua paisagem que acabaram por modificar a morfologia do rio. Essas transformações foram provocadas por dois eventos erosivo-deposicionais, sendo o primeiro o evento natural da transição climática ocorrido no limite Pleistoceno-Holoceno e o segundo um evento que foi consequência da intervenção antropogênica no ambiente, o desmatamento da floresta nativa e a implantação do plantio do café. Estes dois eventos podem ser facilmente distinguíveis na paisagem, devido ao fato de que o evento mais recente foi registrado nos depósitos de planície de inundação, e o mais antigo, registrado nos depósitos de terraços fluviais (DANTAS, 1995).

A derrubada da cobertura vegetal nativa de Mata Atlântica causou quebra no equilíbrio natural, que a região experimentou após a instalação da floresta úmida, constituindo o primeiro passo para o desencadeamento dos processos erosivos da bacia. Com a destruição da mata nativa da região houve um aumento da carga de sedimentos que foi depositada nos fundos dos vales, causando a elevação do leito do rio e formando a atual planície de inundação.

O cultivo extensivo do café, a partir do início do século XIX, e a consequente compactação do solo interferiram na capacidade do solo de regular o fluxo de água na paisagem, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a capacidade de retenção de água pelos solos.

A remoção da vegetação das margens do rio, das planícies de inundação e das encostas normalmente entra em conflito com as funções hidrológicas e geomorfológicas dos corredores fluviais. Esses distúrbios podem resultar em redução da infiltração, aumento do escoamento superficial, aumento da erosão das margens, voçorocas, canais instáveis e habitat prejudicado.

Com a decadência do café, no fim do século XIX e a prática da pecuária, em grande parte extensiva, as condições de erosão se agravaram, em função da compactação do solo efetuada pelo pisoteio do gado, dificultando a percolação da água e favorecendo ainda mais o escoamento superficial.

O aumento do escoamento superficial devido à ocupação da área aumenta a vazão lançada no curso de água e, portanto, a carga detrítica do próprio corpo de água obtida pelo processo erosivo das margens e do leito.

Com o aumento da vazão líquida em cerca de duas vezes, valor estimado através do coeficiente de *runoff* médio atual da bacia e o coeficiente de *runoff* médio do passado,

e o aumento da vazão sólida, a tendência observada é um aumento da intensidade das modificações morfométricas, ou seja, modificações na forma do rio em seção transversal, em planta, e em perfil longitudinal; conseqüentemente, essa mudança de comportamento, pode aumentar a incidência de inundações na cidade de Resende e a erosão das margens.

Ao analisar imagens do rio Sesmaria de 2003 e de 2010, percebe-se que houve um alargamento da calha do rio nos últimos anos (Tabela 5.5), o que coaduna com o aumento nas vazão líquida e sólida, que também se mostra nos registros frequentes de inundação da cidade de Resende, em sua foz.

Este alargamento foi, em grande parte, provocado pelas cheias que ocorreram no rio Sesmaria nos últimos anos. A força da água chegou a comprometer duas pontes e o muro da garagem de um prédio que estava localizado às margens do rio.

A Figura 5.8 apresenta as seções levantadas na estação Sesmaria pelo laboratório GEOHECO, entre os meses de outubro de 2008 a novembro de 2009. É possível observar que houve grande mobilidade do leito do rio neste período. Pode-se perceber que o rio apresenta a tendência de alargamento nesta seção.

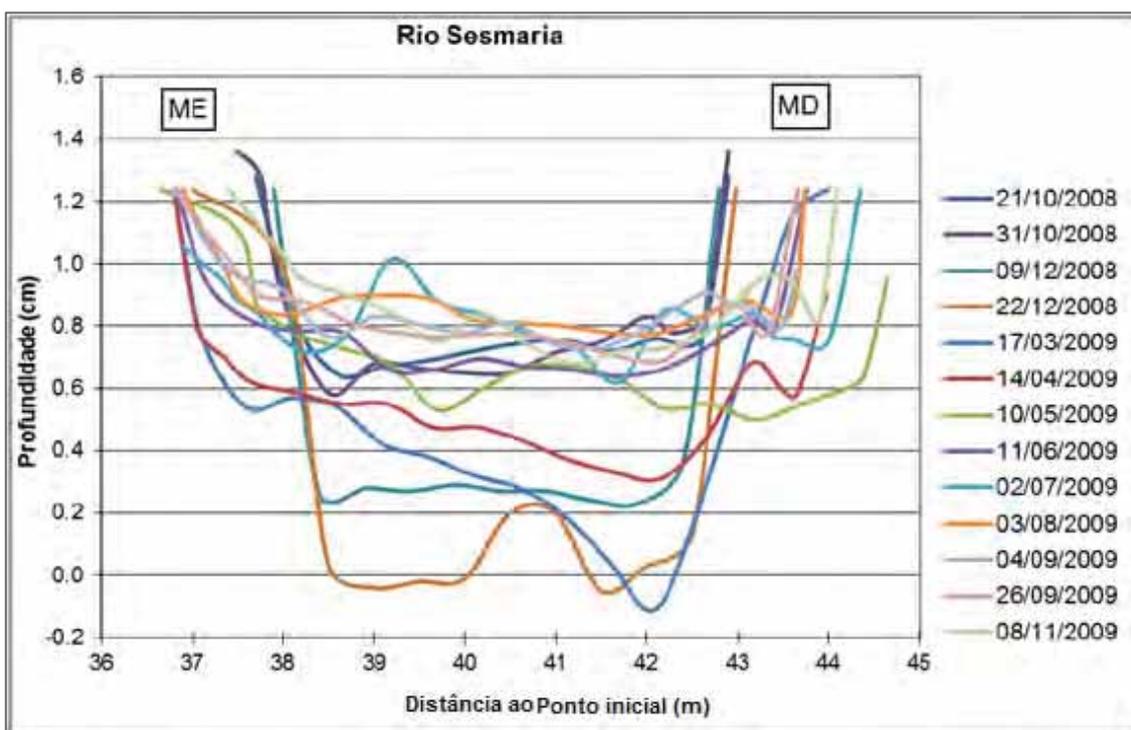


Figura 5.8: Seções transversais da estação Sesmaria do Laboratório GEOHECO. Fonte: ABDALAD, 2011.

A teoria interpretativa desenvolvida aqui, a partir da metodologia VALURI, recai em certa zona de possibilidades, ou seja, busca-se chegar a uma teoria possível e razoavelmente coerente (embora sem ter certeza absoluta), de forma que ela não

possa ser rejeitada. Ou seja, no conjunto de interpretações realizadas, com poucas informações, não se procura estabelecer a “aceitação da teoria proposta com certeza”, mas sim uma “não rejeição com certeza”. Essa teoria é postulada para que ajude a entender a história de degradação do rio e permita introduzir uma análise coerente de causa e efeito que norteie intervenções no sentido da recuperação efetiva do rio, de forma econômica.

Dessa forma, a teoria postulada propõe que o rio Sesmaria sofreu um forte incremento de vazões sólidas, pela erosão da bacia, após a retirada da mata atlântica no ciclo do café, bem como sofreu também um incremento de vazões líquidas, pelas alterações de cobertura vegetal da bacia. Foram feitas estimativas de que as vazões líquidas dobraram e o mesmo aconteceu com as vazões sólidas. A consideração destas duas avaliações simples leva a interpretação de que o rio está em processo de alargamento, sem ser possível apontar uma tendência clara associada às suas profundidades.

Essa teoria de alargamento é reforçada, a partir de alguns fortes indícios encontrados:

- as inspeções de campo mostram que é muito frequente encontrar margens verticalizadas por desmoronamentos ocorridos por erosão da base destas (Figura 5.9). Há trechos com longas fendas longitudinais associadas ao deslocamento da margem pelo próprio peso, após terem sido descalçadas por baixo. Essa erosão de base traz uma outra pista importante: vazões mais baixas e mais frequentes vêm trabalhando o rio. Isso é coerente com a verificação de que a vazão efetiva é menor que a do tempo de retorno de 1 ano.

- além disso, considerando as seções de *bankfull* que foram determinadas, com as observações de campo (supondo que estas estão certas, mas sabendo que alguns trechos foram apenas um resultado de estimativas), percebe-se que a vazão de *bankfull* também seria menor do que a do tempo de retorno de 1 ano. Isso poderia levar à suposição de que a seção de hoje é menor do que aquela que seria necessária para o funcionamento regular do rio, e este estaria redesenhando e recuperando espaço em calha. Neste caso, a suposição de erosão para ampliação de calha, e preferencialmente nas margens, devido ao tipo de sedimentos, reforçaria a interpretação de calha alargando e rio em processo de ajuste.



Figura 5.9: Imagem do solapamento da margem esquerda do rio Sesmaria.

Modificações no uso do solo e a tendência de crescimento descontrolado são uma preocupação, especialmente porque eles podem causar mudanças rápidas na entrega de águas pluviais para o sistema fluvial, alterando assim os padrões hidrológicos básicos que determinam a configuração do rio e a distribuição da comunidade vegetal. Além disso, o desenvolvimento futuro pode influenciar no que o corredor fluvial poderá realizar, em termos de processamento ou armazenamento de enchentes ou de nutrientes, ou no que diz respeito ao fornecimento de habitat aos animais selvagens, assim como, oportunidades de recreação para a população.

5.1.1 Reconstrução do passado a partir da teoria interpretativa

Através de pesquisas e fatos históricos sabe-se que aquela região era totalmente ocupada por floresta atlântica e não havia, até finais do século XVIII, ocupação urbana. A região era ocupada apenas por índios.

A teoria interpretativa permite inferir que, provavelmente, com a bacia coberta por uma densa mata virgem, a vazão líquida era menor, pois havia menor escoamento superficial, assim como a vazão sólida, pois provavelmente não havia erosão significativa nas encostas e o rio estava em equilíbrio hidrossedimentológico.

Segundo as relações de Schumm, menores vazões líquidas geram menores larguras, menores profundidades, menor comprimento de meandro, maior declividade e maior sinuosidade. Menores vazões sólidas geram menores larguras, maiores

profundidades, menor comprimento de meandro, menor declividade e maior sinuosidade.

Uma redução de ambas as vazões produz, então, canais mais estreitos com menor comprimento de meandro, e, portanto mais sinuosos. Não são claramente definidas as tendências para as variações de profundidade e declividade.

5.1.2 Previsão de evolução futura a partir da situação atual

Não havendo mudanças na situação atual o rio Sesmaria vai continuar erodindo suas margens e alargando sua calha, até vir, provavelmente, a ocupar a planície de inundação. O rio provavelmente ficará mais raso, devido ao assoreamento do fundo, e a incidência de enchentes será maior.

Com eventos de chuva maiores o rio poderá erodir os muros de contenção construídos recentemente e provocar danos ainda maiores à população.

5.2 Aplicação do modelo hidrodinâmico

Para a aplicação do MODCEL seguiu-se as etapas apresentadas no Capítulo Metodologia. (item 5.3)

Após a divisão em células foram elaborados os arquivos necessários para o funcionamento do modelo. A bacia do rio Sesmaria foi dividida em 425 células, sendo 83 células de rio, 205 células de planície e 137 células de encosta.

Calibração

Para a calibração do modelo utilizou-se a metodologia exposta no capítulo Metodologia, item 5.2.3.

A chuva que provocou inundação na cidade de Resende ocorreu nos dias 14 e 15 de dezembro de 2010. Com base nessa informação foi calculada a chuva ponderada, com o método dos polígonos de Thiessen, com a lâmina de precipitação deste evento para todas as estações do GEOHECO. A ponderação das precipitações deste evento está apresentada na Tabela 5.11. O total de precipitação média no dia 14 foi de 43.9 mm e no dia 15 foi de 72.92 mm. Essa chuva foi inserida do MODCEL de modo uniforme, por dia, dividida em 24 intervalos. Os primeiros 12 intervalos equivalentes à chuva do dia 14 de dezembro e os outros 12 intervalos equivalentes à chuva do dia 15 de dezembro.

Tabela 5.11: Precipitação ponderada calculada pelo método dos polígonos de Thiessen para o evento que provocou a enchente de dezembro de 2010 em Resende.

Estação	Precipitação (14/12/2010)	Precipitação (15/12/2010)	Fração em área do polígono	Precipitação ponderada (14/12/2010)	Precipitação ponderada (15/12/2010)
Sesmaria	43.80	50	0.25	11.11	12.59
São João	45.84	51	0.05	2.34	2.60
Monte Alegre	56.02	56	0.07	4.03	4.03
Feio	44.56	62	0.06	2.88	3.99
Formoso	50.93	70	0.24	12.11	16.65
Barra	35.63	103	0.32	11.44	33.07

Foi feita uma pesquisa nos principais sítios eletrônicos de notícias da região Sul Fluminense sobre os níveis d'água atingidos nos bairros inundados e durante algumas visitas de campo foram medidas marcas nos muros das casas e coletadas informações com moradores. Esses níveis foram comparados com os resultados de nível d'água obtidos através da modelagem e foram feitos ajustes no coeficiente de vertimento e em ligações entre células. Os valores obtidos na pesquisa e com o MODCEL estão apresentados na Tabela 5.12. Não foi possível obter o nível d'água em todos os bairros alagados, e, portanto, uma outra forma de validar o modelo foi verificar se os bairros alagados na realidade também foram alagados no modelo hidrodinâmico. Observou-se grande semelhança entre os valores de nível d'água e na extensão das áreas de alagamento. A mancha de inundação da área urbana da bacia do rio Sesmaria para este evento está apresentada na Figura 5.10.

Tabela 5.12: Comparação entre os níveis d'água reais e os obtidos através do MODCEL na enchente do rio Sesmaria em Resende.

Localidade	Profundidade d'água real (m)	Profundidade d'água MODCEL (m)
Condomínio do Tácito	0.90	0.89
Rua Rodolfo Pellini Filho	1.30	1.27
Parque Ipiranga	1.00	0.90
Rua Sesmaria	1.30	1.40
Centro	0.90	0.78

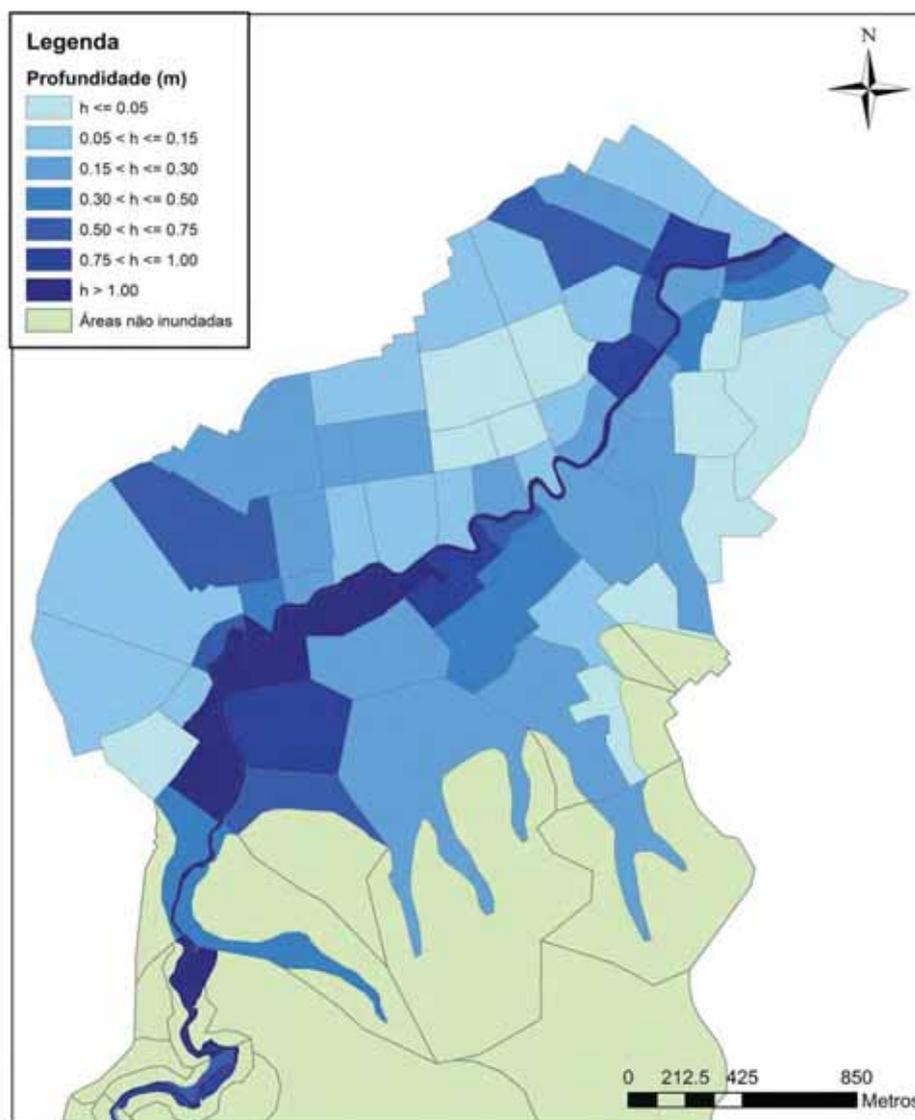


Figura 5.10: Mancha de inundação da área urbana para o evento de dezembro de 2010.

Precipitação

Foram geradas chuvas de projeto, com o uso do *software* HIDRO-FLU; para tempos de recorrência (TR) igual a 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Para isso foi necessário informar ao HIDRO-FLU os dados da bacia do rio Sesmaria (Tabela 5.13), determinar o tempo de concentração, definir o tempo de duração da chuva e o tipo de equação de chuvas intensas a ser utilizado. Para este caso de estudo o tempo de concentração adotado foi de 660 minutos, calculado através da fórmula de Kirpisch, o tempo de duração da chuva foi definido como sendo igual ao tempo de concentração, a equação de chuvas intensas utilizada foi a de Otto Pfafstetter com os dados do posto pluviométrico de Resende. A chuva foi dividida em intervalos de 30 min.

Tabela 5.13: Características físicas da bacia hidrográfica do rio Sesmaria informadas ao HIDRO-FLU.

Dados de entrada do HIDRO-FLU	
Comprimento do rio principal	38 km
Área de drenagem da bacia	149 km ²
Declividade média	0.00763 m/m
Desnível entre o ponto mais elevado e o exutório	1200 m
Coefficiente de Cobertura Vegetal da bacia	0.97

A chuva calculada para cada tempo de recorrência está apresentada na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Precipitação determinada para cada TR.

TR	Precipitação (mm)
2	70.1
5	85.6
10	98.3
25	116.8
50	132.1
100	149.0

Parâmetros da bacia hidrográfica

Os coeficientes são fundamentais na representação do terreno e das características da bacia hidrográfica para o modelo.

Coeficiente de *runoff*

Para a bacia do rio Sesmaria o coeficiente de *runoff* foi definido em função das características de uso e cobertura do solo, observados a partir de imagens de satélite e vistas de campo. Os valores adotados foram definidos com base nos valores apresentados por WILKEN (1978) como mostra a Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Valores do coeficiente de *runoff* segundo WILKEN (1978).

Zonas	Runoff
Edificação muito densa: Partes centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0.7 - 0.95
Edificação não muito densa: Partes adjacentes ao centro, de monos densidades de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0.6 - 0.7
Edificação com poucas superfícies livres: Partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas.	0.5 - 0.6
Edificação com muitas superfícies livres: Partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0.25 - 0.5
Subúrbios com alguma edificação: Partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção.	0.1 - 0.25
Matas parques e campos de esporte: Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esportes sem pavimentação.	0.05 - 0.2

Coeficiente de vertimento

O coeficiente de vertimento está presente nas ligações entre as células de rio e as planícies que o margeiam e entre as demais ligações de vertimento. Foram escolhidos seguindo as recomendações do modelo e definidos após o processo de calibração. Para este estudo foi adotado o valor de 0.05.

Condições de contorno

As condições de contorno nos afluentes foram vazões de base determinadas no período de estiagem (julho e setembro de 2008) em medições realizadas pelo laboratório GEOHECO em determinadas seções destes rios. A Tabela 5.16 apresenta esses valores.

Tabela 5.16: Dados das condições de contorno dos afluentes.

Rio	Vazão de base (m ³ /s)
São João	0.115
Feio	0.391
Formoso	0.723

Na foz do rio Sesmaria foram introduzidas duas condições de contorno referentes ao rio Paraíba do Sul, uma de vazão e uma de cota. Foram utilizados os valores máximos de vazão e cota sugeridos para o trecho de Resende, segundo as Regras de Operação para Controle de Cheias da ONS (RIBEIRO e NICK, 2011). De acordo com a ONS, a vazão máxima defluente da barragem de Funil que não traz danos a cidade

de Resende é de 850 m³/s; esta vazão corresponde à cota de 390.3 metros nas imediações do rio Sesmaria.

5.3 Diagnóstico quantitativo atual do quadro de inundação e criação dos mapas de alagamento

Foi simulada a situação atual da bacia do rio Sesmaria, com todas as intervenções no rio, como pontes e muros de contenção.

A partir da classificação de WILKEN (1978) e de acordo com as características atuais da bacia do rio Sesmaria foram adotados os valores apresentados na Tabela 5.17 para o coeficiente de *runoff*.

Tabela 5.17: Coeficientes de *runoff* adotados para a situação atual, baseados em WILKEN (1978) e na calibração.

Características da ocupação	<i>Runoff</i>
Planície urbanizada	0.75
Faixa marginal sem vegetação ou coberta por gramínea	0.45
Faixa marginal com vegetação	0.30
Encosta vegetada	0.30
Encosta coberta por gramínea ou sem vegetação	0.45

Os coeficientes de Manning usados para as ligações de canal entre as células de rio na situação atual estão apresentados na Tabela 5.18 e foram obtidos utilizando o método descrito no capítulo Metodologia baseado no livro de Ven Te Chow e confirmados na calibração. Para as ligações entre células de planícies na área rural utilizou-se coeficiente de Manning igual a 0.06, entre as células de encosta e as de planície utilizou-se 0.08 e na área urbana utilizou-se coeficiente de Manning igual a 0.065.

O cenário atual foi simulado para tempos de recorrência de 2, 10, 25 e 100 anos.

Tabela 5.18: Coeficientes de rugosidade (n = Manning) para as ligações entre células de rio para a situação atual, baseados em CHOW (1959).

Ligação entre células de rio			n	Ligação entre células de rio			n
1000	-	1	0.063	132	-	133	0.044
1	-	2	0.063	133	-	134	0.038
2	-	6	0.064	134	-	135	0.044
6	-	7	0.076	135	-	136	0.044
7	-	8	0.060	136	-	137	0.044
8	-	9	0.064	137	-	138	0.055
9	-	10	0.057	138	-	139	0.049
10	-	11	0.055	139	-	140	0.044
11	-	12	0.043	140	-	141	0.049
12	-	13	0.055	141	-	142	0.049
13	-	14	0.048	142	-	300	0.049
14	-	15	0.055	300	-	301	0.055
15	-	16	0.055	3012	-	301	0.049
16	-	17	0.055	302	-	3012	0.062
17	-	18	0.048	302	-	303	0.055
18	-	19	0.038	303	-	304	0.049
19	-	20	0.038	304	-	305	0.049
20	-	109	0.044	305	-	306	0.049
109	-	110	0.044	306	-	307	0.044
110	-	111	0.055	307	-	308	0.049
111	-	112	0.049	308	-	309	0.052
112	-	113	0.049	309	-	310	0.044
113	-	114	0.044	310	-	311	0.044
114	-	115	0.049	311	-	312	0.044
115	-	116	0.058	312	-	313	0.049
116	-	117	0.038	313	-	314	0.049
117	-	118	0.038	142	-	400	0.044
118	-	119	0.044	400	-	401	0.048
119	-	120	0.044	401	-	402	0.055
120	-	121	0.044	402	-	4034	0.055
121	-	122	0.044	4034	-	405	0.049
122	-	123	0.058	405	-	406	0.058
123	-	124	0.038	406	-	407	0.062
124	-	125	0.038	407	-	408	0.049
125	-	126	0.044	408	-	409	0.049
126	-	127	0.038	409	-	410	0.065
127	-	128	0.038	410	-	411	0.044
128	-	129	0.038	411	-	412	0.055
129	-	130	0.044	412	-	413	0.044
130	-	131	0.044	136	-	200	0.055
131	-	132	0.044	200	-	201	0.055

5.3.1 Discussão dos resultados

A simulação das condições atuais da bacia hidrográfica do rio Sesmaria, considerando as características de uso e ocupação do solo e a topografia existentes, resultaram em uma série de informações de níveis d'água e vazões que permitiram a elaboração de mapas de inundações da bacia para diferentes tempos de recorrência.

O resultado para o tempo de recorrência de 2 anos permitiu a elaboração do mapa da área urbana, apresentado na Figura 5.11. Como pode-se observar, algumas células já alagam com uma chuva frequente na condição atual, apresentando regiões com alagamentos superiores a 1,0 metro.

A mancha de inundação para os tempos de recorrência 2, 10, 25 e 100 estão apresentadas na Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14, respectivamente.

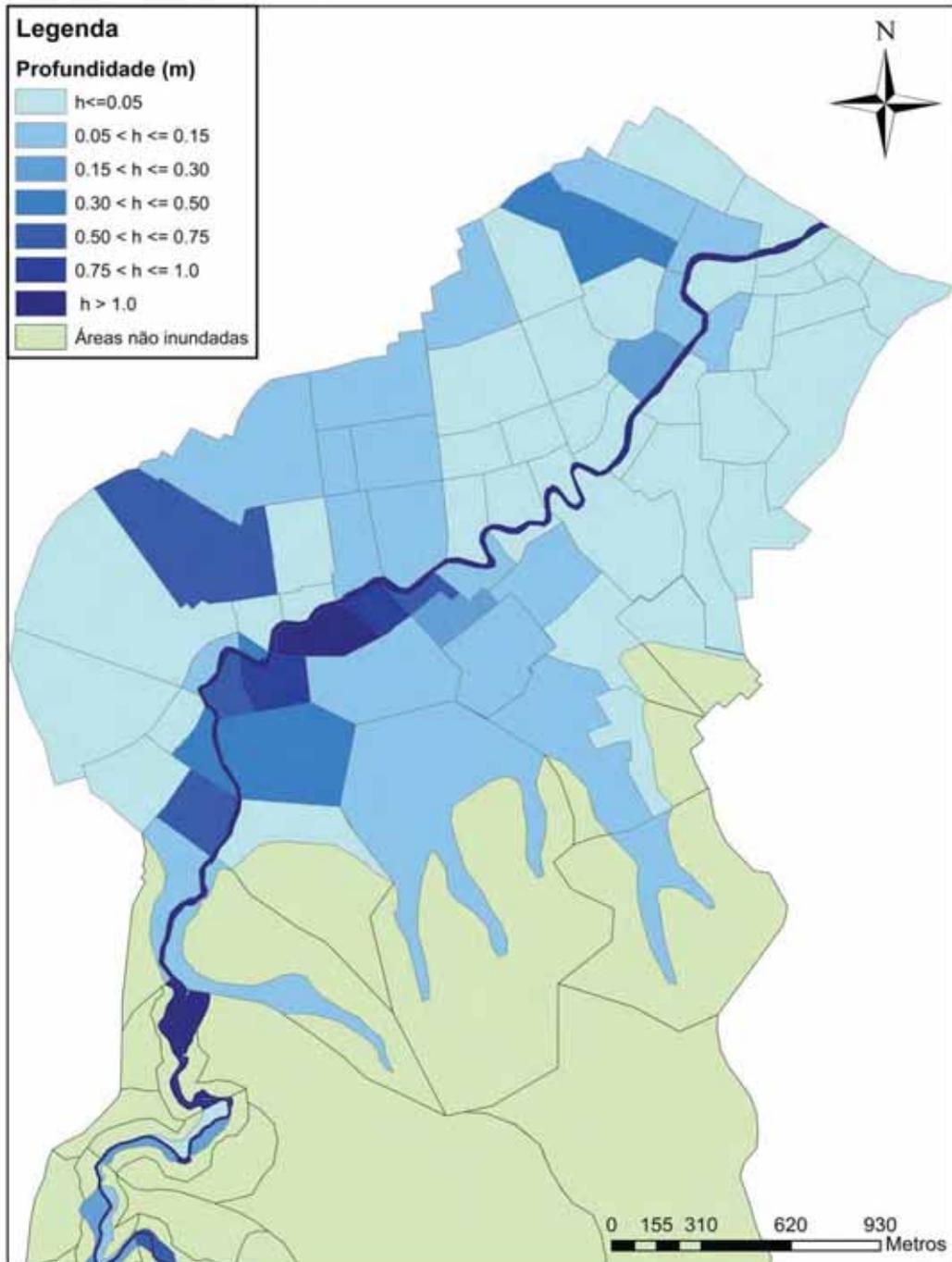


Figura 5.11: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 2 anos nas condições atuais, da área urbana da bacia.

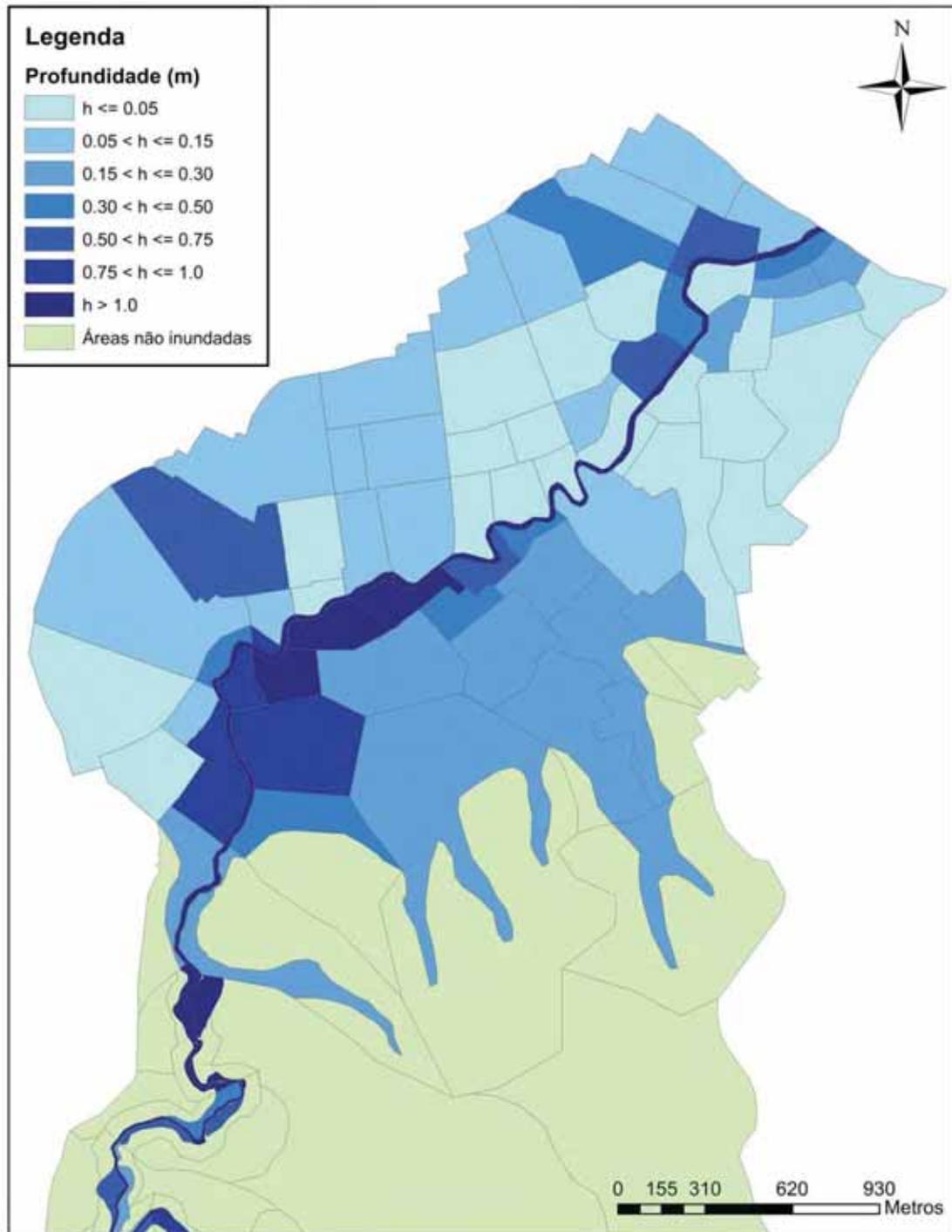


Figura 5.12: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos nas condições atuais, da área urbana da bacia.

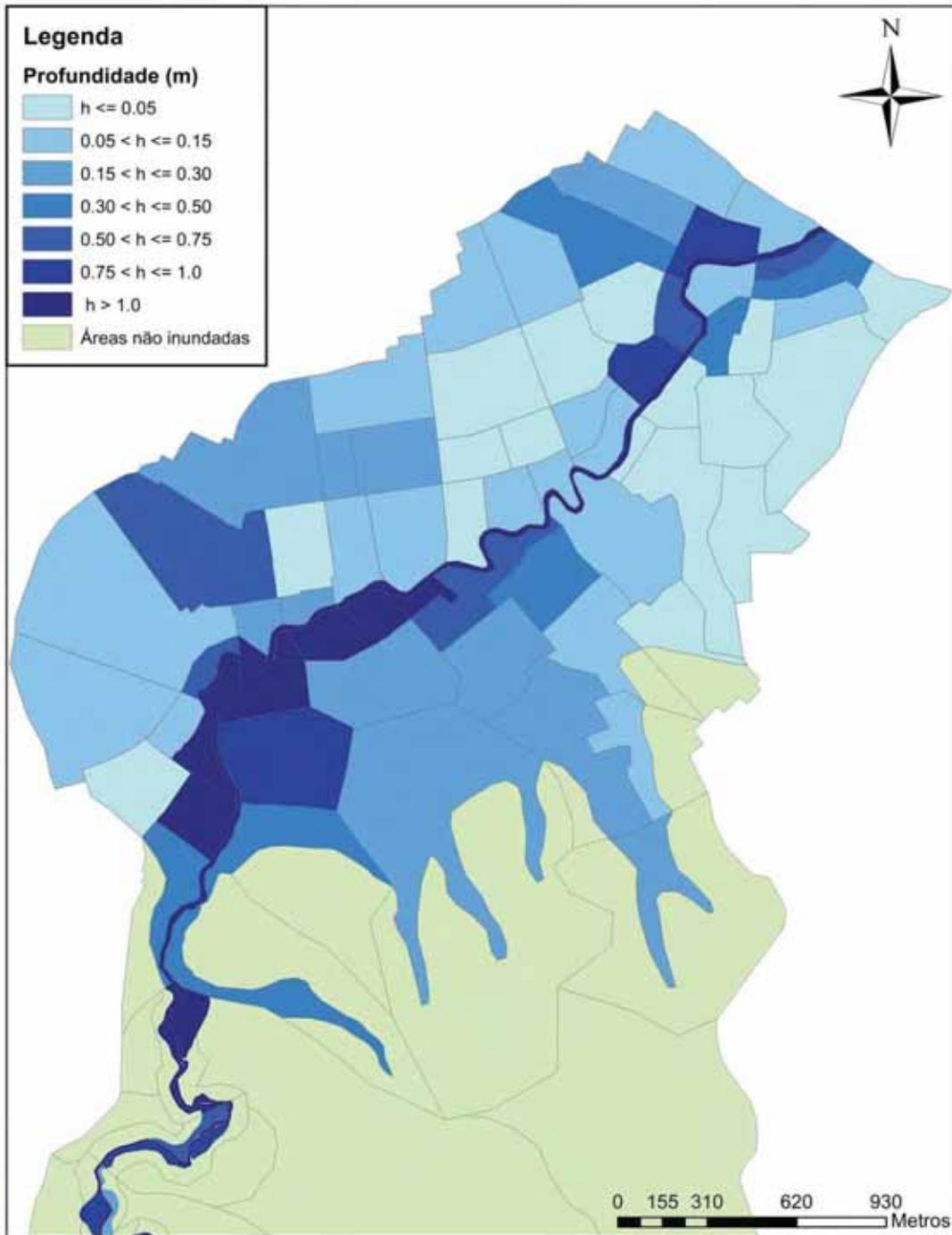


Figura 5.13: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 25 anos nas condições atuais, da área urbana da bacia.

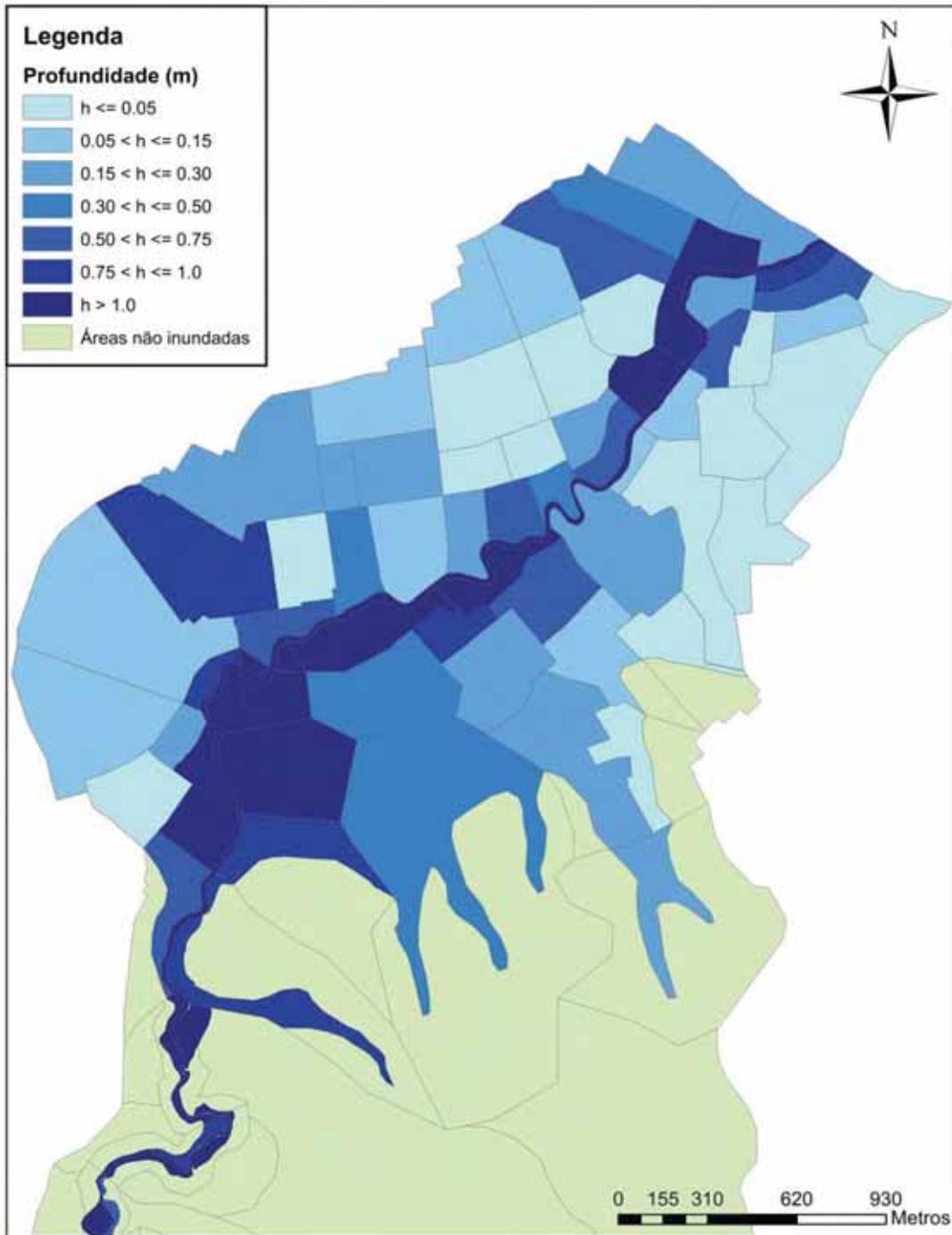


Figura 5.14: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 100 anos nas condições atuais, da área urbana da bacia.

A partir da análise dos mapas de inundação apresentados, observa-se que é crítica a condição da bacia para todos os eventos de chuva simulados, principalmente na área urbana da bacia, próxima à foz do rio Sesmaria, apresentando regiões com alagamentos superiores a 1,0 metro. Torna-se necessário reverter este quadro para que a população tenha maior segurança. Uma alternativa é procurar resgatar

condições mais próximas do comportamento original da bacia, melhorando as condições gerais do rio Sesmaria.

5.4 Reconstrução do quadro de inundações no passado

Neste trabalho, o período considerado como tempo passado faz referência à fase de pré-desmatamento, final do século XVIII.

Para a reconstrução do quadro de inundações no passado buscou-se informações sobre a bacia antes do desmatamento da mata nativa.

A partir da Planta da Cidade de Resende de 1861 (fonte: Biblioteca Nacional - RJ), Mapa do Estado do Rio de Janeiro (1892- Map.9, Gav.1. n.3) obtido no Instituto Histórico Geográfico Brasileiro (IHGB) e de uma fotografia aérea de 1931 da revista A Granja (Número I, Ano II de Setembro de 1931), apresentados, respectivamente, no Apêndice 3, Anexo 1 e Apêndice 3, foi possível observar que o rio Sesmaria, principalmente próximo à sua foz, era mais sinuoso. Em imagens de satélite do aplicativo Google Earth foi possível observar paleo canais a partir de marcas no solo. Através destas observações foi feito um novo desenho do rio, mais sinuoso. Foi calculada também a sinuosidade média do passado a partir do Mapa do Estado (1892), igual a 1.44 e a sinuosidade média da situação atual, igual a 1.35. A relação entre estas duas sinuosidades foi multiplicada pelo comprimento atual de cada célula de rio, para que fosse traduzido para o modelo que no passado a água percorria um caminho maior. Nas células de rio onde foi possível identificar os paleo canais, foi utilizado o comprimento identificado no novo desenho do rio e não se multiplicou pela relação entre a sinuosidade do passado e a atual.

Para traduzir para o modelo a cobertura e uso do solo, toda a bacia teve seu coeficiente de *runoff* alterado para 0.15. Em todas as ligações de planície foram alterados os coeficientes de Manning para 0.18, para representar a presença de vegetação no caminho do escoamento. Nas ligações de canal, os coeficientes de Manning utilizados levaram em consideração a maior sinuosidade, a presença da mata ciliar e a não presença de obras (pontes e muros de contenção) ao longo da extensão do rio Sesmaria. Os valores dos coeficientes de Manning utilizados para as ligações de canal estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Coeficientes de rugosidade (n = Manning) para as ligações de canal para o passado (fim do século XVIII), baseados em CHOW (1959).

Ligação entre células de rio			n	Ligação entre células de rio			n
1000	-	1	0.055	132	-	133	0.055
1	-	2	0.055	133	-	134	0.048
2	-	6	0.055	134	-	135	0.055
6	-	7	0.063	135	-	136	0.055
7	-	8	0.055	136	-	137	0.055
8	-	9	0.055	137	-	138	0.055
9	-	10	0.062	138	-	139	0.062
10	-	11	0.055	139	-	140	0.055
11	-	12	0.049	140	-	141	0.062
12	-	13	0.055	141	-	142	0.062
13	-	14	0.055	142	-	300	0.062
14	-	15	0.055	300	-	301	0.055
15	-	16	0.055	3012	-	301	0.062
16	-	17	0.055	302	-	3012	0.062
17	-	18	0.055	302	-	303	0.055
18	-	19	0.055	303	-	304	0.062
19	-	20	0.055	304	-	305	0.062
20	-	109	0.055	305	-	306	0.062
109	-	110	0.055	306	-	307	0.055
110	-	111	0.055	307	-	308	0.062
111	-	112	0.062	308	-	309	0.063
112	-	113	0.062	309	-	310	0.055
113	-	114	0.055	310	-	311	0.055
114	-	115	0.062	311	-	312	0.055
115	-	116	0.069	312	-	313	0.062
116	-	117	0.048	313	-	314	0.062
117	-	118	0.048	142	-	400	0.055
118	-	119	0.055	400	-	401	0.048
119	-	120	0.055	401	-	402	0.055
120	-	121	0.055	402	-	4034	0.055
121	-	122	0.055	4034	-	405	0.062
122	-	123	0.069	405	-	406	0.069
123	-	124	0.048	406	-	407	0.062
124	-	125	0.048	407	-	408	0.062
125	-	126	0.055	408	-	409	0.062
126	-	127	0.048	409	-	410	0.062
127	-	128	0.048	410	-	411	0.055
128	-	129	0.048	411	-	412	0.055
129	-	130	0.055	412	-	413	0.055
130	-	131	0.055	136	-	200	0.055
131	-	132	0.055	200	-	201	0.055

Utilizou-se o perfil do rio Sesmaria encontrado para o passado a partir de estudo correlato na bacia do rio Bananal para a definição das novas cotas de fundo nos centros de célula do cenário do passado (Capítulo Metodologia, item 5.4.5).

5.4.1 **Discussão dos resultados**

A simulação da bacia nas condições anteriores ao desmatamento da Mata Atlântica e ao processo de sedimentação provocado pelo desmatamento, permitiu a elaboração dos mapas de inundação para o passado. A Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam os mapas para os diferentes tempos de recorrência simulados. É possível observar que não houve extravasamento significativo da calha do rio para nenhum dos tempos de recorrência simulados. As demais áreas com alagamento são áreas baixas e que no passado, provavelmente, eram áreas de charco devido ao lento escoamento e acúmulo de água.

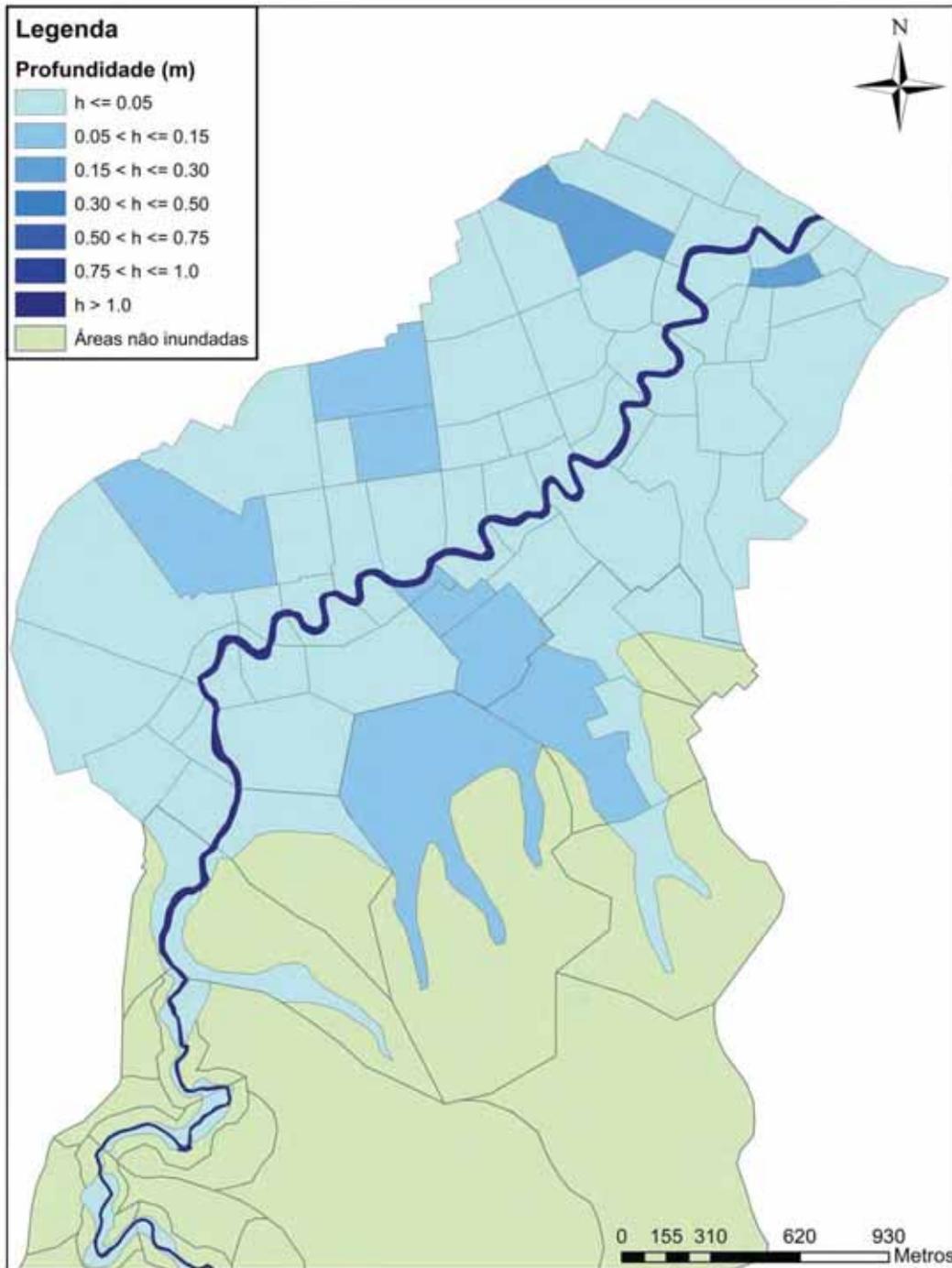


Figura 5.15: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 2 anos nas condições do passado, da área urbana da bacia.

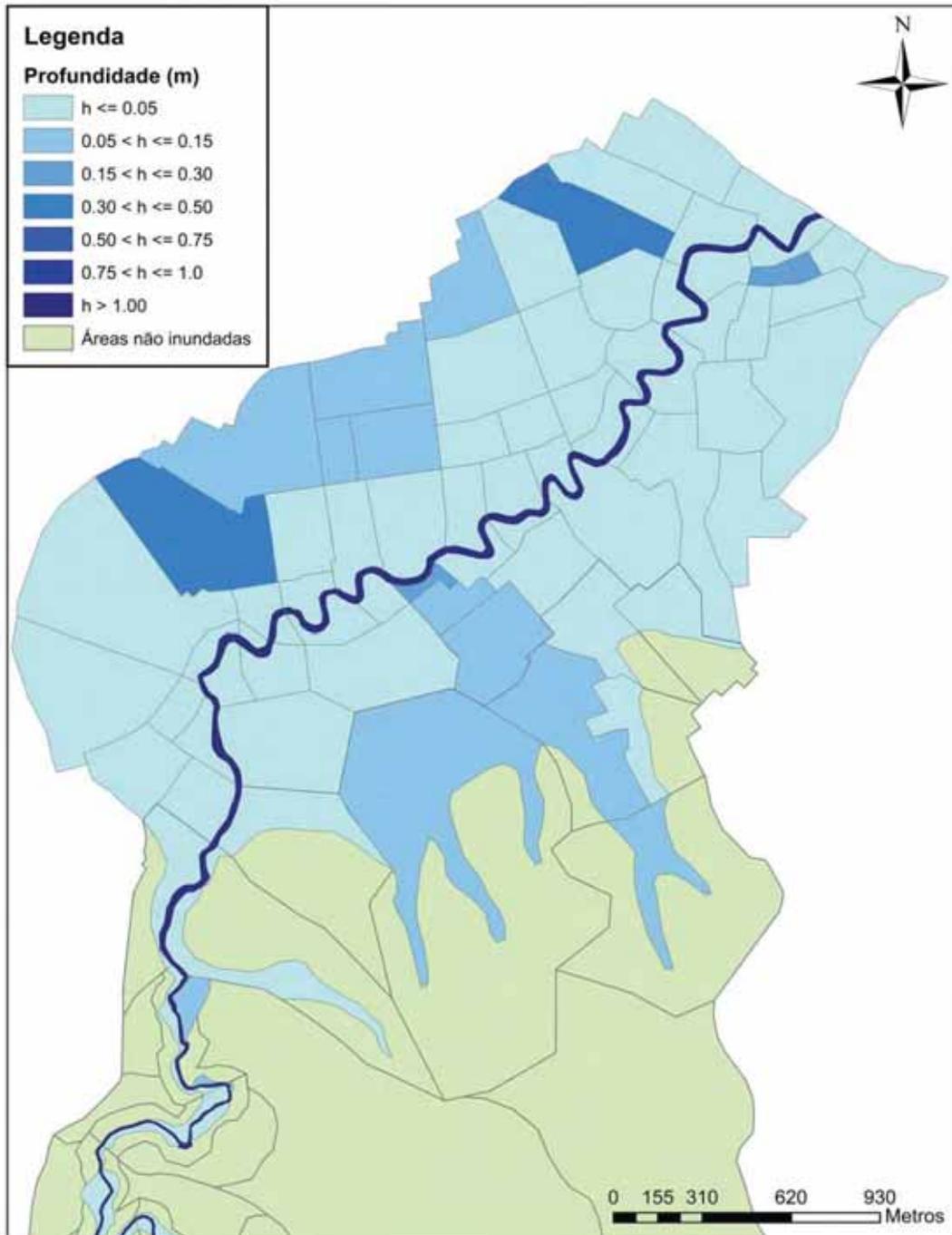


Figura 5.16: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos nas condições do passado, da área urbana da bacia.

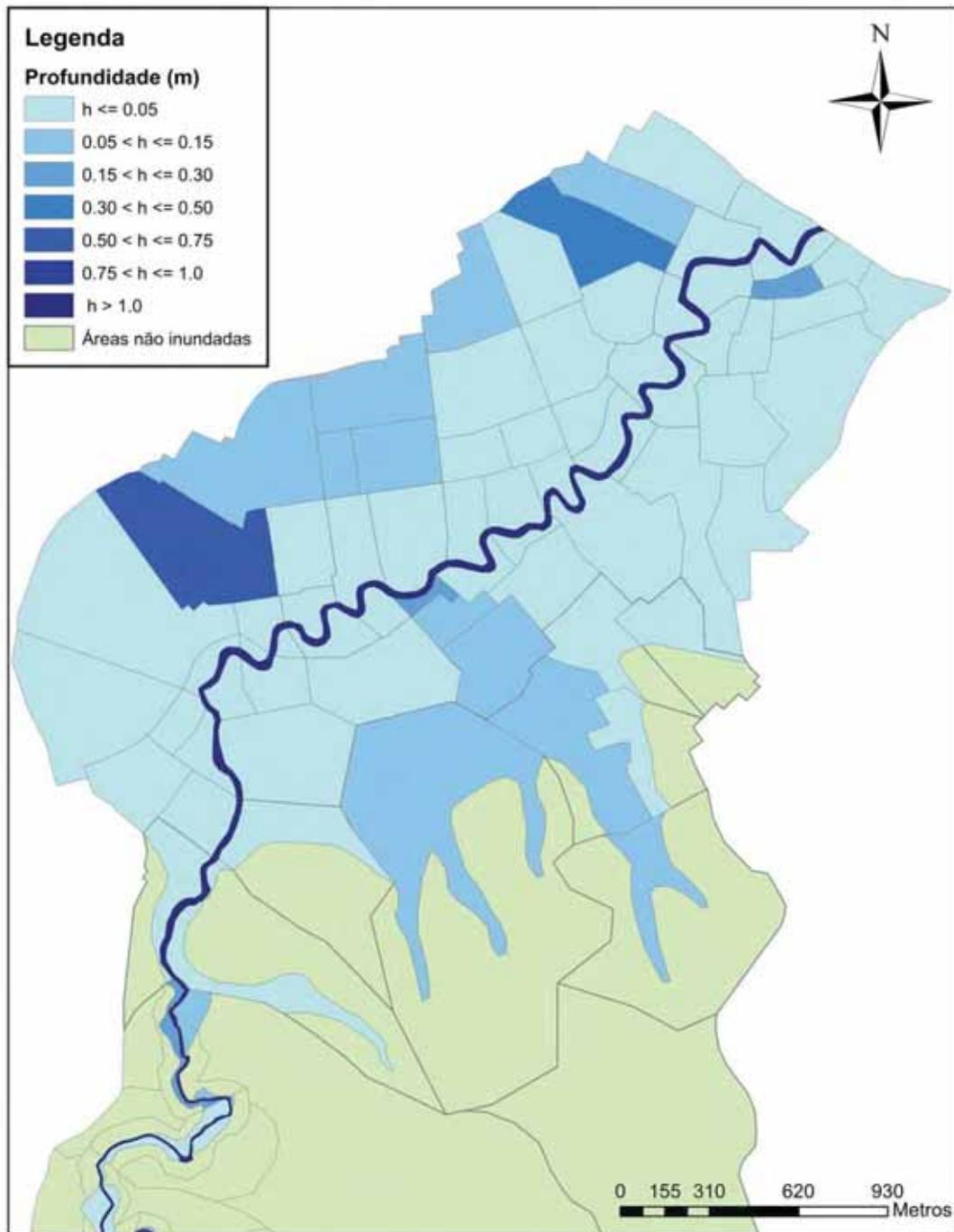


Figura 5.17: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 25 anos nas condições do passado, da área urbana da bacia.

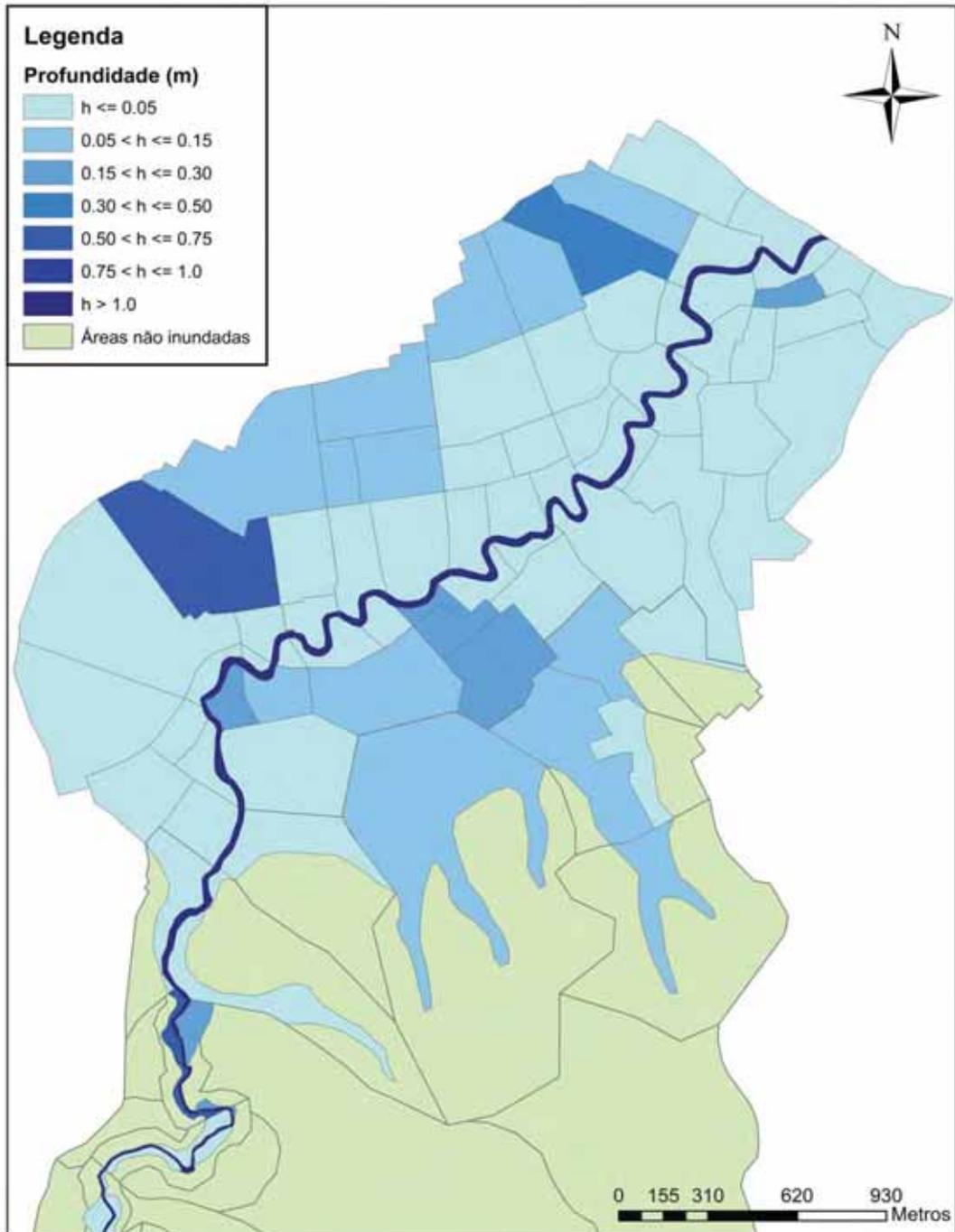


Figura 5.18: Mapa de inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 100 anos nas condições do passado, da área urbana da bacia.

5.5 Simulação da situação de alagamento de Resende, considerando a bacia preservada com o desenho do passado

Neste cenário objetivou-se demonstrar que em igualdade de antropização, ou seja, com a cidade de Resende com as mesmas proporções e com a mesma localização, o rio Sesmaria se comporta pior hoje do que antes do desmatamento das florestas para o cultivo do café.

5.5.1 Caracterização do cenário

Foram feitas simulações hidráulicas com o perfil do rio no passado (mais profundo), com a planície de inundação um pouco mais baixa e a parte rural da bacia toda reflorestada e sem as obras que prejudicam o escoamento.

Os coeficientes na área urbana foram os mesmos utilizados para a situação atual. Na área rural utilizou-se coeficiente de *runoff* igual a 0.15 e coeficiente de Manning nas ligações de planície igual a 0.18. Os coeficientes de Manning utilizados nas ligações de canal estão apresentados na Tabela 5.20. Vale dizer, então, que este é um cenário híbrido, com condições de foz atuais, pela presença da cidade de Resende, mas com a bacia em condições naturais preservadas.

Tabela 5.20: Coeficientes de rugosidade ($n = \text{Manning}$) para o cenário alternativo, baseado em CHOW (1959).

Ligação entre células de rio			n	Ligação entre células de rio			n
1000	-	1	0.063	132	-	133	0.055
1	-	2	0.063	133	-	134	0.048
2	-	6	0.064	134	-	135	0.055
6	-	7	0.076	135	-	136	0.055
7	-	8	0.060	136	-	137	0.055
8	-	9	0.064	137	-	138	0.055
9	-	10	0.057	138	-	139	0.062
10	-	11	0.055	139	-	140	0.055
11	-	12	0.043	140	-	141	0.062
12	-	13	0.055	141	-	142	0.062
13	-	14	0.048	142	-	300	0.062
14	-	15	0.055	300	-	301	0.055
15	-	16	0.055	3012	-	301	0.062
16	-	17	0.055	302	-	3012	0.062
17	-	18	0.048	302	-	303	0.055
18	-	19	0.038	303	-	304	0.062
19	-	20	0.038	304	-	305	0.062
20	-	109	0.044	305	-	306	0.062
109	-	110	0.055	306	-	307	0.055
110	-	111	0.055	307	-	308	0.062
111	-	112	0.062	308	-	309	0.063
112	-	113	0.062	309	-	310	0.055
113	-	114	0.055	310	-	311	0.055
114	-	115	0.062	311	-	312	0.055
115	-	116	0.069	312	-	313	0.062
116	-	117	0.048	313	-	314	0.062
117	-	118	0.048	142	-	400	0.055
118	-	119	0.055	400	-	401	0.048
119	-	120	0.055	401	-	402	0.055
120	-	121	0.055	402	-	4034	0.055
121	-	122	0.055	4034	-	405	0.062
122	-	123	0.069	405	-	406	0.069
123	-	124	0.048	406	-	407	0.062
124	-	125	0.048	407	-	408	0.062
125	-	126	0.055	408	-	409	0.062
126	-	127	0.048	409	-	410	0.062
127	-	128	0.048	410	-	411	0.055
128	-	129	0.048	411	-	412	0.055
129	-	130	0.055	412	-	413	0.055
130	-	131	0.055	136	-	200	0.055
131	-	132	0.055	200	-	201	0.055

5.5.2 Discussão dos resultados

A partir da simulação da bacia com igualdade de antropização, mas com a área rural e a topografia nas condições pré-desmatamento, foram construídos mapas de inundação para tempos de recorrência (TR) de 2, 10, 25 e 100 anos. Os mapas de inundação referentes a estes diferentes cenários hidrológicos estão apresentados na Figura 5.19, Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22, em ordem crescente de TR.

É possível observar que, caso a bacia tivesse sido preservada, a ocorrência de alagamentos seria significativamente menor. Não foi observado extravasamento significativo, como os atuais, em nenhum dos cenários hidrológicos simulados.

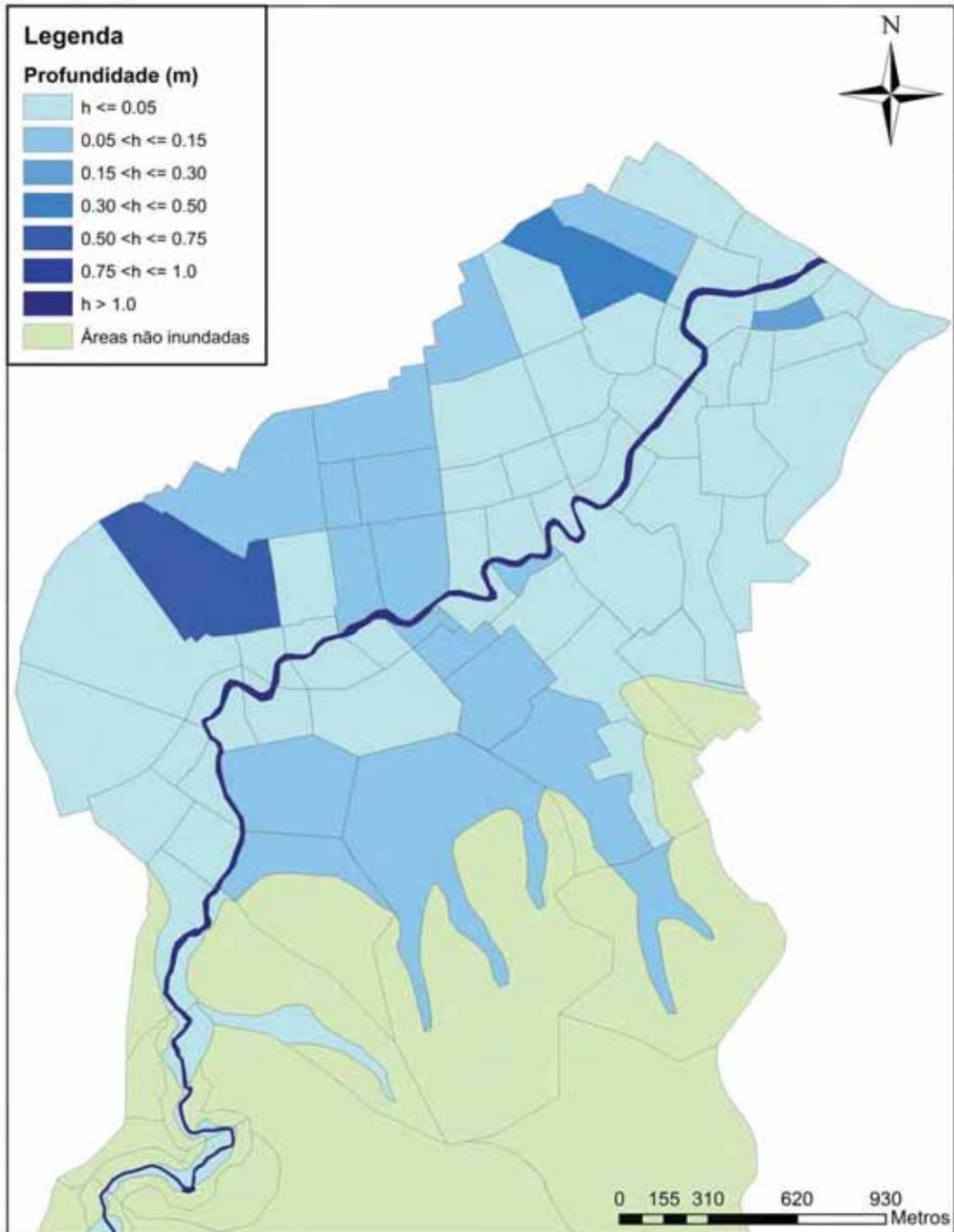


Figura 5.19: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 2 anos nas condições de uso e cobertura da área urbana atuais e da área rural e topografia passadas.

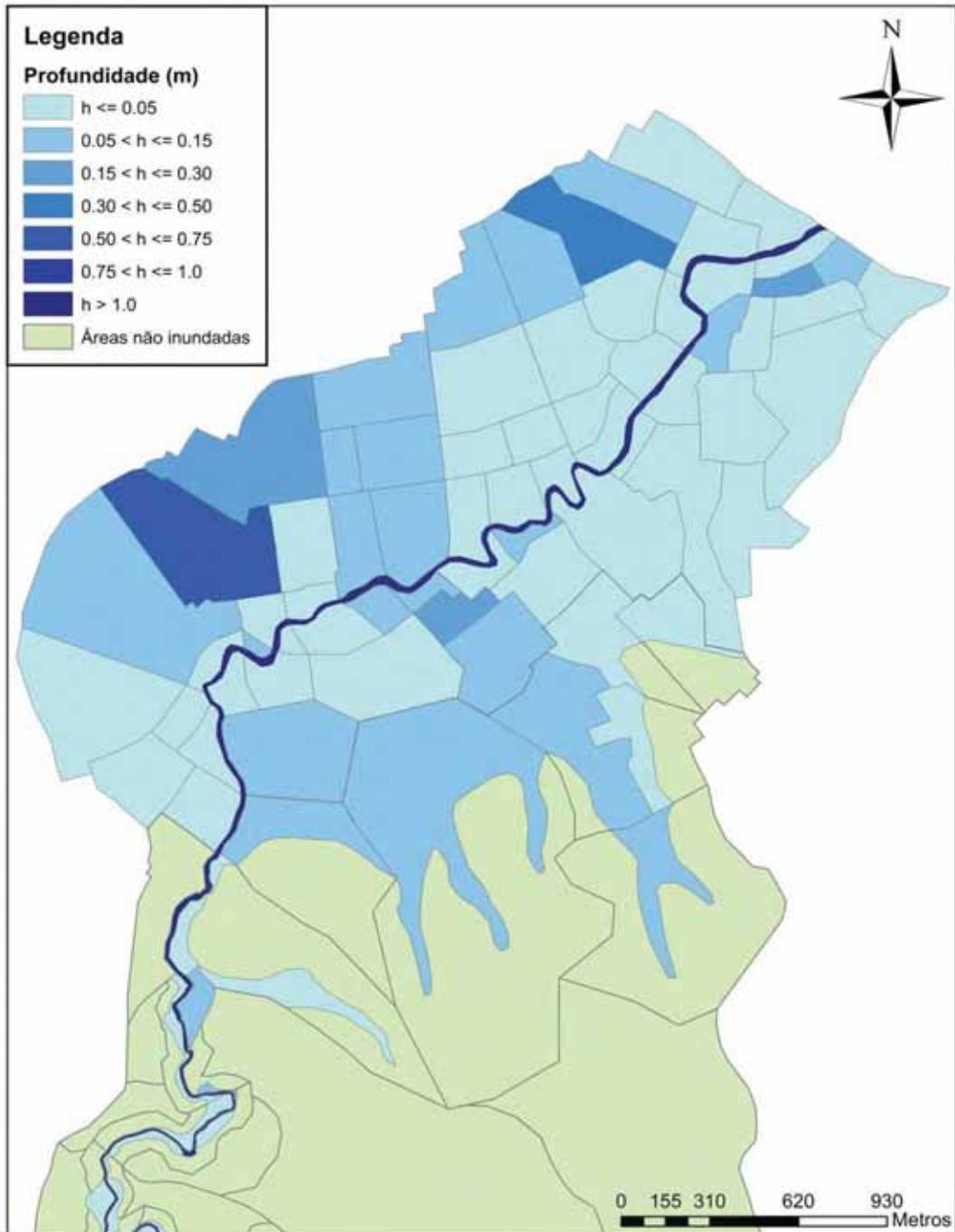


Figura 5.20: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos nas condições de uso e cobertura da área urbana atuais e da área rural e topografia passadas.

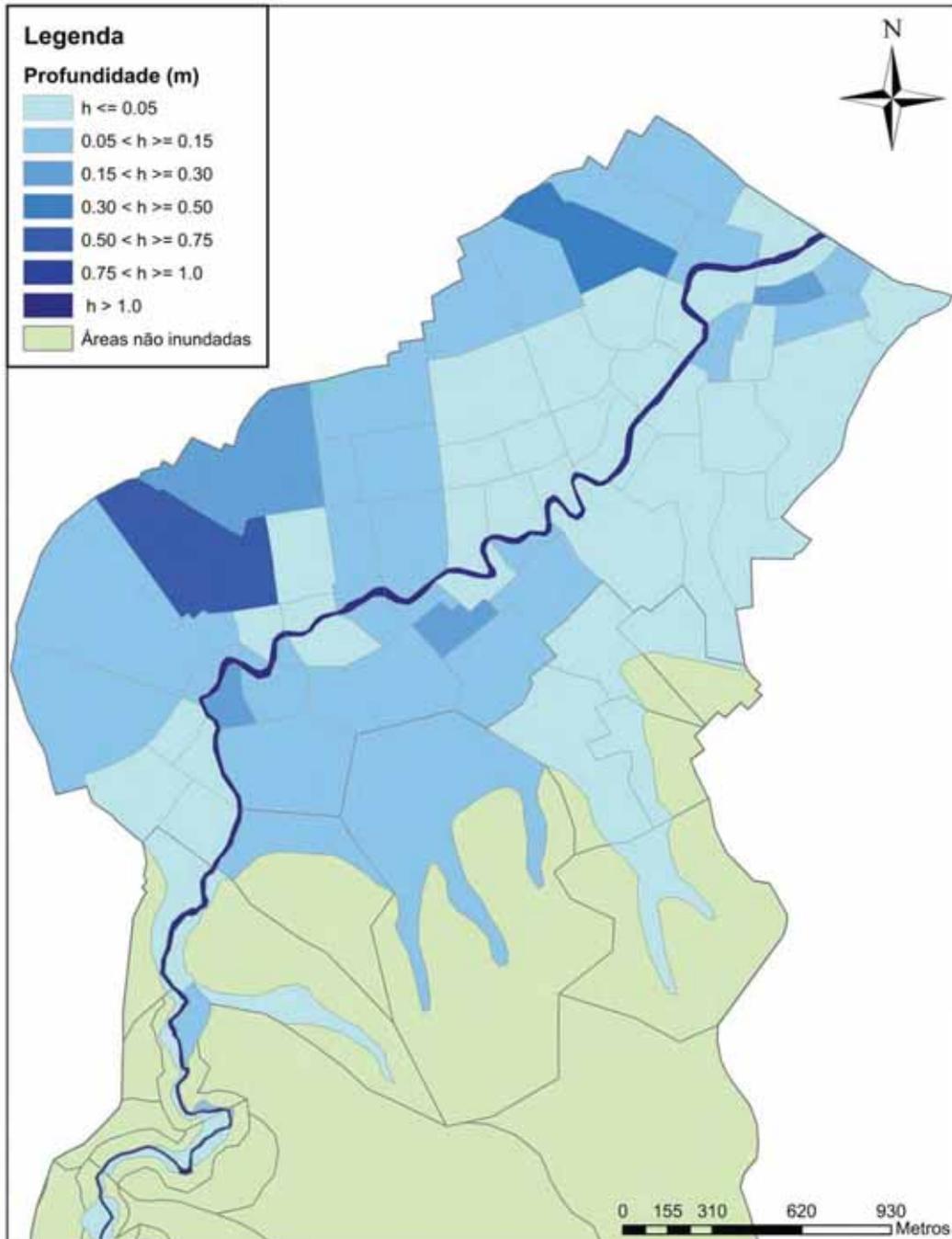


Figura 5.21: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 25 anos nas condições de uso e cobertura da área urbana atuais e da área rural e topografia passadas.

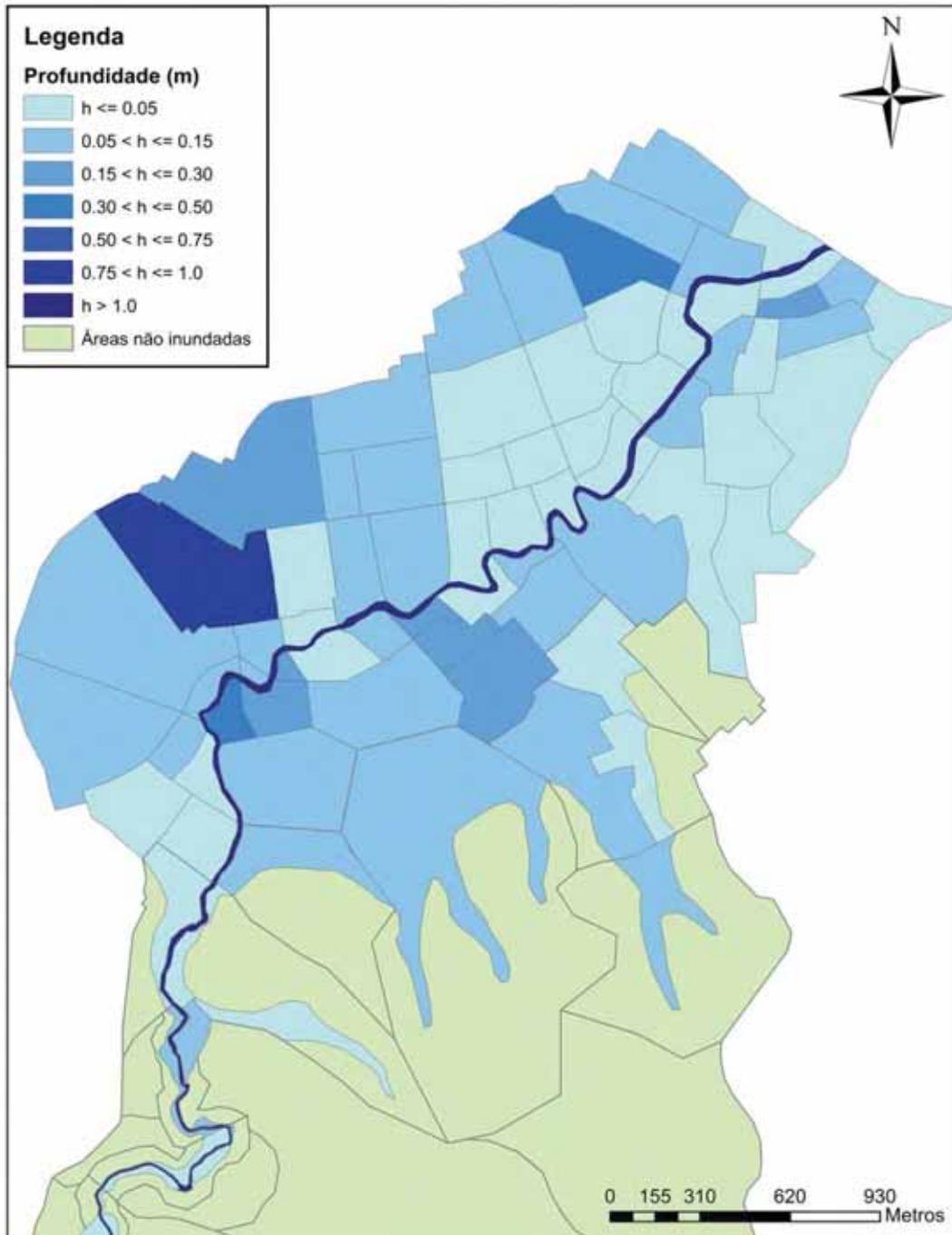


Figura 5.22: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 100 anos nas condições de uso e cobertura da área urbana atuais e da área rural e topografia passadas.

5.6 Uso de alternativas de requalificação para atenuação de cheias

Esses cenários caracterizam uma requalificação fluvial parcial, pois visam apenas a redução das inundações, não atuando em todos os aspectos considerados em uma requalificação completa.

5.6.1 Cenário de requalificação com o reflorestamento da FMP e dos topos de morro

Essa alternativa, que será chamada de Requalificação fluvial 1, visa estabelecer um espaço mínimo destinado ao rio e a proteção das encostas, a fim de minimizar os processos erosivos, resgatando parte da funcionalidade original da bacia, com a redução de vazões líquidas e sólidas.

Neste cenário foram reflorestados todos os topos de morro e efetivados como APA (área de proteção ambiental). A faixa marginal de proteção (FMP) em área rural foi demarcada e revegetada, conforme prevê o Código Florestal Lei 12.651/2012, Artigo 4º, Incisos I e IX:

Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura; b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura (...).

(...) no topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação;

Não foram previstas desapropriações na área urbana, nem qualquer outra medida associada como parques fluviais, reservatórios, entre outros. Essas e outras ações de caráter sócio-ambiental podem ser acrescidas em uma fase posterior de projeto.

Analisaram-se, a partir de imagens de satélite, as células em Resende onde havia espaço para reflorestamento. As células onde foi possível o reflorestamento em área urbana foram: 5137, 5141, 5123, 5125, 5127, 5129, 5131, 5308, 5120, 5122, 5124, 5126, 5232 e 5234; e as células 5220, 5222 e 5226 permitiram um reflorestamento menor. No primeiro conjunto de células utilizou-se coeficiente de *runoff* igual a 0.3 e no segundo conjunto foi utilizado coeficiente de *runoff* igual a 0.45.

Na área rural foram modificados os coeficientes de *runoff* nas células de faixa marginal de proteção para 0.15 e o coeficiente de Manning nas ligações de planície passou de

0.06 para 0.18. Nas ligações entre as células de faixa marginal e as encostas não houve modificação no coeficiente de Manning, permanecendo o valor da situação atual (0.08).

Nas células de encosta, onde foi previsto o reflorestamento do topo de morros, foram calculadas as áreas reflorestadas e calculou-se o coeficiente de *runoff* ponderado, usando 0.15 nas áreas reflorestadas e o mesmo coeficiente da situação atual nas áreas onde não foi prevista nenhuma alteração.

Como foi previsto o reflorestamento da faixa marginal de proteção, os coeficientes de Manning para as ligações de canal foram modificados (Tabela 5.21).

Tabela 5.21: Coeficientes de rugosidade ($n = \text{Manning}$) para o cenário de requalificação parcial, baseado em CHOW (1959).

Ligação entre células de rio			n	Ligação entre células de rio			n
1000	-	1	0.063	132	-	133	0.055
1	-	2	0.063	133	-	134	0.048
2	-	6	0.064	134	-	135	0.055
6	-	7	0.076	135	-	136	0.055
7	-	8	0.060	136	-	137	0.055
8	-	9	0.064	137	-	138	0.055
9	-	10	0.057	138	-	139	0.062
10	-	11	0.055	139	-	140	0.055
11	-	12	0.043	140	-	141	0.062
12	-	13	0.055	141	-	142	0.062
13	-	14	0.048	142	-	300	0.062
14	-	15	0.055	300	-	301	0.055
15	-	16	0.055	3012	-	301	0.062
16	-	17	0.055	302	-	3012	0.062
17	-	18	0.048	302	-	303	0.055
18	-	19	0.038	303	-	304	0.062
19	-	20	0.038	304	-	305	0.062
20	-	109	0.044	305	-	306	0.062
109	-	110	0.055	306	-	307	0.055
110	-	111	0.055	307	-	308	0.062
111	-	112	0.062	308	-	309	0.063
112	-	113	0.062	309	-	310	0.055
113	-	114	0.055	310	-	311	0.055
114	-	115	0.062	311	-	312	0.055
115	-	116	0.069	312	-	313	0.062
116	-	117	0.048	313	-	314	0.062
117	-	118	0.048	142	-	400	0.055
118	-	119	0.055	400	-	401	0.048
119	-	120	0.055	401	-	402	0.055
120	-	121	0.055	402	-	4034	0.055
121	-	122	0.055	4034	-	405	0.062
122	-	123	0.069	405	-	406	0.069
123	-	124	0.048	406	-	407	0.062
124	-	125	0.048	407	-	408	0.062
125	-	126	0.055	408	-	409	0.062
126	-	127	0.048	409	-	410	0.062
127	-	128	0.048	410	-	411	0.055
128	-	129	0.048	411	-	412	0.055
129	-	130	0.055	412	-	413	0.055
130	-	131	0.055	136	-	200	0.055
131	-	132	0.055	200	-	201	0.055

MODCEL para avaliação quantitativa

Foi simulado o cenário requalificação fluvial 1, no MODCEL, para chuvas com tempo de recorrência de 2, 10, 25 e 100 anos, a fim de verificar as mudanças possíveis de serem obtidas nas vazões e nos níveis d'água, principalmente na cidade de Resende, em comparação com a situação atual, que é bastante crítica.

A simulação deste cenário para os tempos de recorrência determinados permitiu a elaboração dos mapas de inundação, a partir das respostas de nível d'água por célula de escoamento. Estes mapas estão apresentados na Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26.

A análise destes mapas permite observar que a alternativa de requalificação fluvial 1 proporciona melhoras significativas, reduzindo as áreas alagadas e os níveis de água nessas áreas.

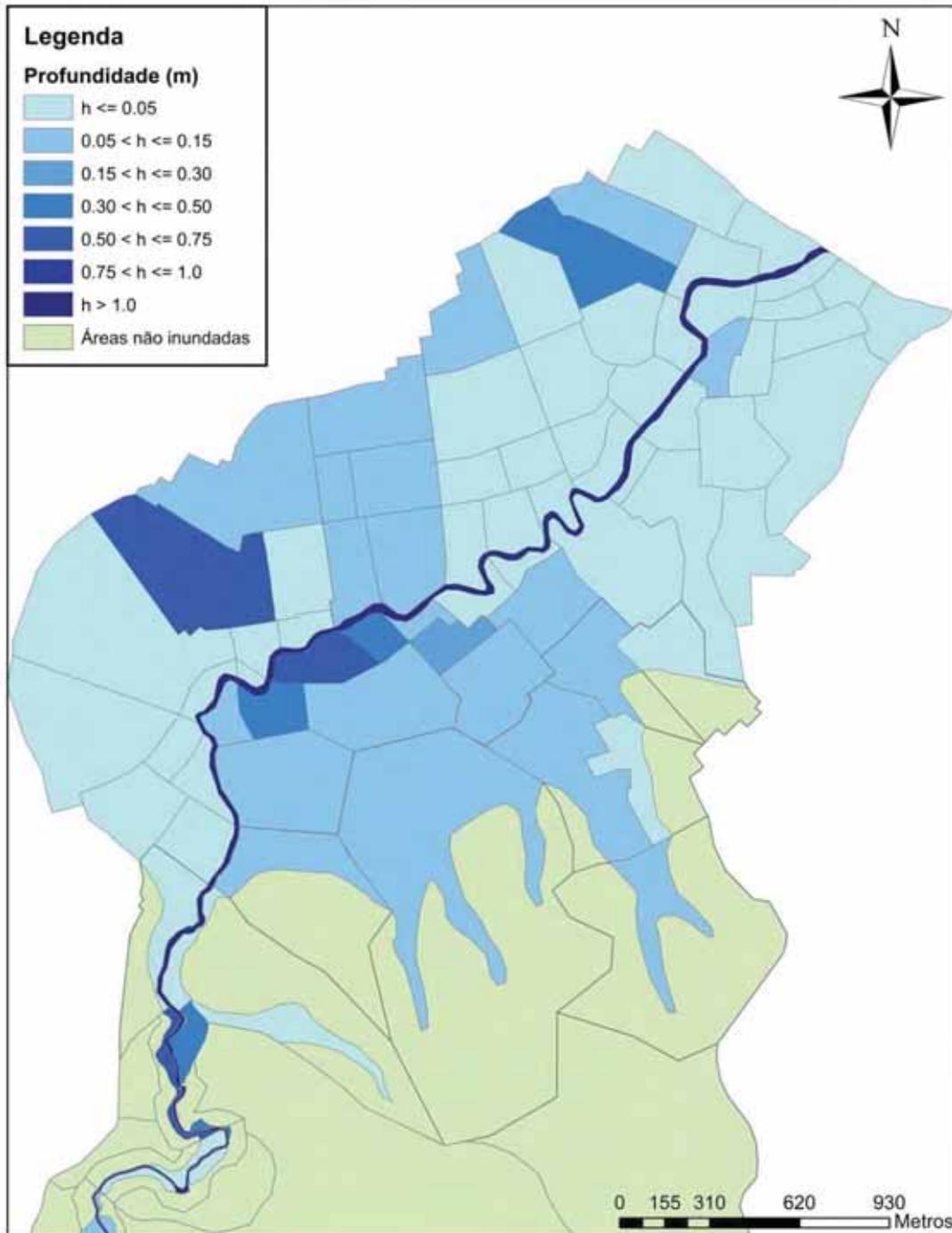


Figura 5.23: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 2 anos, considerando a alternativa de requalificação fluvial 1.

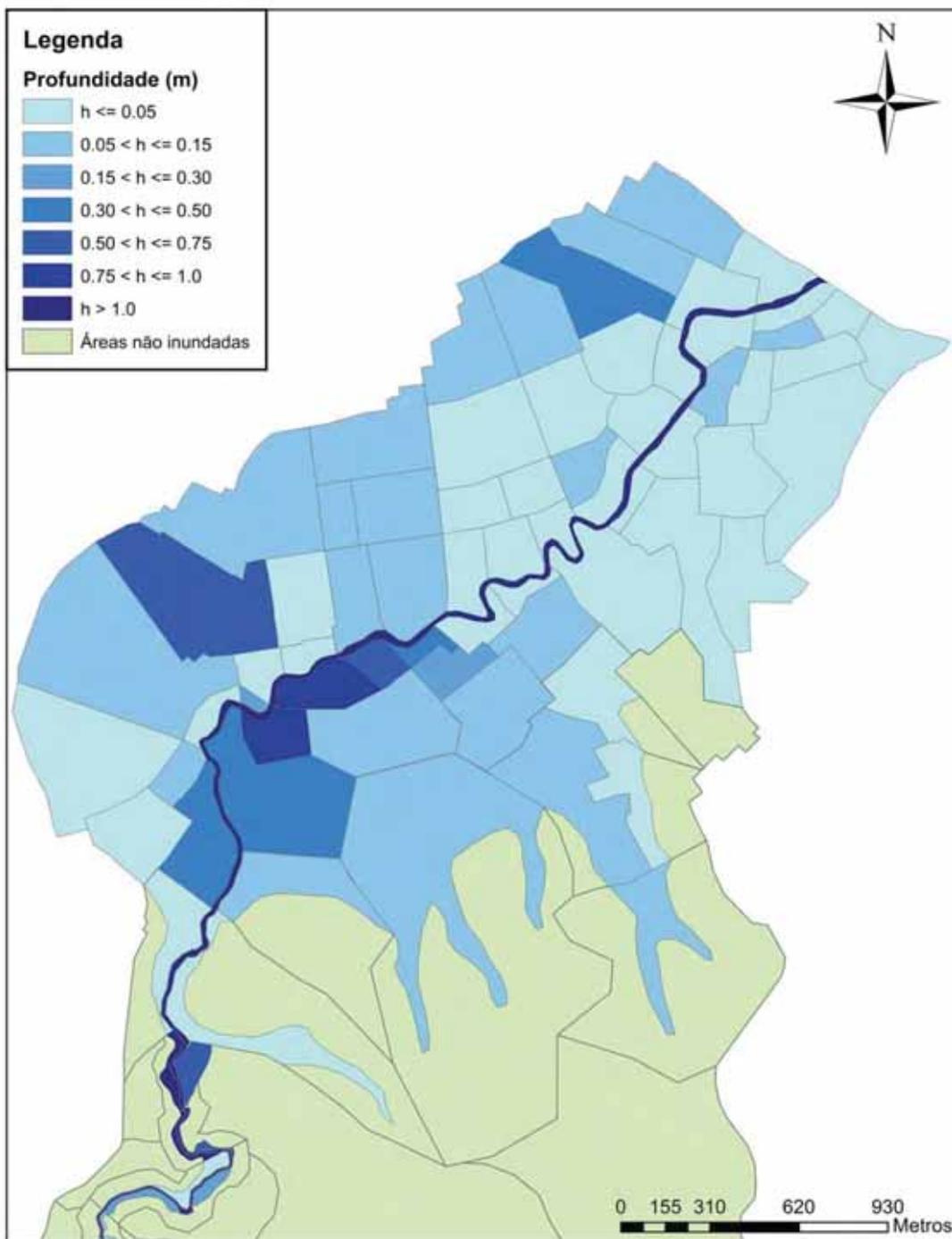


Figura 5.24: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos, considerando a alternativa de requalificação fluvial 1.

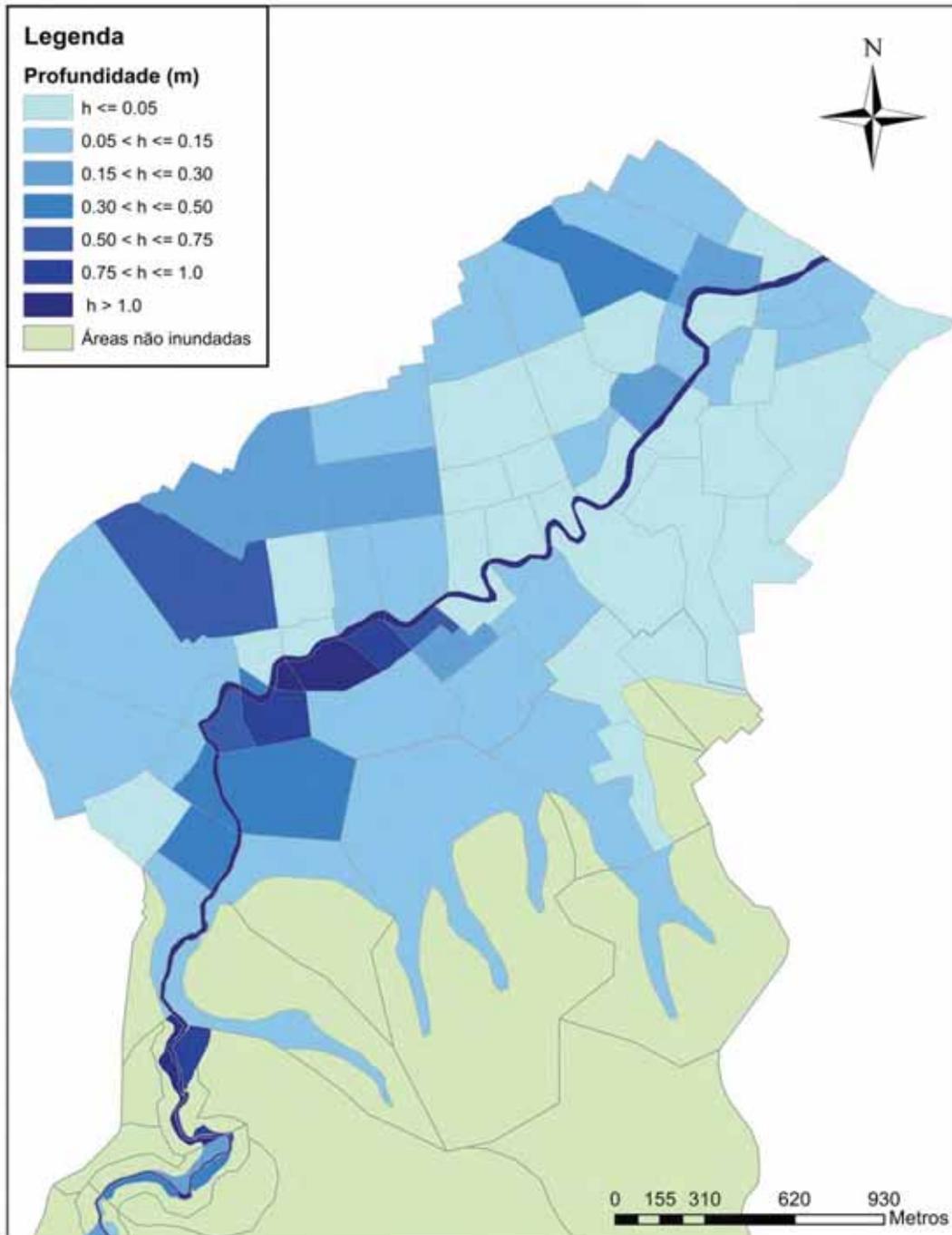


Figura 5.25: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 25 anos, considerando a alternativa de requalificação fluvial 1.

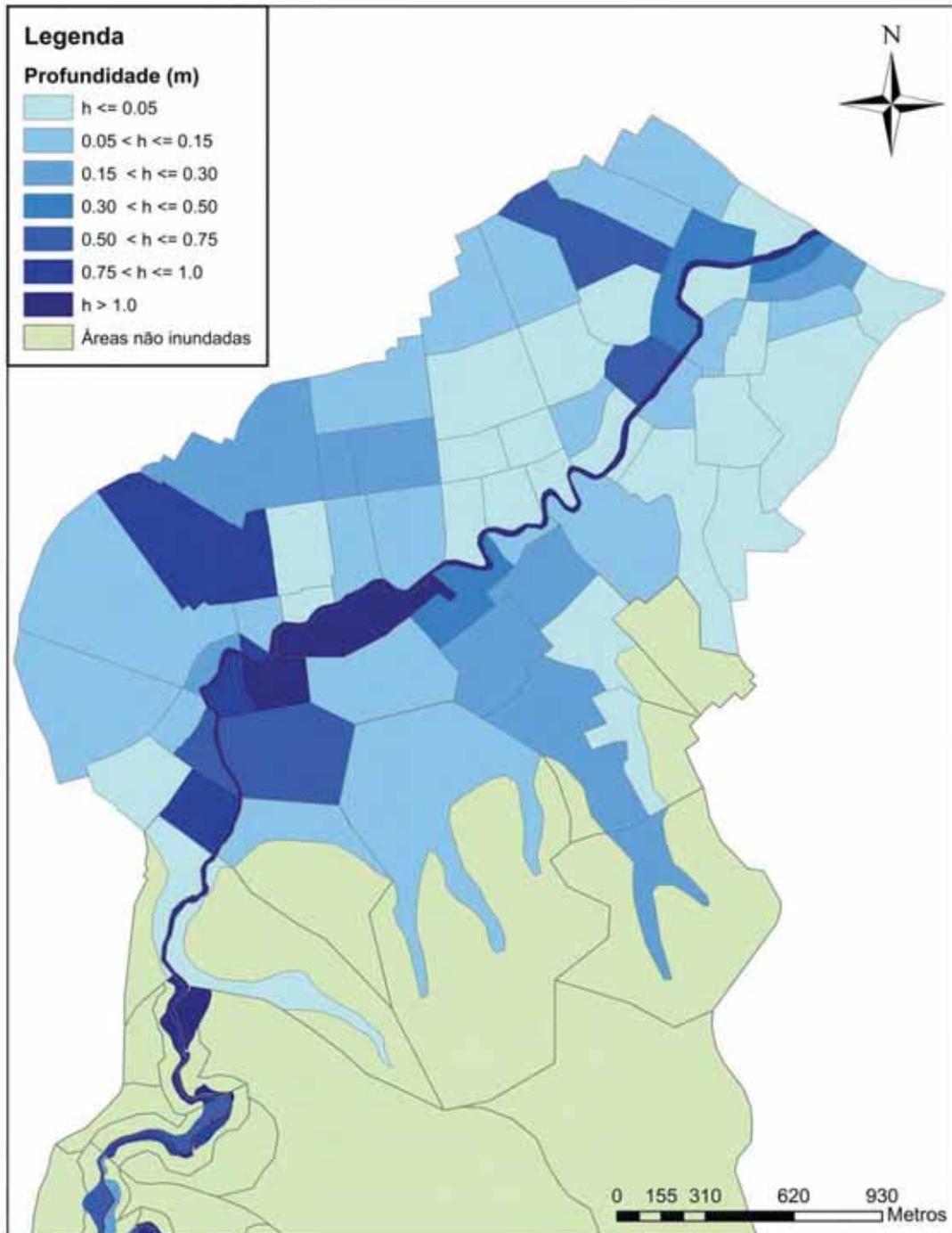


Figura 5.26: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 100 anos, considerando a alternativa de requalificação fluvial 1.

Expectativa de evolução futura com a requalificação (relações de Schumm e Lane)

Com a requalificação parcial da bacia, através do reflorestamento dos topos de morros e da faixa marginal de proteção há uma previsão da redução da vazão sólida, pois a vegetação marginal funciona como um filtro para os sedimentos e com a proteção dos topos dos morros há uma diminuição nos processos que podem causar erosão. A vazão líquida também poderá diminuir devido ao menor escoamento superficial, mas em menor proporção.

Sendo assim, segundo as relações de SCHUMM (1977) há uma tendência do rio Sesmaria a se tornar mais estreito e mais sinuoso, voltando a uma situação mais próxima à situação encontrada no passado.

Segundo a balanço de LANE (1955) a previsão é que, com uma vazão líquida e vazão sólida menor, o rio Sesmaria passe a transportar sedimentos mais finos, que normalmente se acumulam nas margens, tornando o canal mais estreito. Há também uma tendência de aumento da declividade de fundo, coerente com a presença de sedimentos mais finos.

5.6.2 Cenário de requalificação com reflorestamento da FMP

Essa alternativa considera apenas o reflorestamento da faixa marginal de proteção, visando estabelecer um espaço mínimo destinado ao rio. Assim como na alternativa anterior de requalificação, não foram previstas desapropriações na área urbana. Foram utilizados os mesmos coeficientes do cenário anterior para as células onde foi previsto o reflorestamento: coeficientes de *runoff* nas células de faixa marginal de proteção igual a 0.15, coeficiente de Manning nas ligações de planície igual a 0.18 e coeficientes de Manning para as ligações de canal apresentados no cenário anterior (Tabela 5.21 do item 5.6.1). Esta alternativa é chamada de Requalificação fluvial 2.

MODCEL para avaliação quantitativa

Foi simulado o cenário de requalificação apenas com o reflorestamento da faixa marginal de proteção no MODCEL para chuvas com tempo de recorrência de 2, 10, 25 e 100 anos. A partir desta simulação foi possível elaborar os mapas de inundação. Estes mapas estão apresentados na Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30.

A análise destes mapas permite observar que o reflorestamento da faixa marginal de proteção (FMP) proporciona melhoras significativas em relação ao cenário atual, reduzindo as áreas alagadas e os níveis de água em várias células.

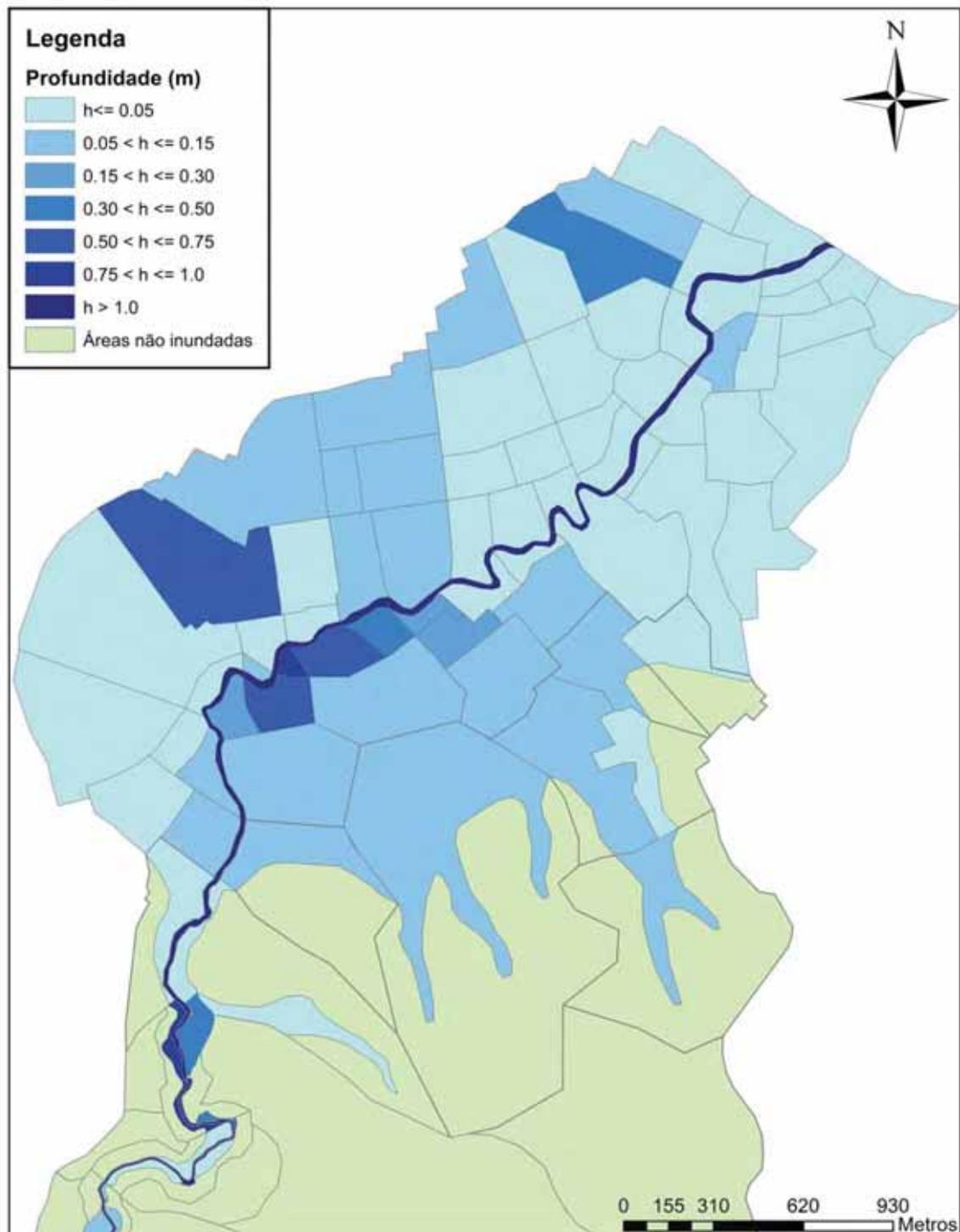


Figura 5.27: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 2 anos nas condições da requalificação fluvial 2, com o reflorestamento apenas da FMP.

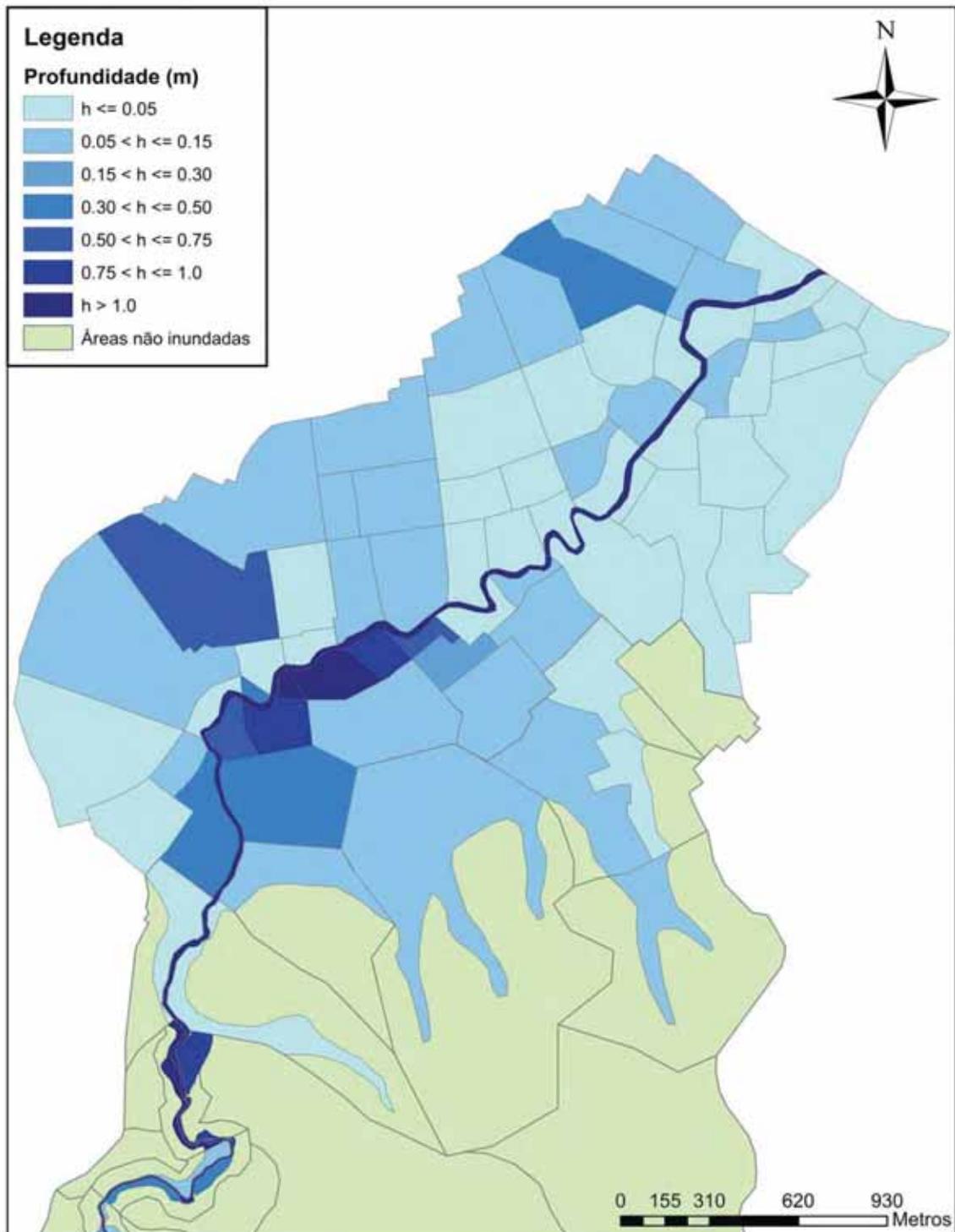


Figura 5.28: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos nas condições da requalificação fluvial 2, com o reflorestamento apenas da FMP.

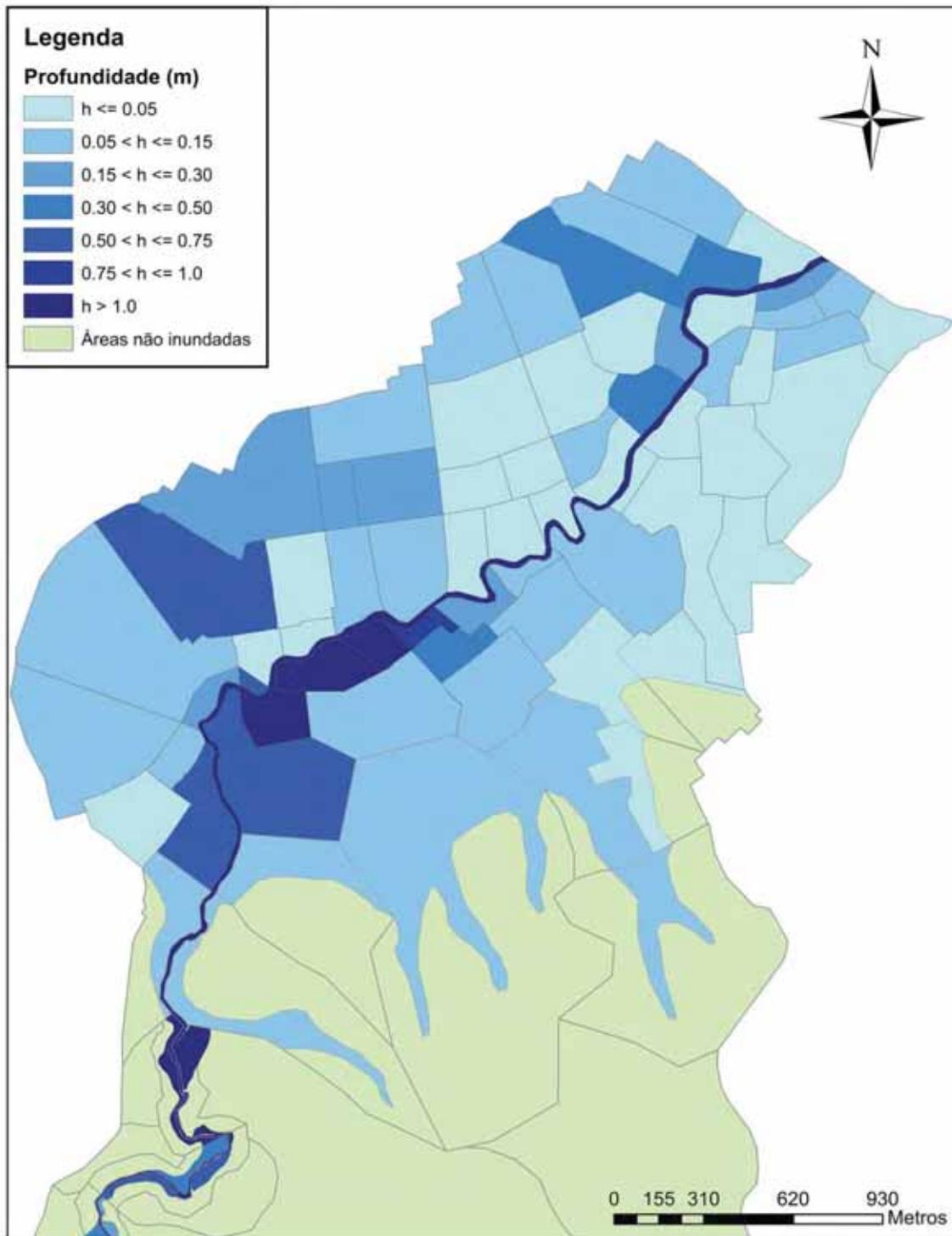


Figura 5.29: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 25 anos nas condições da requalificação fluvial 2, com o reflorestamento apenas da FMP.

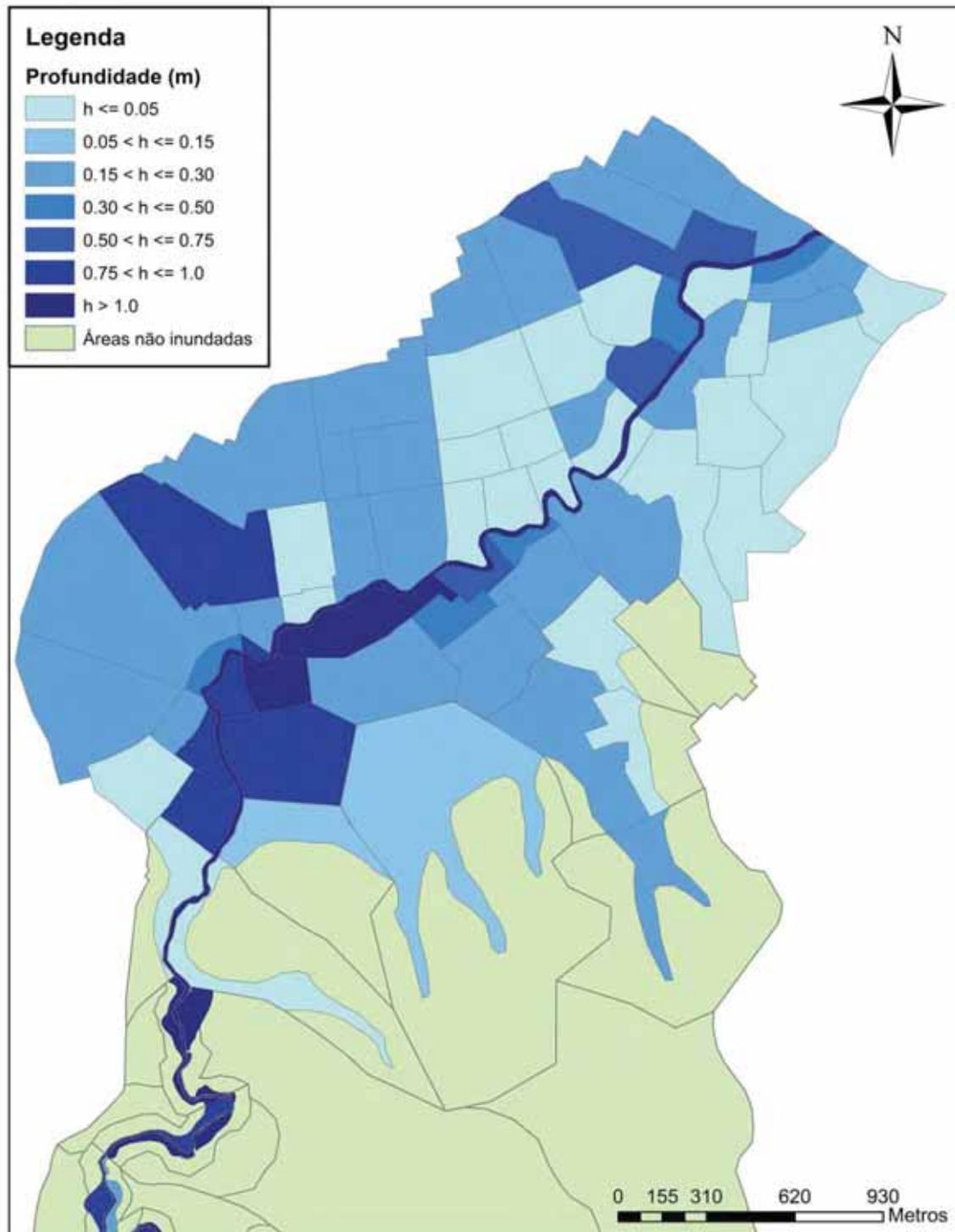


Figura 5.30: Mapa de inundação da área urbana da bacia para um evento com tempo de recorrência (TR) de 100 anos nas condições da requalificação fluvial 2, com o reflorestamento apenas da FMP.

5.7 Análise comparativa dos resultados

Neste item, será apresentada uma análise comparativa dos resultados obtidos em cada cenário, para uma melhor visualização do comportamento da bacia em cada situação.

Para analisar as mudanças na vazão, foi escolhida a célula de rio localizada na entrada da cidade (célula 20), tendo em vista que a cidade de Resende é a maior prejudicada com as alterações na vazão. Foram plotados, para cada tempo de recorrência (TR), os quatro cenários em conjunto. Os gráficos referentes aos tempos de recorrência 2, 10, 25 e 100 estão apresentados na Figura 5.31, Figura 5.32, Figura 5.33 e Figura 5.34, respectivamente. Analisando os gráficos é possível observar que:

- A situação atual é crítica;
- A bacia com a configuração do passado gerava vazões significativamente menores;
- Caso a bacia tivesse sido preservada, mesmo com a urbanização da área próxima a sua foz (Resende), as vazões seriam significativamente menores; e
- A requalificação fluvial 1, que considera o reflorestamento dos topos de morro e da FMP, proporciona uma redução significativa na vazão que chega na cidade de Resende, sendo capaz de reduzir os problemas da situação atual;
- A requalificação fluvial 2, que considera apenas o reflorestamento da FMP, reduz significativamente as áreas inundadas quando comparada à situação atual, e se mostra uma alternativa interessante na redução das inundações.

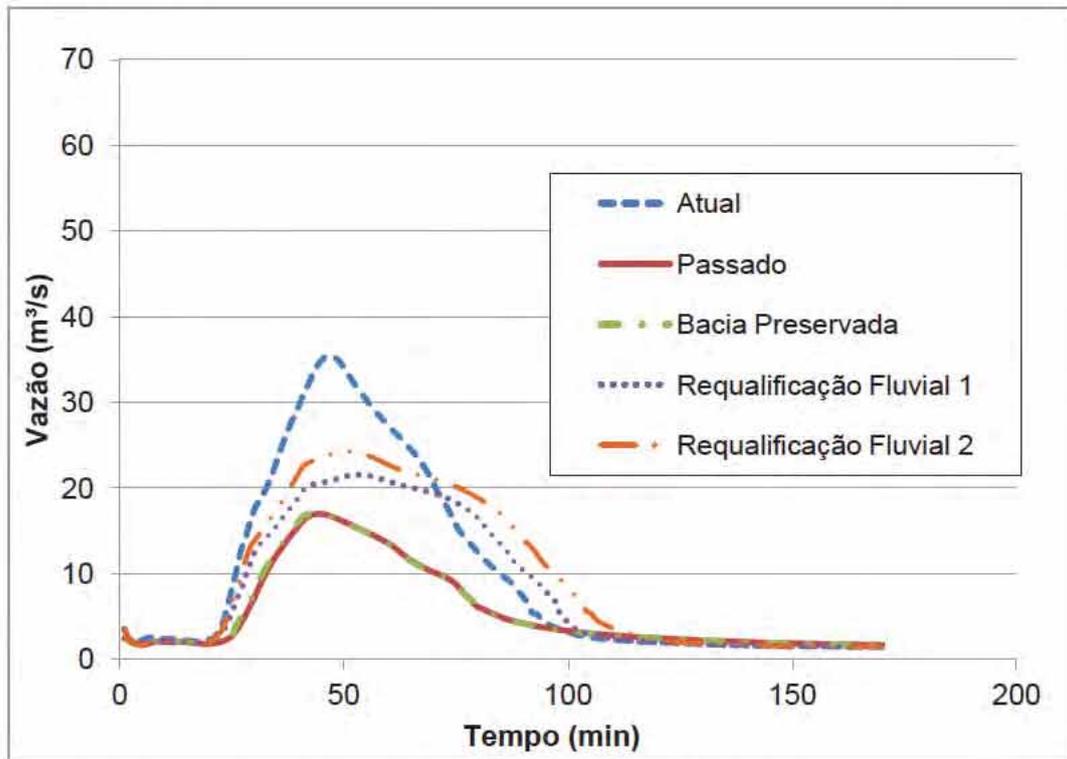


Figura 5.31: Hidrograma na entrada da cidade de Resende (TR 2 anos).

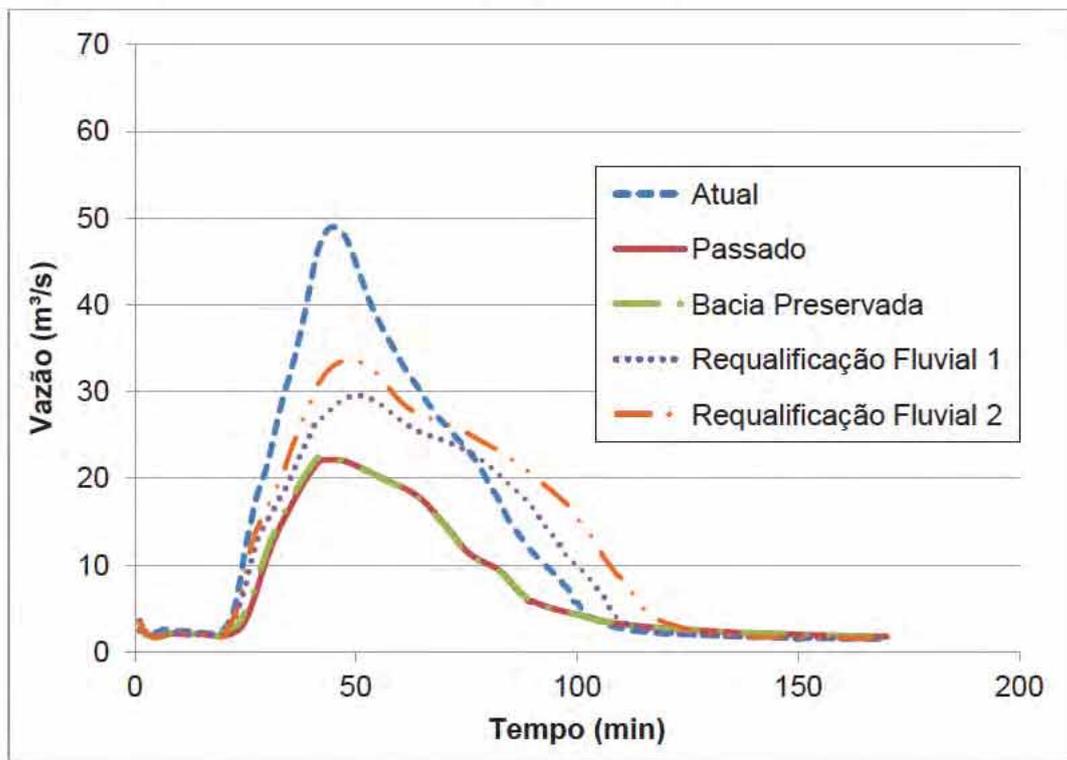


Figura 5.32: Hidrograma na entrada da cidade de Resende (TR 10 anos).

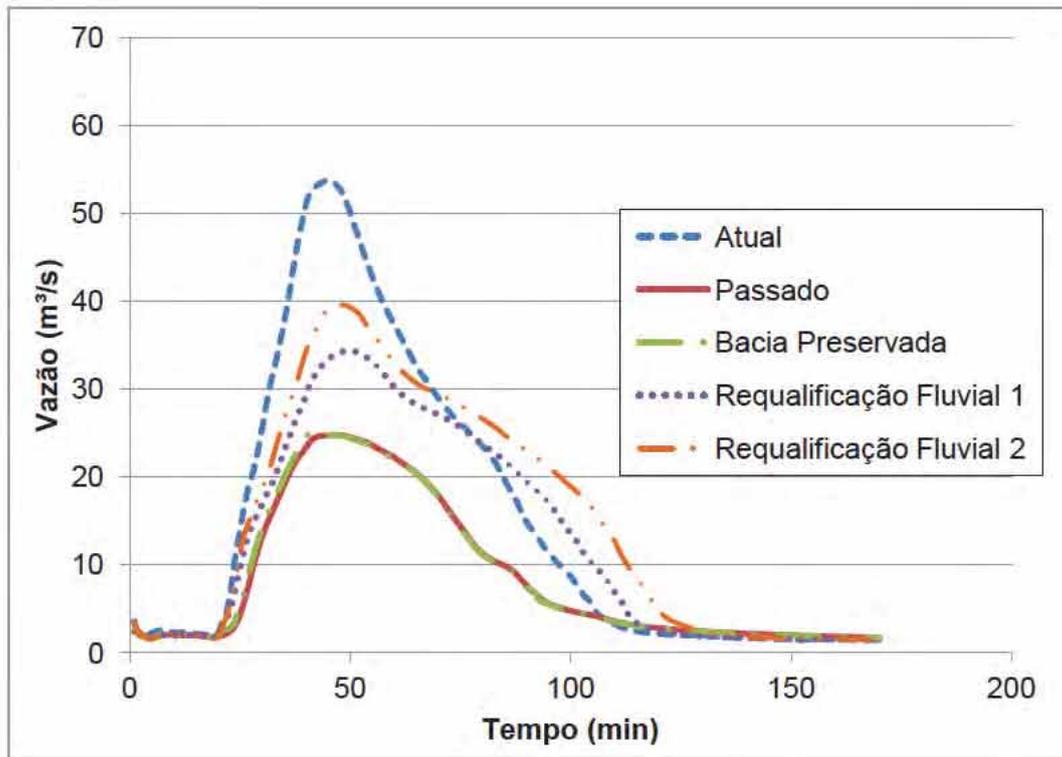


Figura 5.33: Hidrograma na entrada da cidade de Resende (TR 25 anos).

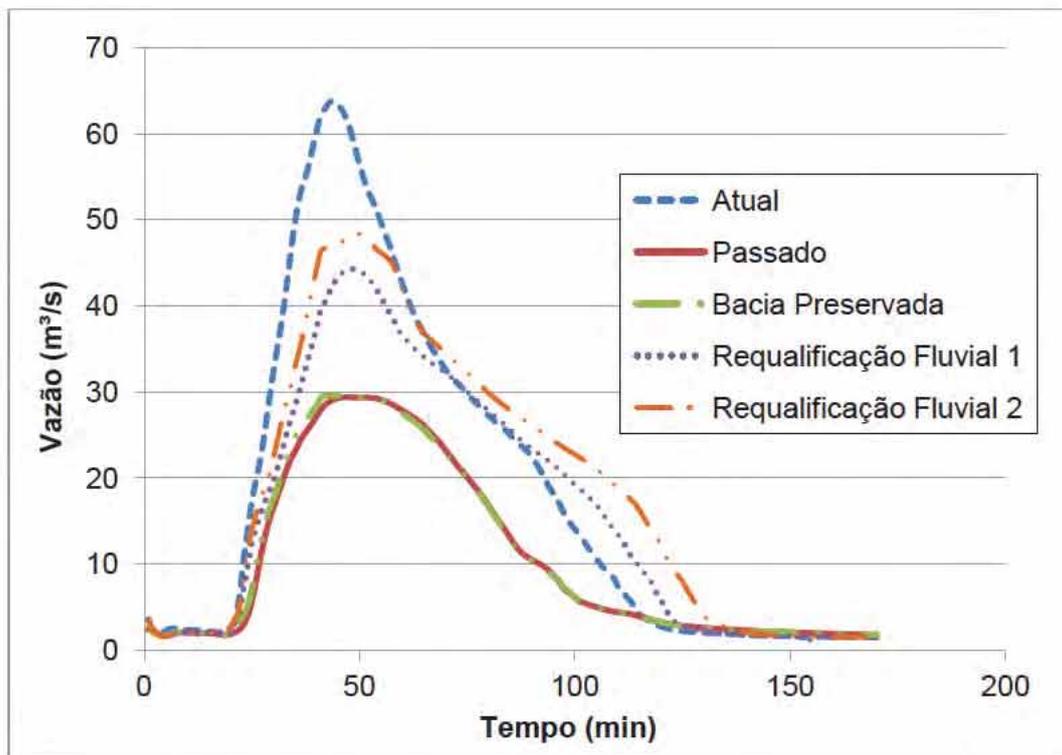


Figura 5.34: Hidrograma na entrada da cidade de Resende (TR 100 anos).

Realizou-se também uma análise comparativa do nível d'água atingido numa célula de rio no meio da cidade (célula 12) para os cenários simulados, considerando o TR de 25 anos, que é o TR recomendado pelo Ministério das Cidades. Como o perfil do rio

no passado, assim como as planícies de inundação, possui cotas mais baixas comparadas à situação atual, devido ao pacote sedimentar, são apresentados dois gráficos, um contendo os cenários referentes ao Passado e à Bacia preservada (Figura 5.35) e outro, contendo a situação Atual e as alternativas de Requalificação fluvial (Figura 5.36). Observa-se que, para o cenário Passado e para o cenário que considera a bacia preservada, o rio não extravasa para o TR de 25 anos. Já no cenário Atual o extravasamento do rio chega a atingir 1.4 metro na margem direita. No cenário Requalificação fluvial 1 este extravasamento cai para menos da metade, atingindo 0.6 metro e no cenário Requalificação fluvial 2 o extravasamento chega a 0.8 m.

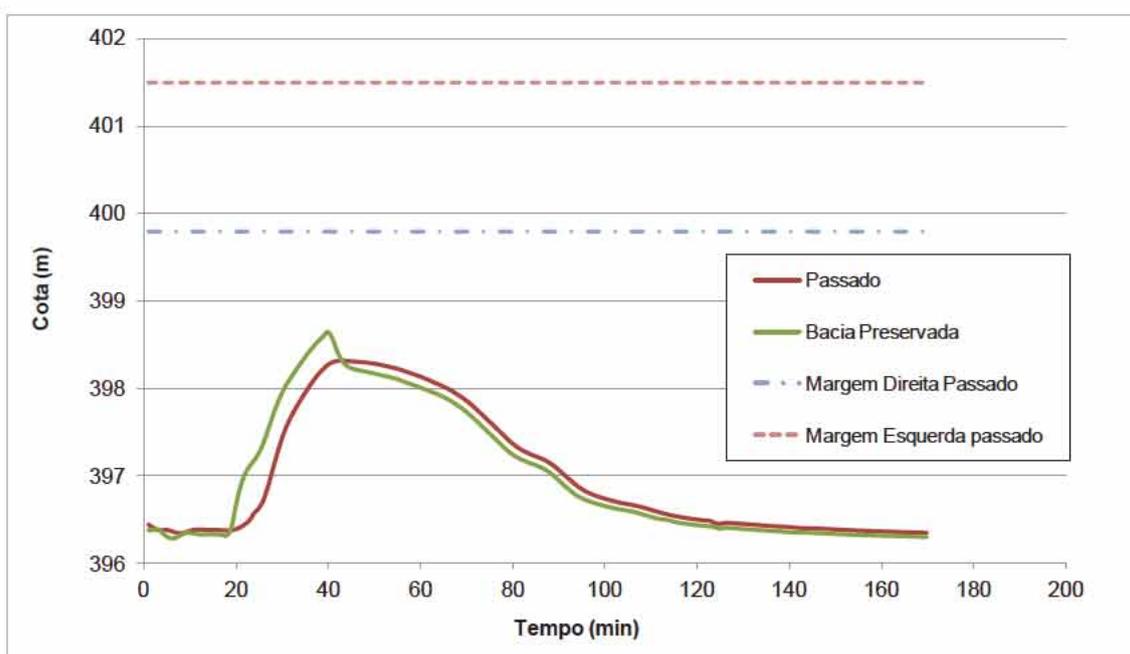


Figura 5.35: Cotagrama da célula do rio Sesmaria no meio da cidade de Resende para os cenários Passado e Bacia preservada (TR 25 anos).

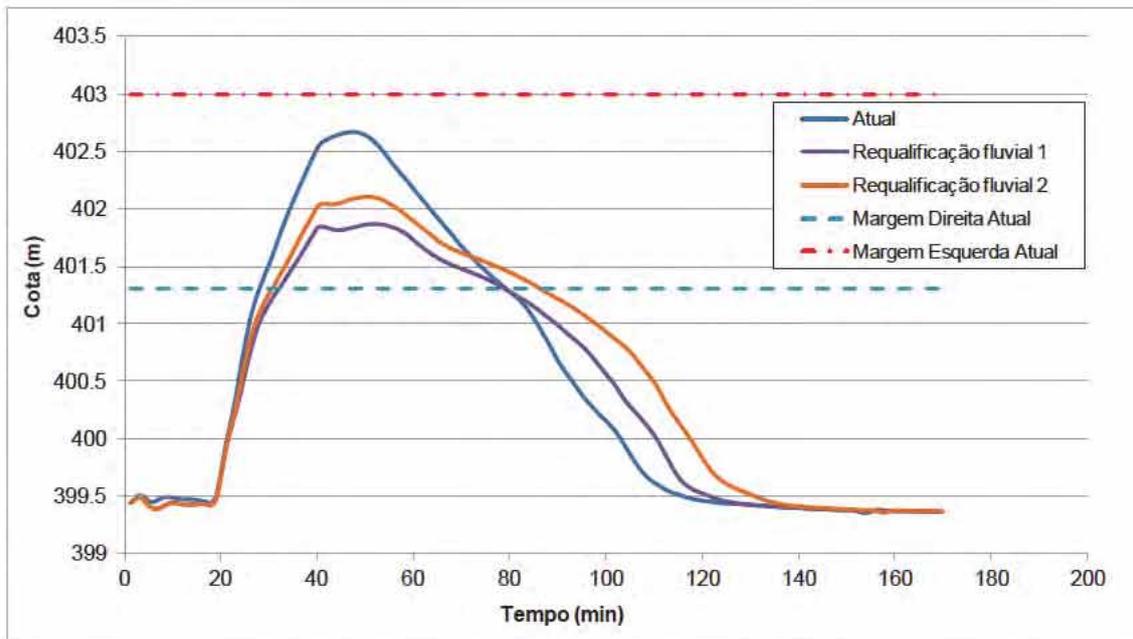


Figura 5.36: Cotagrama da célula do rio Sesmaria no meio da cidade de Resende para os cenários Atual, Requalificação fluvial 1 e Requalificação fluvial 2 (TR 25 anos).

Comparou-se também o nível d'água atingido, nos diferentes cenários, na célula de planície 5103, localizada no centro de Resende, próximo a foz do rio Sesmaria, para o TR de 25 anos. A Figura 5.37 apresenta os cenários Passado e Bacia preservada e a Figura 5.38 apresenta os cenários Atual, Requalificação fluvial 1 e Requalificação fluvial 2. A Tabela 5.22 apresenta o nível d'água atingido na célula de planície para os diferentes cenários. Fazendo uma comparação entre o cenário Atual e os demais cenários, calcula-se que o nível d'água atingido no cenário Passado é 98% menor, o atingido caso a bacia fosse preservada é 93% menor, o nível d'água atingido na requalificação fluvial 1 é 78% menor e na requalificação fluvial 2 é 57% menor.

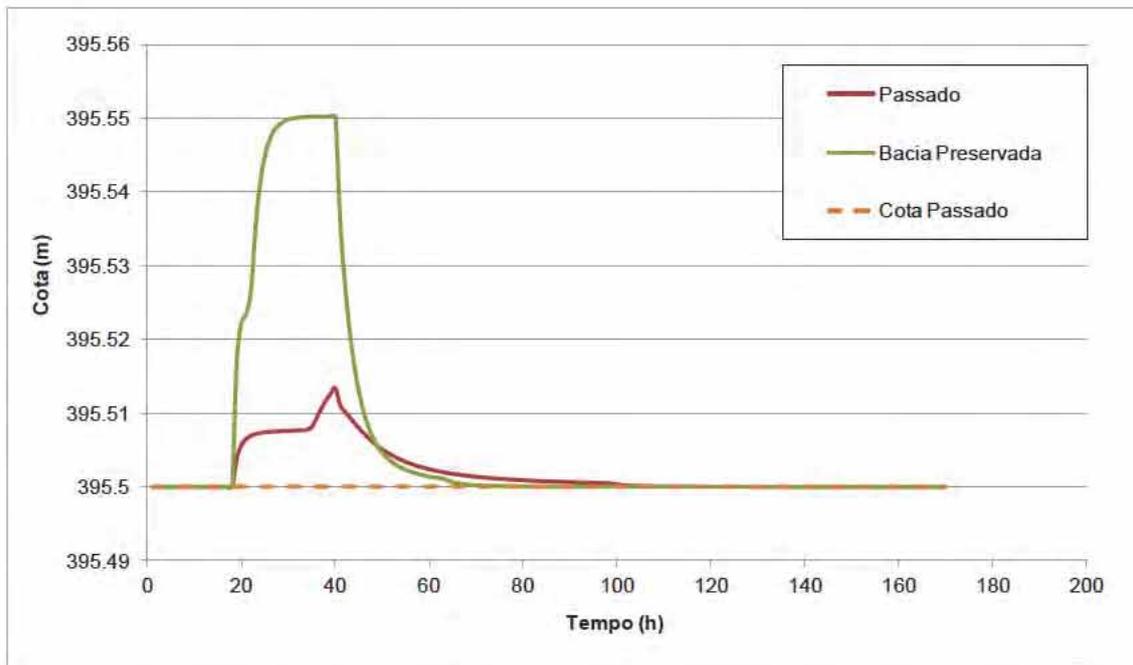


Figura 5.37: Cotagrama da célula de planície do rio Sesmaria no centro de Resende, para os cenários Passado e Bacia preservada (TR 25 anos).

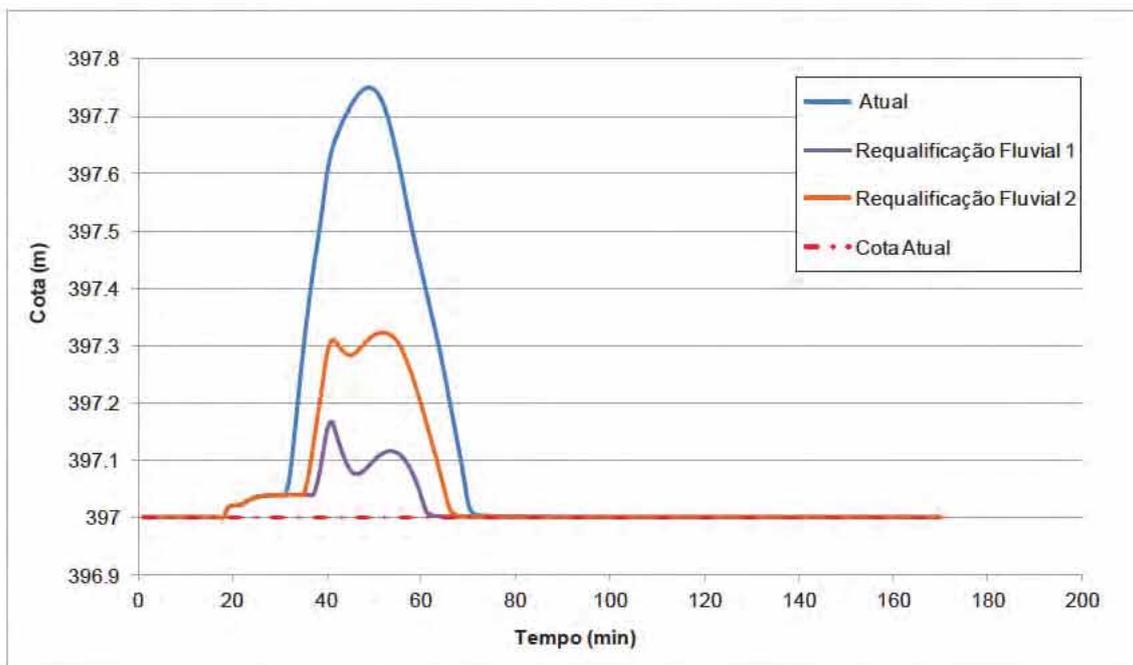


Figura 5.38: Cotagrama da célula de planície do rio Sesmaria no centro de Resende, para os cenários Atual, Requalificação fluvial 1 e Requalificação fluvial 2 (TR 25 anos).

Tabela 5.22: Lâmina d'água (m) atingida na célula de planície para os diferentes cenários.

TR (anos)	Atual	Passado	Bacia Preservada	Requalificação fluvial 1	Requalificação fluvial 2
25	0.75	0.013	0.05	0.17	0.32

A localização das células na bacia, escolhidas para a análise comparativa, estão apresentadas na Figura 5.39.

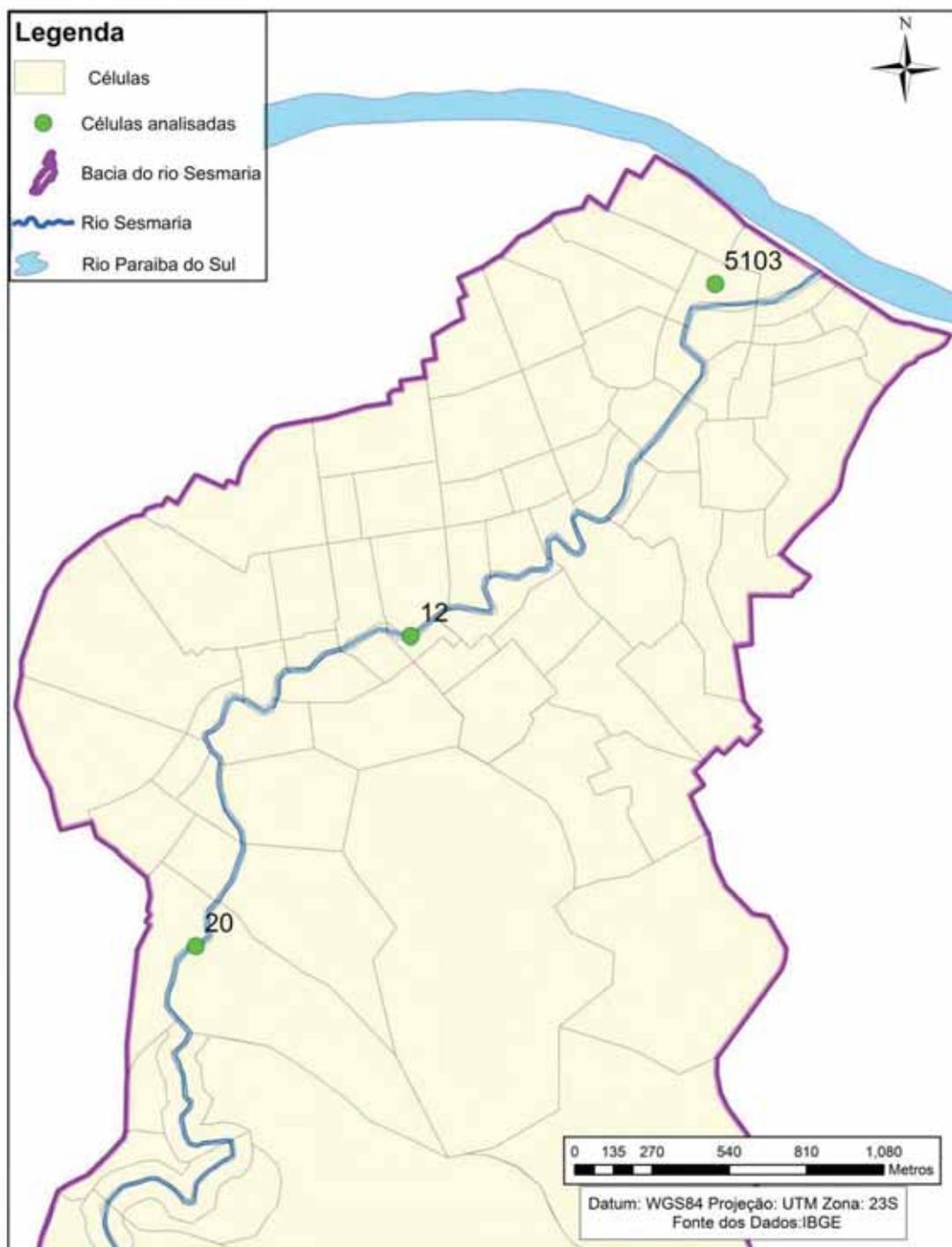


Figura 5.39: Localização das células utilizadas na análise comparativa.

6 Conclusões e recomendações

6.1 Conclusões

Este trabalho permite refletir sobre a importância do manejo do uso do solo e da preservação de áreas na bacia, e do corredor fluvial, e confirma a hipótese de que, hoje, após o processo de degradação da bacia do rio Sesmaria, ocorrido nos últimos 2 séculos, pela remoção de vegetação natural, exploração econômica do ciclo do café, seu abandono e substituição por pastagens, existem muito mais problemas de inundações e de instabilidade morfológica, com reflexos importantes na cidade de Resende, quando comparado à situação anterior à degradação da bacia.

Os resultados deste trabalho também confirmaram a hipótese de que a utilização de técnicas de requalificação fluvial é um modo adequado de recuperar o funcionamento do rio, ainda que de modo parcial, e criar condições de mitigação das cheias.

O objetivo deste trabalho foi alcançado, apesar de todas as limitações encontradas no decorrer da pesquisa. Apesar de complexo, principalmente pela necessidade de informações históricas, o método VALURI se mostrou aplicável. A vantagem de permitir o espaço para integração de critérios diversos e de informações qualitativas e quantitativas foi de grande valia na previsão morfológica e no entendimento do funcionamento do rio. A enorme carência de informações não permitiu que o VALURI fosse aplicado em sua totalidade, mas, ainda assim, se mostrou satisfatório para esta pesquisa. Deste modo, a metodologia proposta apresenta-se eficaz para atender os objetivos propostos neste estudo.

Através do método VALURI o rio foi analisado ao longo de toda a sua extensão, desde a divisão em trechos geomorfológicos partindo da compreensão de seu funcionamento, até a previsão de mudanças futuras. O método chamou a atenção para a necessidade de conhecer o passado do rio, as alterações sofridas por ele e como ele se comportou diante destas alterações. Este conhecimento ajuda a inferir como ele irá se comportar diante de novas intervenções. Também é de extrema importância a caracterização dos sedimentos que estão sendo transportados, suas origens e de que forma ocorre o transporte para o melhor conhecimento da dinâmica do rio, pois são eles um dos grandes responsáveis pela mudança na morfologia do rio, juntamente com a vazão líquida que os transporta.

Foi possível avaliar o estado do Rio Sesmaria, de forma qualitativa, seu processo evolutivo de ocupação e degradação da bacia e interpretar seu histórico de

desenvolvimento. Esta interpretação permitiu atuar sobre o problema de inundações na cidade de Resende a partir da utilização de técnicas associadas ao conceito de requalificação fluvial, que se mostraram eficientes na minimização do risco hidráulico. Além de minimizar a ocorrência de enchentes, as técnicas de requalificação fluvial propostas também podem reduzir a erosão nas encostas e aumentar a estabilidade das margens através da delimitação e do reflorestamento da faixa marginal de proteção, minimizando o risco hidromorfológico, ao mesmo tempo em que cria condições para uma melhoria ambiental da faixa fluvial.

As diversas alterações que ocorreram no canal do rio Sesmaria, tais como o abandono de meandros, depósitos formados próximos ao canal ativo, como as barras laterais e as ilhas, e ao longo de todo o rio o alargamento da calha fluvial provocado pela erosão das margens, foram, em grande parte, provocadas pelas transformações ambientais nas encostas que geram impactos no canal fluvial, com o aumento dos picos de vazão e da produção e transporte de sedimentos, levando a novas condições de ajuste.

É possível evitar ou reduzir a continuidade das alterações nas feições morfológicas, reduzindo o aporte de sedimentos ao rio Sesmaria. Para isso, é importante a mudança de ocupação da bacia hidrográfica, principalmente das margens, com a recuperação da mata ciliar, e a revegetação dos topos de morro, conforme prevê o Código Florestal (Lei 12.651/2012). A mata ciliar funciona como filtro para os sedimentos grosseiros que vêm da bacia e a revegetação dos topos de morros reduz a produção de sedimentos, pois ao proteger o solo são reduzidos os processos de carreamento de sedimentos.

Atualmente, a vegetação marginal do rio Sesmaria se restringe a pequenos fragmentos de mata ciliar próximos ao leito e a maior parte é vegetada apenas com gramíneas que não conferem nenhuma estabilidade às margens. A falta de vegetação contribui para a instabilidade da margem, favorecendo a atuação da erosão fluvial. A estabilidade da margem está diretamente ligada às suas propriedades físicas, que as mantêm resistentes à erosão.

A preservação da memória histórica dos rios brasileiros é de grande importância para a gestão dos rios, pois a partir desta memória, em conjunto com outras informações e pesquisas de campo, pode-se conhecer a dinâmica do rio e da bacia e seu comportamento morfológico. A partir deste conhecimento a tomada de decisões é feita de maneira mais coerente com a realidade do rio e transtornos futuros são evitados.

A estimativa da *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)* confirmou a possibilidade de produção do pacote sedimentar considerado para o desenho do perfil

passado do rio Sesmaria. O valor obtido através da RUSLE, $14 \cdot 10^4$ ton/ano, ficou muito próximo do valor encontrado por DANTAS (1995) na bacia do rio Bananal e aplicado na bacia do rio Sesmaria, $12 \cdot 10^4$ ton/ano.

A estimativa da vazão efetiva e da vazão de *bankfull* é fundamental na análise das mudanças que podem ocorrer num rio e, portanto, são importantes para projetos de requalificação fluvial. A vazão efetiva está relacionada à formação, manutenção e às dimensões do canal e pode ser considerada, muitas vezes, equivalente à vazão de *bankfull*. Nesse estudo, ambas as vazões se mostraram menores que a estimativa para a vazão de TR= 1 ano. Esse baixo valor mostra que a seção atual está ainda em busca de um novo equilíbrio, apresentando uma capacidade ainda insuficiente e em processo de alargamento, para fazer frente às maiores vazões líquidas em presença de também maiores vazões sólidas.

O MODCEL se mostrou eficaz nesta aplicação e permitiu avaliar as medidas propostas através dos cenários de simulação. Além disso, os resultados obtidos através do modelo permitiram visualizar a mancha de inundação na bacia.

A simulação dos cenários propostos nos permite concluir que:

- No passado, com toda a bacia coberta por mata atlântica as áreas inundadas eram menores e a vazão também. No entanto, a exploração econômica de áreas rurais e o desenvolvimento urbano são importantes, mas devem ser feitos de forma planejada, para que o risco hidráulico não se amplifique ou que nem chegue a existir para eventos menores.
- Caso a parte rural da bacia tivesse se mantido preservada, o risco hidráulico seria muito menor em relação à situação atual, o que leva à conclusão de que o desmatamento de áreas para o plantio do café, sem preocupações conservacionistas, foi muito prejudicial para a bacia e foi uma das causas dos graves alagamentos na cidade de Resende, que causou enormes prejuízos para a população.
- O reflorestamento apenas da FMP proporciona reduções significativas dos níveis d'água e das áreas inundadas, no entanto, essa medida associada ao reflorestamento de topo de morro proporciona resultados ainda melhores.
- O início de uma requalificação fluvial do rio Sesmaria, com o intuito de reduzir o risco hidráulico, se mostrou eficaz através de medidas previstas no código florestal, como a revegetação de topos de morro e da faixa marginal de proteção. A partir da implantação destas medidas haverá uma redução

considerável nos pontos de alagamento e do nível d'água na cidade de Resende.

- O cenário da situação atual é crítico. Os resultados mostraram alagamentos na cidade de Resende até para eventos de chuva menores, com tempo de recorrência de 2 anos.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados de vazões afluentes à cidade de Resende para cenário nos diversos tempos de recorrência. A vazão obtida para o cenário Passado e TR de 25 anos é 54% menor quando comparada à situação atual. Caso a bacia tivesse se preservado, a vazão seria 53% menor que a obtida para a situação atual para o TR de 25 anos. Com a alternativa de requalificação fluvial 1 e TR de 25 anos a vazão que chegaria na cidade seria 36% menor e com a alternativa de requalificação fluvial 2 a vazão seria 27% menor.

Tabela 6.1: Vazões de pico de cheia em m³/s para o rio Sesmaria, na entrada de Resende, nos diferentes cenários simulados.

TR (anos)	Atual	Passado	Bacia Preservada	Requalificação fluvial 1	Requalificação fluvial 2
2	35.4	17.0	17.0	21.6	24.3
10	49.0	22.1	22.4	29.5	33.6
25	53.9	24.8	25.2	34.4	39.6
100	63.8	29.4	29.6	44.3	48.4

Foi possível concluir, através dos cenários simulados, que a degradação da bacia tem grande contribuição no aumento do risco hidráulico associado ao rio Sesmaria, principalmente na cidade de Resende, que é a que mais sofre com este processo sem precedentes.

6.2 Recomendações

A realização de diagnóstico em escala temporal para as feições morfológicas é importante para propor medidas de gestão, pois assim é possível prever as mudanças futuras, a partir de análises que formam por referência o passado. Portanto, recomenda-se o monitoramento das sucessivas mudanças no ambiente fluvial e a implementação de medidas de requalificação fluvial, como a recuperação das matas ciliares e a revegetação de topos de morro, a fim de se formarem obstáculos para o transporte de sedimentos. É interessante avaliar também uma possibilidade de requalificação fluvial mais completa, visando outros aspectos, além do controle de inundações, tais como a qualidade da água e a qualidade do ambiente aquático.

Outra recomendação seria a implementação de ações na área urbana, como parques fluviais por exemplo, seguindo a linha do *Water-Sensitive Urban Design* (WSUD) que é um planejamento territorial que integra o ciclo urbano da água, incluindo as águas pluviais, águas subterrâneas e as águas residuais e de abastecimento de água, em um desenho urbano com a finalidade de minimizar a degradação ambiental e melhorar o apelo estético e recreativo nas cidades (LLOYD *et al.*, 2002; LAWRENCE e PHILLIPS, 2006).

Recomenda-se, por fim, que sejam feitas medições *in-situ* em trechos que sejam representativos do escoamento a fim de se conhecer profundamente os sedimentos que estão sendo transportados pelo rio Sesmária e qual o tipo de transporte predominante, para que seja feito um diagnóstico e prognóstico do movimento dos sedimentos. É importante que seja feito um estudo quantitativo do movimento sedimentar no rio Sesmária e para isso é necessário realizar medições durante ao menos um ciclo hidrológico e em períodos superpostos. É necessário que seja feita uma caracterização hidrometeorológica de forma bastante detalhada (WILSON-JR, 1999). Essa ação permitirá, com mais certeza, rever e embasar essas primeiras conclusões aqui apresentadas.

7 Referências Bibliográficas

ANA – Agência Nacional de Águas. *Hidroweb*. Disponível em www.ana.gov.br. Acesso em 2011, 2012 e 2013.

ABDALAD, M.A.. RESPOSTAS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO SESMARIA, MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL: SUBSÍDIOS ÀS TRANSFORMAÇÕES INDUZIDAS PELOS PLANTIOS DE EUCALIPTO. 86 f. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – *Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização* – NBR-6457, 1986.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – *Solo – Análise granulométrica* – NBR-7181, 1984d.

AdB Po. “Studio di Fattibilità della Sistemazione Idraulica del fiume Oglio nel tratto da Sonico alla confluenza in Po e del suo affluente Cherio dal lago di Endine alla confluenza; del fiume Mella da Brozzo alla confluenza in Oglio, del fiume Garza dalla confluenza Valle del Loc alla confluenza in Chiese e del fiume Chiese da Gavardo alla confluenza in Oglio”. Autorità di bacino del Po. Parma (I). (2004).

BALABRAM, P.R., 2007, Utilização de indicador geomorfológico para fixação de medidas de controle de cheias em áreas urbanas estudo de caso: Brasília – DF.. 87 f. Dissertação (Mestrado) - UFMG, Belo Horizonte.

BERNHARDT, E.S.; PALMER, M.A.; ALLAN, J.D. *et al.*, 2005, *Restoration of U.S. Rivers: a national synthesis*. Science 308:636-637.

Biblioteca Nacional – RJ, 1861, Planta da Cidade de Resende.

BIGARELLA, J.J., SUGUIO, K.; BECHER, R.D., 1979, *Ambiente Fluvial: Ambientes de Sedimentação, sua interpretação e importância*. Paraná: Editora da Universidade Federal do Paraná. Associação de Defesa e Educação Ambiental.

BINDER, W., Die Isar. in: Jürging, P. and Patt H., 2004, *Fließgewässer-und Auenentwicklung*, Berlin- Heidelberg: Springer. p. 416-428.

BRADSHAW, A.D, 1996, “Underlying principles of restoration.” *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53.S1: 3-9.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2010, Prêmio Melhor prática em gestão ambiental urbana 2010. Brasília: MMA. Junho.

BRASIL – Lei Federal 12.651 de 25 de maio de 2012, Novo Código Florestal, Senado Federal, 2012.

BRIERLEY, G.J.; FRYIRS, K., 2000, *River Styles, a geomorphic approach to catchment characterization: implications for river rehabilitation in Bega catchment*. 1 ed. New South Wales, Australia. Environmental Management.

BROOKES, A.; SHIELDS, F.D., 1996, *River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*. 1 ed. Chichester, Reino Unido; Wiley.

CANHOLI, A. P., 2005, *Drenagem Urbana e Controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de textos.

CARVALHO, N.O., 2008, *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Interciência Ltda.

CAVALCANTE, A.A.; MAIA, R.P.; MORAIS, J.O. de., 2006, “Dinâmica Fluvial no Baixo Jaguaribe-CE: Uma Avaliação a partir de estudos de descarga sólida.” In: *Anais do VI Simpósio Nacional De Geomorfologia e Regional Conference on Geomorphology*. Goiânia-GO.

CENSO POPULACIONAL 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – 29 de novembro de 2010. Acesso em maio de 2013.

CIRF, 2006, *La riqualificazione fluviale in Italia. Linee guida, strumenti ed esperienze per gestire i corsi d’acqua e il territorio*. A. Nardini, G. Sansoni (curatori) e collaboratori, Mazzanti Editori, Venezia.

CHIN, A., 2006, *Urban transformation of river landscapes in a global context*. *Geomorphology*, 79(3), 460–487.

CHOW, V.T., 1959, *Open Channel Hydraulics*. Nova York: Mc Graw-Hill Book Company.

CHRISTOFOLETTI, A., 1981, *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

COELHO NETTO, A.L.; FERNANDES, N.F.; DANTAS, M.E. *et al.*, 1994, “14C AMS evidences of two Holocene erosion-sedimentation cycles in SE Brasil: stratigraphy and stratigraphic inversions.” 14th Intern. Sedimentary Congress, IAS-Internat. Association of Sedimentologists, Recife: 28-30.

COELHO NETTO, A. L., 1998: “Diagnósticos de erosão para o planejamento regional: subsídios metodológicos sob enfoque geo-hidroecológicos”. *VI Simpósio Nacional de Controle da Erosão*, Presidente Prudentes, SP.

COELHO NETTO, A.L., 1999, "Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes." *Supplementi di Geografia* 162(III): 21–48.

COELHO NETTO, A.L., 2003, "Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): Bases para um Modelo de Formação e Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural." *Revista Brasileira de Geomorfologia*, MG-Brasil, v. 4, no. 2, 69-100p.

CONDEMA – Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente. São Carlos – SP, <http://www.saocarlos.sp.gov.br>. Acesso em março de 2013.

CUNHA, S.B., 2011, *Geomorfologia Fluvial*. In: Guerra A. J. T.; Cunha S. B (orgs): *Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

DANTAS, M.E., 1995, "Controles naturais e antropogênicos da estocagem diferencial de sedimentos fluviais: Bacia do Rio Bananal (SP/RJ), médio vale do Rio Paraíba do Sul". Dissertação de Mestrado. PPGG/IGEO/UFRJ. 142p.

DAVIS, W.M., 1899, *The geographical cycle*: Geographical Jour., v. 14, pp. 481-504.

DIRETRIZES PARA AS REGRAS DE OPERAÇÃO DE CONTROLE DE CHEIAS - BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CICLO 2010-2011), ONS RE 3/181/2010.

DOLLAR, E.S.J., 2004, Fluvial geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 28.3: 405-450.

DOYLE, M.W.; Shields, D.; Boyd, K. F *et al.*, (2007), Channel-forming discharge selection in river restoration design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(7), 831-837.

DRENURBS - Programa de Recuperação Ambiental do município de Belo Horizonte. Belo Horizonte – MG. Disponível em < <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh> >. Acesso em 2013.

DREW, D., 1986, *Processo interativos homem-meio ambiente*. Tradução João A. dos Santos. São Paulo: DIFEL.

ECRR - European Centre for River Restoration – Disponível em <<http://www.ecrr.org/>>. Acesso em maio de 2013.

FINDLAY, S.J.; TAYLOR, M.P. 2006, Why rehabilitate urban river systems?. Department of Physical Geography, Mcquarie University, NSW 2109, Australian.

- FISRWG, 1998, Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG) (15 Federal Agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN3/PT.653.
- GARCIA, J.I.B.; DIAS de PAIVA, E.M.C., 2003, *Análise das Áreas de Risco de Inundações Para Cenários Futuros em Uma Bacia Urbana*, UFSM, 18 p.
- GOOGLEEARTH. Imagens de satélite. 2003 e 2010. <http://www.google.com.br/permissions/geoguidelines.html>
- HIGGS, E., 2003, Nature by Design: People, Natural Process and Ecological Restoration. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, US.
- HOBBS, R.J. (2003) Ecological management and restoration: Assessment, setting goals and measuring success. *Ecological Management and Restoration* 4, 2–3.
- HOLMES, N.T.H. (1998) A Review of River Rehabilitation in the UK, 1990–1996. Technical Report W175. Environment Agency, Bristol, UK.
- HWANG, K., 2004, *Restoring Cheonggyecheon Stream in the Downtown Seul*. Disponível em <<http://www.globalrestorationnetwork.org>>. Acessado em 15 de Dezembro de 2012.
- IDÁRRAGA, F.L.F., 2010, *Urban river restoration in Colombia: viewed as whole in order to reduce hydraulic risk and pollution*. Tese de PhD. Politecnico di Milano.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Geociências. Departamento de Cartografia. Modelo Digital de Elevação: Projeto RJ-25: metadados. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <<ftp://geofp.ibge.gov.br/>>. Acesso em: fevereiro de 2012.
- INSTITUTO HISTÓRICO GEOGRÁFICO BRASILEIRO (IHGB), 1892, Mapa do Estado do Rio de Janeiro, Map.9, Gav.1. n.3.
- LANE, E.W., 1955, “The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering”, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* v. 81(745), pp 1-17.
- LANGENBACH, H., ECKART, J., SCHRÖDER, G., “Water Sensitive Urban Design – Results and Principles”. In: *Proceedings of the 3rd SWITCH Scientific Meeting*, Belo Horizonte, Brasil, 2008.

- LAWRENCE e PHILLIPS, 2006, Establishing Stormwater Management Targets to Protect Receiving Waters. In *Australian Runoff Quality: A Guide to Water Sensitive Urban Design*, Chapter 7 Wong, T. H. F.
- LEE, Y., 2005, Cheonggyechon Restoration and Urban Development. The International Workshop on Project Management. Japan.
- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T.Jr., 1953, "The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications", *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 252, 57 p.
- LEOPOLD, L.B., 1968, *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*, U.S. Geological Survey Circular 554, United States Department of Interior, Washington.
- LEUVEN, R.S.E.W.; POUDEVIGNE, I., 2002, Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment. *Freshwater Biology*, 47: 845–865. doi: 10.1046/j.1365-2427.2002.00918.
- LLOYD, S.; WONG, T.; CHESTERFIELD, C., 2002, Water Sensitive Urban Design-A Stormwater Management Perspective (Industry Report).
- MAAS, S.; BROOKES, A., 2009, *Fluvial geomorphology*. In: MAAS, S; BROOKES, A. Fluvial Design Guide. Inglaterra: Defra/EA Flood & Coastal Erosion Risk Management R&d Programme, p. 3-1 a 3-20.
- MAGALHÃES, L.P.C.; MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B. *et al.*, "Sistema HIDRO-FLU para Apoio a Projetos de Drenagem". In: *XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 2005, João Pessoa. Anais do XVI SBRH. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005
- MANUELZÃO. Página do projeto Manuelzão. Disponível em <http://www.manuelzao.ufmg.br/sobre_o_projeto/posicionamento/meta-2014>. Acesso em novembro de 2012.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G., 1998, "Modelação de Cheias Urbanas Através de um Esquema de Células de Escoamento", *IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Campina Grande, Brasil.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; 2002. "Urban Flood Control through a Mathematical Cell. In: *Water International Resources*", Vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Junho 2002; Illinois, E.U.A.

MEYER-PETER, E.; MÜLLER, R., 1948, "Formulas for bed-load transport." Proc., *2nd Meeting of the Int. Association for Hydraulic Structures Research*, International Association Hydraulic Research, Delft, Netherlands, 39–64.

MIGUEZ, M.G., 1994, *Modelação Matemática de Grandes Planícies de Inundação, através de um Esquema de Células de Escoamento, com Aplicação ao Pantanal Mato-Grossense*. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MIGUEZ, M.G., 2001, *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MIGUEZ, M.G., 2003, *Modelagem matemática de cheias urbanas, através de células de escoamento, como ferramenta na concepção de projetos integrados de combates às enchentes*. Relatório II – Apresentação da modelação topográfica e da topologia associada. PEC 4221 – Projeto CT-Hidro/GBH no 520093/2003-8.

MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, L.P.C. *et al.*, 2009, "Planning and Design of Urban Flood Control Measures: Assessing Effects Combination". *Journal of Urban Planning and Development*, v. 135, pp. 100-109.

MIGUEZ, M.G., MAGALHÃES, L.P.C., 2010, "Urban Flood Control, Simulation and Management: an Integrated Approach". In: Pina Filho, A. C., Pina, A. C. (eds), *Methods and Techniques in Urban Engineering*, 1 ed., chapter 10, India, Intech.

Modelação de Cheias Urbanas – Manual do Usuário do Modelo de Escoamento de Células de Escoamento, 2003, versão 5.0. UFRJ, Rio de Janeiro.

MORAES, D.C; Martins, F. de C.; Pádua, V.L. de, 2011, "Importância da mobilização social nos projetos de revitalização de rios no brasil e no mundo: o papel da educação ambiental". In: *26º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, Porto Alegre, Brasil, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011. p. 1 - 5. CD-ROM.

MORENO, P.A., 2011, *Requalificação de sistemas fluviais em ambiente urbano como instrumento de revitalização territorial*. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Perfil Ordenamento do Território e Avaliação de Impactes, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade Nova De Lisboa, Lisboa, Portugal.

MORISAWA, M. ,1985, *Rivers: form and process*. Longman. New York.

NARDINI, A.; PAVAN, S., 2012, "What river morphology after restoration? The methodology VALURI", *International Journal of River Basin Management*, DOI:10.1080/15715124.2011.640637

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1992, *Restoration of aquatic ecosystems: science, technology and public policy*. National Academy Press, Washington, D.C.
- PEREIRA, Isabela Labarrère Vieira, 2008, *Estudos De Revitalização De Cursos De Água – Trecho Experimental no Rio Das Velhas*. 122 f. Dissertação (Mestrado) - UFMG, Belo Horizonte.
- PFRAFSTETTER, O., 1957, *Chuvas Intensas no Brasil*. Departamento Nacional de Obras de Saneamento - DNOS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 419p.
- POMPÊO, C.A., 2000, “Drenagem Urbana Sustentável”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos: Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p.15-23.
- POMPÊO, C.A.; Rigotti, J.A.; Freitas Filho, M.D., 2011, “Urban Stream Condition Assessment”. In: *12nd International Conference on Urban Drainage*. Porto Alegre, Brasil: International Water Association, p. 1 - 7. CD-ROM.
- PROHIMET/CYTED/WMO, 2007, Documentos de divulgação In: Jornada Internacional Sobre Gestão de Riscos de Inundações e Deslizamentos, São Carlos, SP, 14 a 19 de maio.
- Revista "A Granja", 1931, Número I, Ano II de Setembro de 1931.
- RIBEIRO, L.B.F.; NICK, P.L.L., 2011, *Requalificação Fluvial Parcial X Barragem de Controle de Cheias: Medidas de mitigação para as enchentes no perímetro urbano da cidade de Resende–RJ*. Projeto de Graduação. Escola Politécnica - UFRJ, Rio de Janeiro.
- RIGOTTI, J.A.; POMPÊO, C.A., 2011, “Estudo de Revitalização de Cursos D’água: Bacia Hidrográfica do Futuro Campus UFSC”. In: *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, AL. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- RILEY, A. L., 1998, *Restoring Streams in Cities: A Guide for Planners, Policymakers, and Citizens*. Washington DC: Island Press.
- RINALDI, M.; GUMIERO, B.; MONACI, M. *et al.*, 2008, “The Panaro River (Northern Italy): Definition Of Possible Strategies For River Restoration”, *4th ECRR Conference on River Restoration Italy*, Venice S. Servolo Island.
- RITTER, D.F., KOCHER, R.C., MILLER, J.R., 1995, *Process Geomorphology*. 3 ed. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, IA.

River Restoration Centre, 2002, Manual of river restoration techniques, 415 Silsoe, U. K. – Disponível em <<http://www.therrc.co.uk/manual.php>> . Acesso em junho de 2011.

ROCHA LEÃO, O.M., 2005, *Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para recuperação de áreas degradadas com controle de erosão*. Tese de Doutorado. PPGG/IGEO/UFRJ. 247p.

ROSGEN, D. L., 1994, "A classification of natural rivers". *Catena* 22. p. 169 – 199.

ROSGEN, D.L., 2001. "A Stream Channel Stability Assessment Methodology," *7th Federal Interagency Sedimentation Conference*, March 25-29. Reno, Nevada.

ROSGEN, D. L., 2006, "The Natural Channel Design for River Restoration". *Proceedings of the 2006 World Environmental and Water Resources Congress*, May 21-25, 2006, Omaha, Nebraska.

RUTHERFURD, I.; JERIE, K.; MARSH, N., 2000, *A Rehabilitation Manual for Australian Streams*, Volume 2 Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.

SATO, A.M., 2008, *Respostas geo-hidroecológicas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água*. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SATO, A. M.; ABDALAD, M.A.; SILVA, A. P. A. *et al.*, 2009, "Bacia experimental do rio Sesmarias (médio vale do rio Paraíba do Sul): influência do eucalipto nos processos hidrológicos e erosivos". *Anais II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas*, Serviços Ambientais e Sustentabilidade, Taubaté, Brasil, IPABHi, pp. 415-422.

SARVAN, E., 2007, *Life in the City: Innovative solutions for Europe's urban environment*. Environment Directorate-General. Bruxelas.

SCHUMM S.A., 1977, *The fluvial system*. Wiley. New York. 338 pp.

SEAR, D.A.; NEWSON, M.D.; Thorne, C.R., 2003, *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology: R&D Technical Report FD1914*. London: Defra/environment Agency Flood And Coastal Defence R&d Programme, . 233 p.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMADS (Brasil), 2001, *ENCHENTES NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: Uma Abordagem Geral*. Rio de Janeiro: Projeto Planágua Semads / Gtz de Cooperação Técnica Brasil – Alemanha.

SHEN, H.W., 1971, *River Mechanics: Volume 1*. Fort Collins, USA, 1971. 623 p.

SILVA, T.M.D.; MONTEIRO, H.D.S.; CRUZ, M. A. *et al.*, 2006, “Anomalias de drenagem e evolução da paisagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP)”. *Anuário do Instituto de Geociências*, 29(2), 210-224.

SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972, *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, available from U. S. Government Printing Office, Washington D.C.

THORNE, C.R., 1997. Channel types and morphological classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Wiley, Chichester, UK, pp. 175–222.

TUCCI, C.E.M., 1993, *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 1 ed. São Paulo: Universidade Federal do Rio Grande do Sul / EDUSP.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L. e BARROS, M.T., 1995, *Drenagem Urbana*. UFRGS Porto Alegre, Ed.da Universidade/ABRH.

TUCCI, C. E. M., 2005, *Gestão das Águas Pluviais Urbanas: Saneamento para todos*, Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, Ministério das Cidades.

TUCCI, C.E.M., 2007, *Inundações Urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA.

VIEIRA da SILVA, R. C.; WILSON-JR., G., 2005, *Hidráulica Fluvial*, Volume II, COPPE/UFRJ, 256 p. Rio de Janeiro.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN R., 1997, *Hydrology – Water Quantity and Quality Control*. New York. John Wiley & Sons.

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

WILSON JR, G., “Estudo do Movimento Sedimentar em Escoamentos com Superfície Livre”. *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Água em Quantidade e Qualidade, o Desafio do Próximo Milênio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH*. Belo Horizonte, MG, 1999.

A) Apêndice 1

Trabalho de campo realizado no rio Sesmaria, para o levantamento de cinco seções transversais.



Figura A.1: Operação da estação total pelo Professor Virgílio.



Figura A.2: Levantamento da primeira seção transversal, com as alunas Luiza e Ana Caroline.



Figura A.3: Escolha do local para o levantamento da segunda seção transversal.

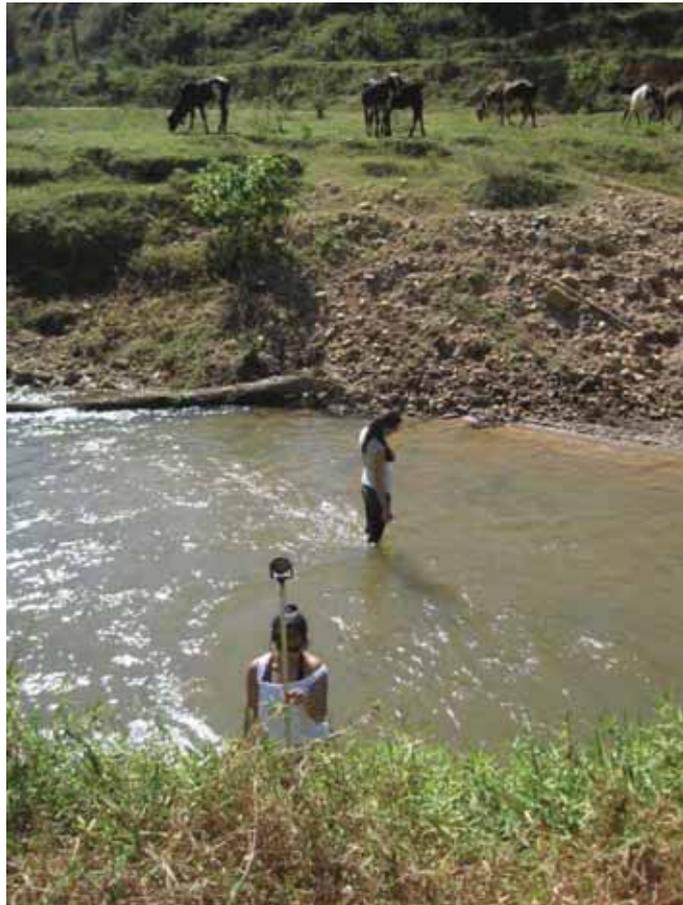


Figura A.4: Terceira seção transversal.



Figura A.5: Foto da quarta seção transversal.



Figura A.6: Levantamento da quinta seção transversal.

B) Apêndice 2



Figura B.1: Destorroamento da amostra após secagem em estufa.

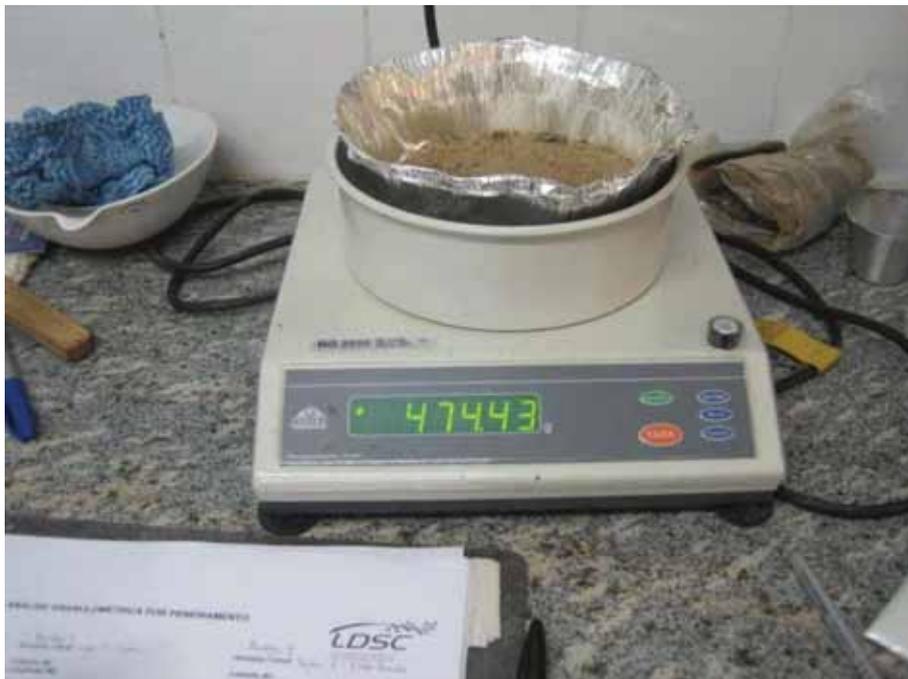


Figura B.2: Pesagem da amostra a ser peneirada.



Figura B.3: Jogo de peneiras no vibrador.



Figura B.4: Separação do sedimento retido em cada peneira, após 15 minutos no vibrador.



Figura B.5: Retirada de todos os sedimentos retidos na peneira.



Figura B.6: Retirada dos sedimentos retidos no prato para colocação do jogo de peneiras seguinte no vibrador.



Figura B.7: Separação dos sedimentos por peneira para serem pesados.

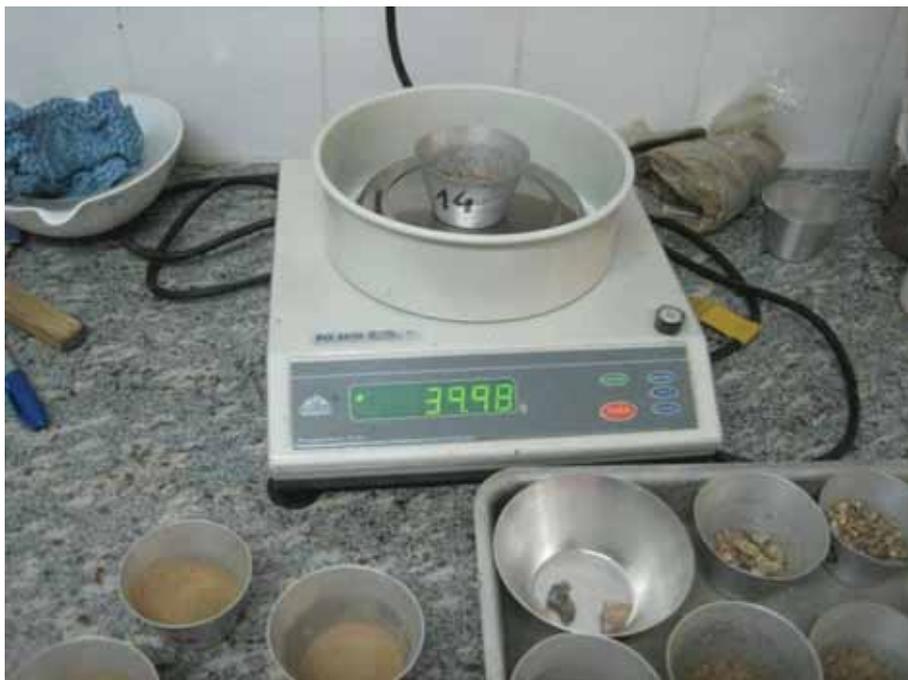


Figura B.8: Pesagem dos sedimentos retidos em cada peneira.

C) Apêndice 3

Descrição fotográfica dos trechos

A seguir é feita uma descrição, com análise de imagens de satélite e fotografias, dos 18 trechos geomorfológicos do rio Sesmaria.

As imagens de satélite, adquiridas através do aplicativo Google Earth, são dos anos de 2003 e 2010 e ambas são do período de estiagem (maio a agosto). As fotografias são de arquivo pessoal, obtidas durante as visitas feitas a bacia do Rio Sesmaria nos anos de 2011, 2012 e 2013.

As planícies de inundação, apresentadas por trecho, foram levantadas com o uso do programa ArcGis e do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia, adquirido através do sítio eletrônico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, representa o modelo numérico das características altimétricas da superfície, articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro. Abrange um quadrilátero geográfico de 07'30" de latitude por 07'30" de longitude. Os MDE's servem para determinar a superfície matemática, e a partir deles se podem conhecer aspectos tais como altura, declividade, perfis transversais, volumes, desníveis, áreas sujeitas a inundação e bacias hidrográficas (IBGE, 2012).

Trecho 1

Este trecho localiza-se próximo à foz do rio Sesmaria no rio Paraíba do Sul (Figura C.1). Configura uma área muito plana e densamente urbanizada, e, portanto, muito alterada em relação às condições originais e bastante suscetível às inundações. Na Figura C.2 observa-se a planície de inundação deste trecho. Não se considerou, nesta imagem, a planície de inundação do rio Paraíba do Sul, apenas a do rio Sesmaria. Destaca-se que esta área, mais a jusante na bacia, acaba por receber os efeitos de todas as alterações realizadas ao longo do tempo na bacia como um todo.

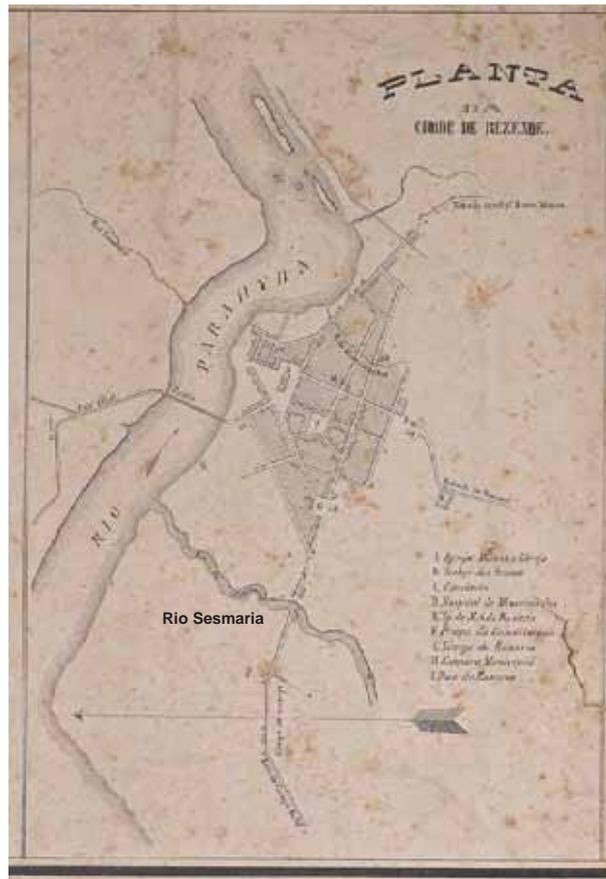


Figura C.3: Mapa de Resende do ano de 1861. Fonte: Biblioteca Nacional (RJ).



Figura C.4: Imagem de 1931 da cidade de Resende. A foz do rio Sesmaria, à direita da foto, não tinha ocupação das margens. Fonte: revista "A Granja", Número I, Ano II de Setembro de 1931.

Ao longo deste trecho há 4 pontes, 2 muros de contenção construídos recentemente (2012) e moradias margeando o rio e criando condições de restrição e fixação de pontos diversos em suas margens. A última grande enchente (dezembro de 2010) destruiu o muro e parte da área de lazer de um prédio localizado na margem direita do rio, próximo à foz (Figura C.5). Esta mesma enchente também comprometeu uma das pontes, que precisou de reparos (Figura C.6), e destruiu parcialmente uma rua, arrancando árvores e parte do calçamento, pela margem esquerda, e descalçou fundações de casas na margem direita.



Figura C.5: Estrago provocado pela última enchente no rio Sesmaria que destruiu a quadra de um prédio, localizado na margem direita.



Figura C.6: Ponte que teve sua estrutura comprometida após enchente em dezembro de 2010.
Fonte: Site Renova Resende.

A vegetação é muito escassa neste trecho, principalmente devido às construções que ocupam o lugar da mata ciliar.

Foi calculada, com fórmula de Manning, a vazão de *bankfull* para a seção considerada para o trecho 1 e, com o uso do MODCEL, foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.1. Como se pode observar, a vazão de *bankfull* para este trecho é menor do que a vazão encontrada para o tempo de recorrência de 1 ano.

Tabela C.1: Vazão de *bankfull* calculada e vazões obtidas com o MODCEL para diversos tempos de recorrência.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
25.73	29.97	35.75	43.66	49.13	53.29	54.49	59.35	64.73

Analisando comparativamente imagens de satélite de 2003 e 2010 (Figura C.7 e Figura C.8), do aplicativo Google Earth, foi possível observar o alargamento da calha em vários pontos ao longo do trecho. Isto pode ser visto com maior detalhe na Figura C.9, Figura C.10,

Figura C.11 e Figura C.12. Este processo erosivo, que causa o alargamento da calha fluvial, provavelmente constitui um processo de resposta do rio, para atingir o novo estado de equilíbrio, decorrente das intensas transformações ambientais que ocorreram na bacia, tais como o desmatamento da mata nativa e o cultivo intensivo do café.



Figura C.7: Imagem de 2003 do trecho 1. Fonte: Google Earth.

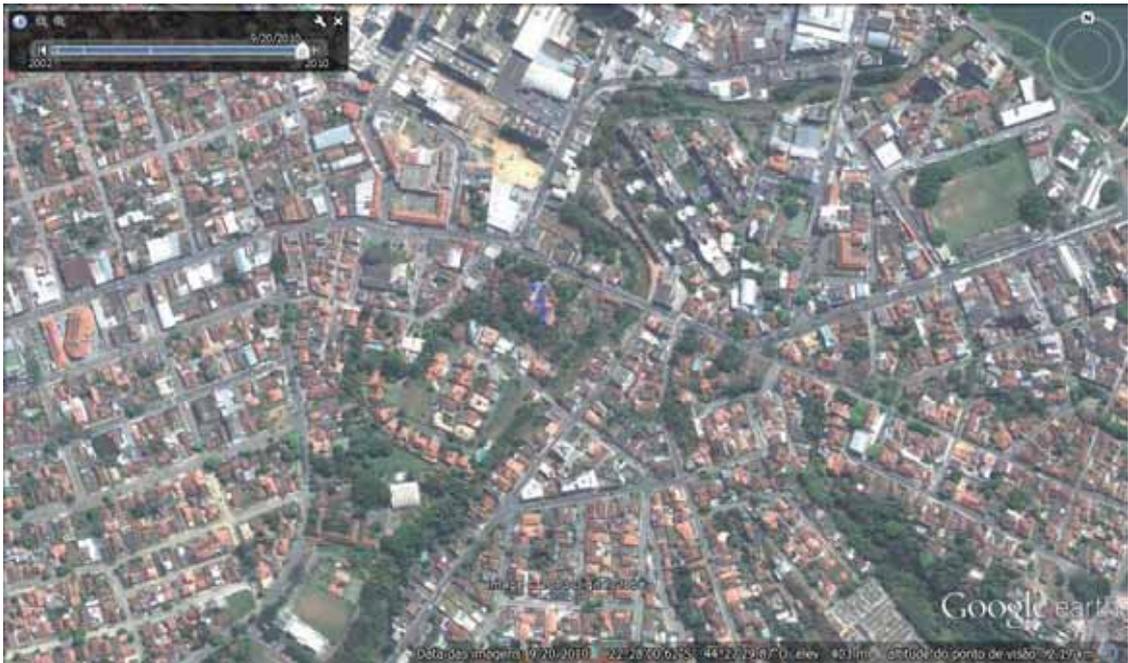


Figura C.8: Imagem de 2010 do trecho 1. Fonte: Google Earth



Figura C.9: Imagem de 2003 de parte do trecho 1, indicando um dos pontos onde houve alargamento da calha fluvial. Fonte: Google Earth.

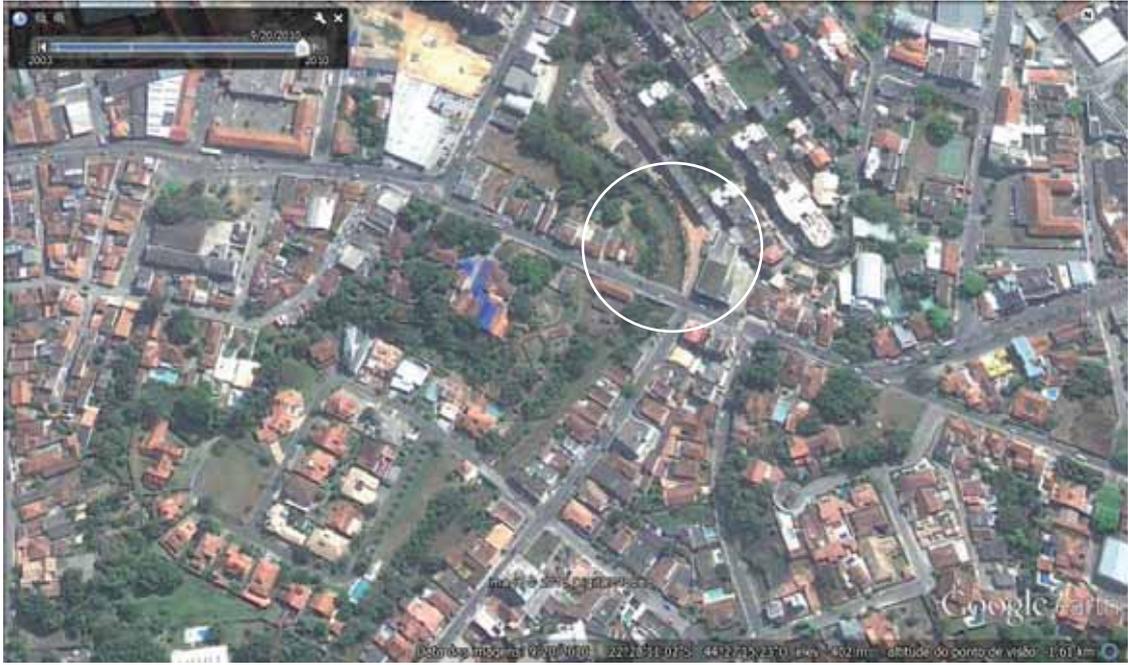


Figura C.10: Imagem de 2010 de parte do trecho 1, indicando um dos pontos onde houve alargamento da calha fluvial. Fonte: Google Earth.



Figura C.11: Imagem de 2003 da parte final do trecho, já na foz do rio Sesmária. Fonte: Google Earth.



Figura C.12: Imagem de 2010 da parte final do trecho, já na foz do rio Sesmária, indicando alargamento da calha. Fonte: Google Earth.

Trecho 2

Este trecho também se encontra bastante ocupado; no entanto, quando comparado ao trecho 1, suas margens estão mais livres e com mais vegetação (Figura C.13). Configura um trecho mais sinuoso e com grandes áreas propensas a inundações (Figura C.14).



Figura C.13: Imagem mostrando o trecho 2. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.



Figura C.14: Planície de inundação do trecho 2.

Como pontos de controle, há uma ponte ao longo deste trecho, e muros de contenção para impedir a erosão das margens do rio, construídos recentemente (Figura C.15).



Figura C.15: Um dos muros construídos ao longo deste trecho. **A:** Olhando para montante. **B:** Olhando para jusante.

Utilizando fórmula de Manning, foi calculada a vazão de *bankfull* para a seção considerada e com o uso do MODCEL foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.2.

Tabela C.2: Vazão de *bankfull* calculada e vazões obtidas com o MODCEL para diversos tempos de recorrência

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
27.77	29.96	35.54	42.34	43.70	43.24	43.25	44.30	44.91

Observaram-se imagens de 2003 e de 2010 deste trecho, na busca por mudanças recentes no rio (Figura C.16 e Figura C.17). Foram identificados pontos onde houve alargamento da calha, como pode ser visto com maior detalhe na Figura C.18, Figura C.19, Figura C.20 e Figura C.21. Isto indica possível processo erosivo ativo na calha, que por receber grande carga sedimentar e se encontrar com margens razoavelmente desprovidas de vegetação, tem maior propensão à erosão. Isto também indica que o transporte por arraste é maior.

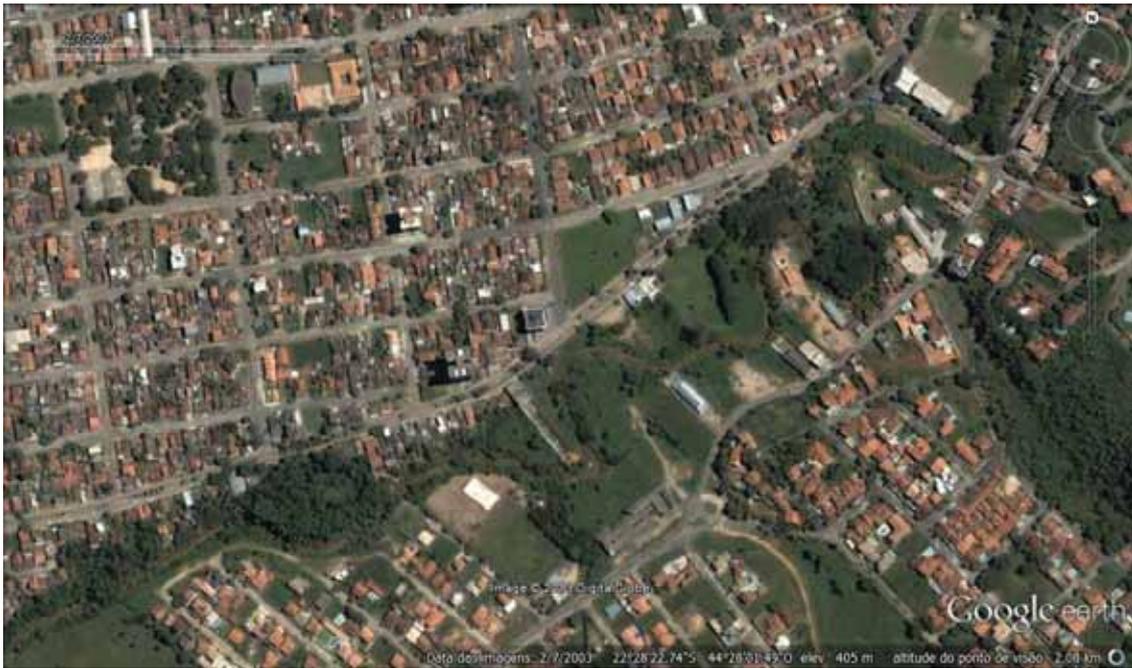


Figura C.16: Imagem de 2003 do trecho 2. Fonte: Google Earth.



Figura C.17: Imagem de 2010 do trecho 2. Fonte: Google Earth.

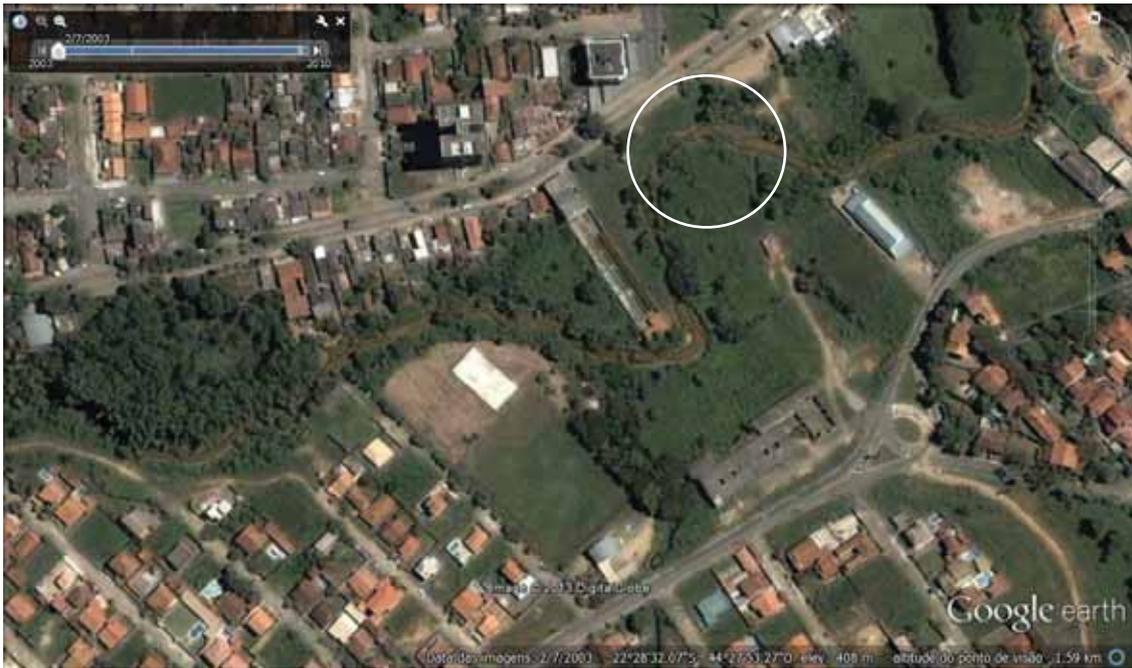


Figura C.18: Imagem de 2003 da parte inicial do trecho 2, indicando ponto onde houve alargamento da calha do rio. Fonte: Google Earth.



Figura C.19: Imagem de 2010 da parte inicial do trecho 2, indicando ponto onde houve alargamento da calha do rio. Fonte: Google Earth.



Figura C.20: Imagem de 2003 da parte central do trecho 2. Fonte: Google Earth.



Figura C.21: Imagem de 2010 da parte central do trecho 2. Fonte: Google Earth.

Trecho 3

Este trecho, localizado ainda na área urbana da bacia (Figura C.22), possui pouca vegetação nas margens. É um trecho com menor densidade de construções e de baixa a moderada sinuosidade. Por se tratar de uma região plana, também é um trecho onde há grande probabilidade de inundação. A planície de inundação deste trecho pode ser vista na Figura C.23, em azul.



Figura C.22: IMAGEM MOSTRANDO O TRECHO 3. A seta indica a direção do fluxo. FONTE: GOOGLE EARTH.



Figura C.23: Planície de inundação do trecho 3.

O rio parece que já se movimentou ao longo do tempo, nas planícies deste trecho, devido às marcas no solo, como pode ser visto com maior detalhe na Figura C.24.



Figura C.24: Paleo canal visto com detalhe. Fonte: Google Earth.

Como pontos fixos neste trecho, estão as casas que margeiam e fixam a calha do rio em alguns pontos

Para a seção do trecho 3, foi calculada, com fórmula de Manning, a vazão de *bankfull*. Foram obtidas também vazões para diversos tempos de recorrência com o uso do MODCEL. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela C.3. Observa-se que a vazão de *bankfull* para este trecho é menor do que a vazão obtida para o tempo de recorrência de 1 ano.

Tabela C.3: Vazão de *bankfull* calculada e vazões obtidas com o MODCEL para diversos tempos de recorrência

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
19.28	20.14	22.14	24.14	25.52	26.57	26.86	28.05	29.46

Buscando modificações recentes neste trecho foram analisadas imagens de satélite, do aplicativo Google Earth, num período de 7 anos, de 2003 a 2010 (Figura C.25 e Figura C.26). Observou-se o aumento na ocupação de moradias na margem esquerda do rio e o início de construções na margem direita, que atualmente já está em um estágio mais avançado. Como nos trechos anteriores, também foi possível identificar o alargamento da calha fluvial em alguns pontos, principalmente em trechos mais sinuosos (Figura C.27 e Figura C.28).



Figura C.25: Imagem de 2003 do trecho 3. Fonte: Google Earth.



Figura C.26: Imagem de 2010 do trecho 3. Fonte: Google Earth.



Figura C.27: Imagem de 2003 de parte do trecho 3, mostrando o alargamento da calha em trechos mais sinuosos. Fonte: Google Earth.



Figura C.28: Imagem de 2010 de parte do trecho 3, mostrando o alargamento da calha em trechos mais sinuosos. Fonte: Google Earth.

Em visitas de campo à bacia foi possível notar pontos de erosão (Figura C.29 e Figura C.30) em ambas as margens do rio.



Figura C.29: Erosão no trecho 3, na margem esquerda do rio.



Figura C.30: Erosão fluvial na margem direita do rio no trecho 3.

Trecho 4

Este trecho está localizado em uma área rural, com poucas construções (Figura C.31). Configura uma região mais montanhosa e com bolsões de várzeas ocasionais, como pode ser visto na Figura C.32. A vegetação é caracterizada pela predominância de gramínea e alguns resquícios de floresta.

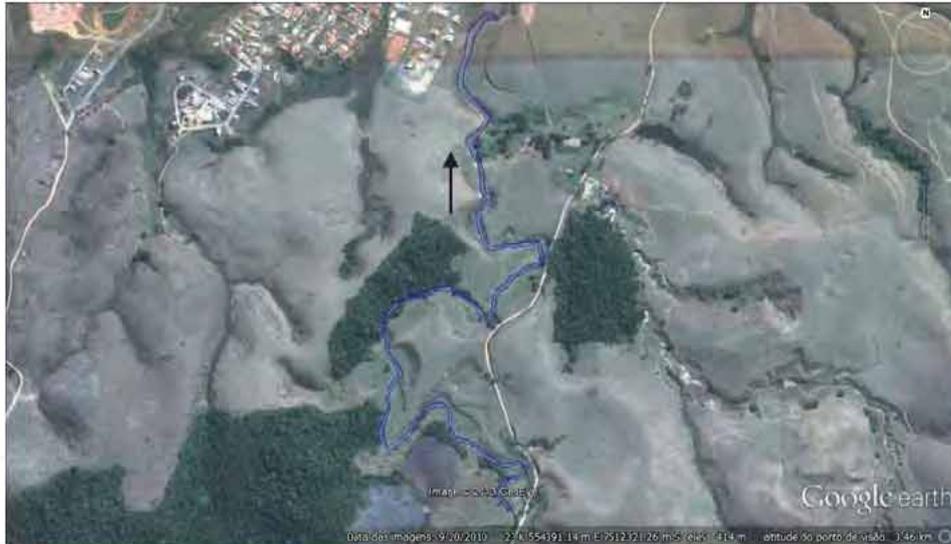


Figura C.31: Imagem mostrando o trecho 4. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.



Figura C.32: Bolsões de várzea ocasionais.

Para a seção transversal considerada para o trecho 4, calculou-se a vazão de *bankfull*, com o uso da fórmula de Manning, e foram obtidas vazões, com o uso do programa MODCEL, para diversos tempos de recorrência (1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos). As vazões obtidas estão apresentadas na Tabela C.4.

Tabela C.4: Vazão de *bankfull* e vazões obtidas com o MODCEL para diversos tempos de recorrência.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
4	26.34	29.71	34.03	38.71	41.95	42.06	43.09	47.17	51.32

Imagens de satélite permitiram observar mudanças na calha do rio entre os anos de 2003 e 2010. A Figura C.33 e a Figura C.34 apresentam todo o trecho 4. Na Figura C.35 e na Figura C.36, observa-se que, na imagem de 2010 (Figura C.36), houve o alargamento da calha fluvial ao longo de quase todo o trecho, assim como na Figura C.37, na Figura C.38, na Figura C.39 e na Figura C.40. Na Figura C.36, além do alargamento da calha, observa-se também o surgimento de ilhas em 2010, como pode ser visto com maior detalhe na Figura C.41. Isso provavelmente ocorreu devido a um incremento no volume de sedimentos arrastados e por este trecho ser uma zona de deposição, devido à menor declividade.



Figura C.33: Imagem de 2003 do trecho 4.



Figura C.34: Imagem de 2010 do trecho 4.



Figura C.35: Imagem de 2003 da parte inicial do trecho 4. Fonte: Google Earth.



Figura C.36: Imagem de 2010 da parte inicial do trecho 4, mostrando as ilhas que se formaram. Fonte: Google Earth.

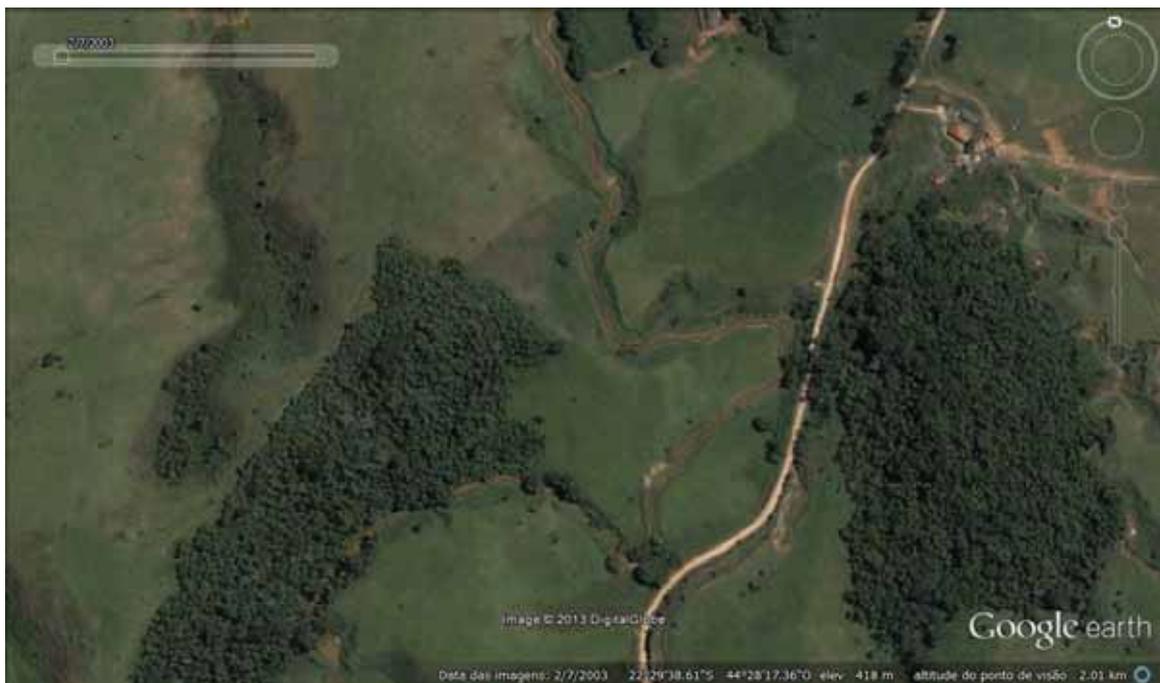


Figura C.37: Imagem de 2003 da parte média do trecho 4. Fonte: Google Earth.



Figura C.38: Imagem de 2010 da parte média do trecho 4. Fonte: Google Earth



Figura C.39: Imagem de 2003 e de 2010 da parte final do trecho 4. Fonte: Google Earth.



Figura C.40: Imagem de 2010 da parte final do trecho 4. Fonte: Google Earth.



Figura C.41: Imagem de 2010 mostrando as ilhas formadas no trecho 4. Fonte: Google Earth.

Em visitas de campo ao trecho 4, foram observados pontos de forte erosão (Figura C.42 e Figura C.43) e, posteriormente, imagens do recurso *street view* do programa Google Earth permitiram concluir que se tratava de erosão iniciada por ação antrópica, como pode ser observado na Figura C.44. A retirada de areia das margens do rio provocou uma grave erosão, levando sedimentos para o leito do rio e provocando o assoreamento deste trecho. A ação antrópica pode acelerar a mudança na morfologia do canal, ocasionando danos ao meio ambiente, por causa do repentino desequilíbrio de sedimentos.



Figura C.42: Processo de erosão iniciado pela ação antrópica.



Figura C.43: Fotografia de um ponto do trecho 4, que mostra a erosão provocada por ação antrópica.



Figura C.44: Retirada de areia das margens do rio, iniciando um grave processo de erosão. Fonte: Google Earth.

Trecho 5

Este trecho é também um trecho localizado na área rural, com praticamente nenhuma construção. A vegetação predominante é a gramínea, mas pode-se observar alguns resquícios de floresta (Figura C.45).



Figura C.45: Imagem mostrando o trecho 5. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

Na Figura C.46 percebe-se que se trata de um trecho de planície descontínua sinuosa. Neste trecho o rio apresenta sinuosidade moderada a alta.



Figura C.46: Planície descontínua sinuosa.

O ponto fixo identificado neste trecho é uma ponte estreita, típica de áreas rurais. A Figura C.47 mostra uma foto tirada da única ponte deste trecho.



Figura C.47: Foto tirada da ponte localizada no trecho 5.

A vazão de *bankfull*, obtida para este trecho, e as vazões obtidas com a modelagem estão apresentadas na Tabela C.5. Para o cálculo da vazão de *bankfull* utilizou-se a fórmula de Manning, e para as vazões obtidas para diferentes recorrências utilizou-se o programa MODCEL (com tempos de recorrência de chuva de 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos).

Tabela C.5: Vazões para o trecho 5.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
5	11.68	25.65	28.34	31.78	34.38	36.05	36.42	38.78	41.94

Imagens de satélite do aplicativo Google Earth permitiram observar que, entre os anos de 2003 e 2010, houve a erosão das margens e o consequente alargamento do canal, como pode ser visto na Figura C.48 e na Figura C.49, de maneira geral, e na Figura C.50, Figura C.51, Figura C.52, Figura C.53, Figura C.54 e Figura C.55, com maior detalhe. A maior susceptibilidade de erosão das margens, pela presença de sedimentos arrastados, de forma significativa, associada à falta de vegetação ciliar e à ação de um escoamento líquido com vazão efetiva de ocorrência frequente, contribuiu para a retirada dos sedimentos da base, o que fez minar a sustentação das margens, ocasionando o seu solapamento. A falta de vegetação contribuiu para a instabilidade da

margem, favorecendo a atuação da erosão fluvial. A Figura C.56 e a Figura C.57 mostram um dos pontos do trecho 5 onde é possível ver a erosão da margem.



Figura C.48: Imagem de 2003, mostrando todo o trecho 5. Fonte: Google Earth.



Figura C.49: Imagem de 2010, mostrando todo o trecho 5. Fonte: Google Earth.

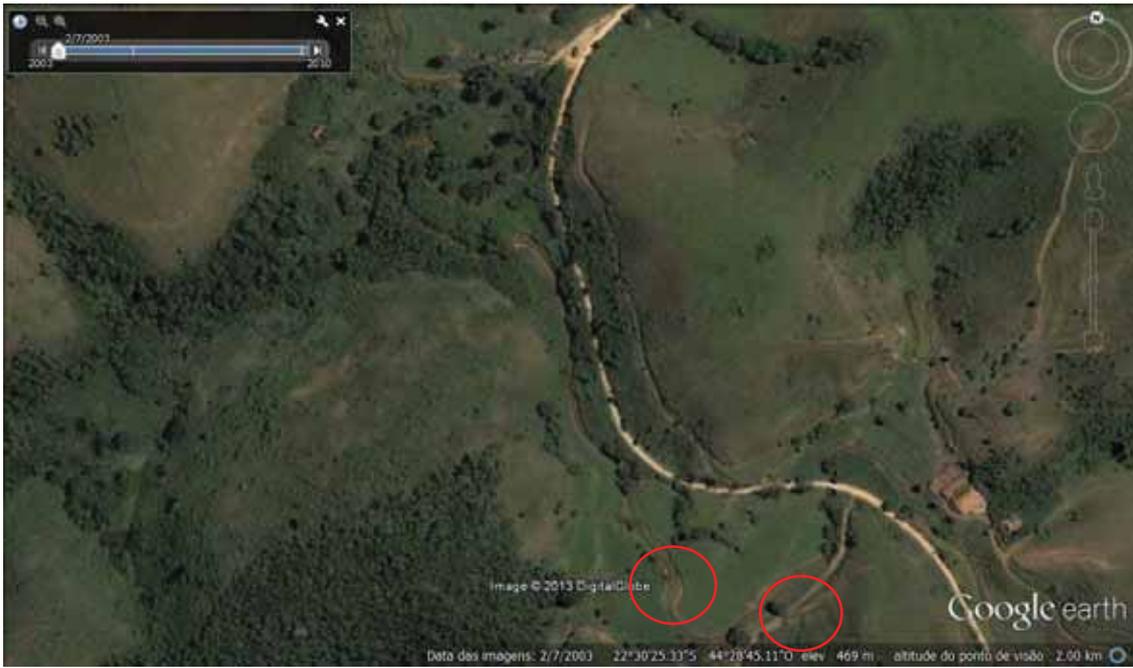


Figura C.50: Imagem de 2003, mostrando parte do trecho 5 e indicando pontos de alargamento da calha. Fonte: Google Earth.



Figura C.51: Imagem de 2010, mostrando parte do trecho 5 e indicando pontos de alargamento da calha. Fonte: Google Earth.

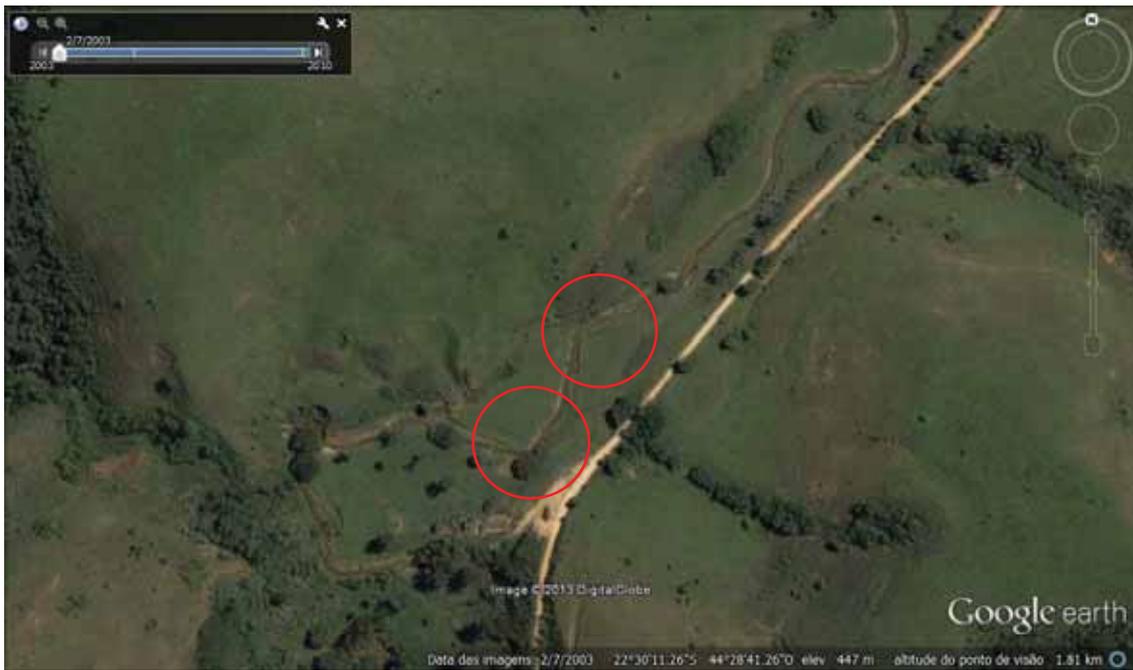


Figura C.52: Imagem de 2003, mostrando parte do trecho 5 e indicando pontos de alargamento da calha. Fonte: Google Earth.



Figura C.53: Imagem de 2010, mostrando parte do trecho 5 e indicando pontos de alargamento da calha. Fonte: Google Earth.



Figura C.54: Imagem de 2003, mostrando parte do trecho 5. Fonte: Google Earth.



Figura C.55: Imagem de 2010, mostrando parte do trecho 5. Fonte: Google Earth.



Figura C.56: Fotografia mostrando a erosão da margem do rio Sesmaria, olhando para montante.



Figura C.57: Fotografia mostrando a erosão na margem do rio Sesmaria, olhando para jusante.

Trecho 6

O trecho 6 é um trecho encaixado, com praticamente nenhuma vegetação mais densa nas margens do rio (Figura C.58). A vegetação predominante neste trecho é a gramínea. É um trecho localizado na área rural da bacia do rio Sesmaria.



Figura C.58: IMAGEM MOSTRANDO O TRECHO 6. A seta indica a direção do fluxo. FONTE: GOOGLE EARTH.

Por ser um trecho encaixado, possui apenas algumas áreas inundáveis, que podem ser considerados bolsões de várzea (Figura C.59).



Figura C.59: Bolsões de várzea referentes ao trecho 6. FONTE: GOOGLE EARTH.

Recentemente, foi feita uma obra para alargamento da estrada e todo o sedimento retirado da estrada foi lançado próximo ao rio, como pode ser visto na Figura C.60.



Figura C.60: Fotografia que mostra a proximidade dos sedimentos retirados da estrada ao rio Sesmaria.

Não há pontos fixos neste trecho além da estrada, localizada próximo à margem esquerda do rio.

Para a seção levantada em campo para este trecho, foi calculada a vazão de *bankfull*, com fórmula de Manning. Com os dados da bacia hidrográfica e o programa MODCEL, foram obtidas vazões para os tempos de recorrência de 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela C.6.

Tabela C.6: Vazões obtidas para o trecho 6.

Trecho	Q _{bank} (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
6	11.38	21.12	23.13	24.83	25.64	26.61	26.92	28.06	29.38

Analisando comparativamente imagens de satélite, através do aplicativo Google Earth, dos anos de 2003 e 2010, foi possível observar que, assim como nos trechos anteriores, a mudança recente mais significativa foi a erosão das margens do rio e o consequente alargamento da calha. Esta mudança pode ser vista na Figura C.61 e na Figura C.62. A Figura C.63 e a Figura C.64 apresentam uma parte do trecho com maior detalhe.



Figura C.61: Imagem de 2003 do trecho 6, com indicação de um dos pontos onde houve alargamento da calha provocado por erosão da margem. Fonte: Google Earth.



Figura C.62: Imagem de 2010 do trecho 6, com indicação de um dos pontos onde houve alargamento da calha provocado por erosão da margem. Fonte: Google Earth.

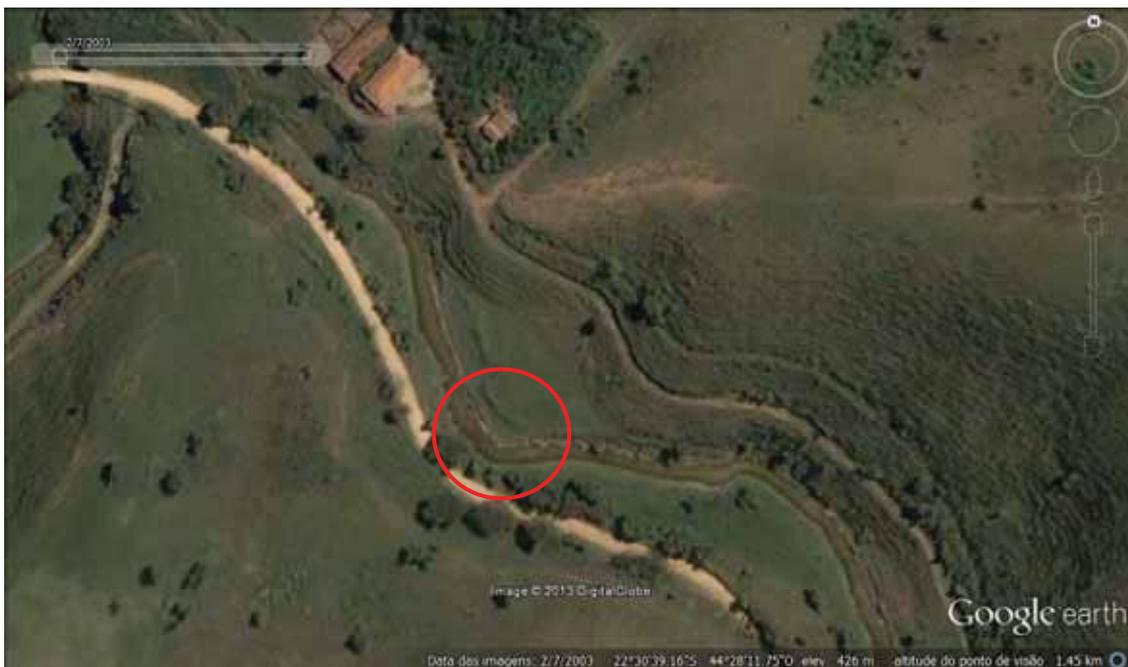


Figura C.63: Imagem de 2003, com maior detalhe do trecho. Fonte: Google Earth.



Figura C.64: Imagem de 2010, com maior detalhe do trecho. Fonte: Google Earth.

Visitas de campo permitiram registrar pontos onde houve erosão da margem do rio (Figura C.65 e Figura C.66). Por se tratar de um trecho encaixado, provavelmente não houve grande mudança em relação ao período pré-desmatamento, além da elevação do leito do rio.



Figura C.65: Ponto do trecho 6 onde houve erosão da margem direita.

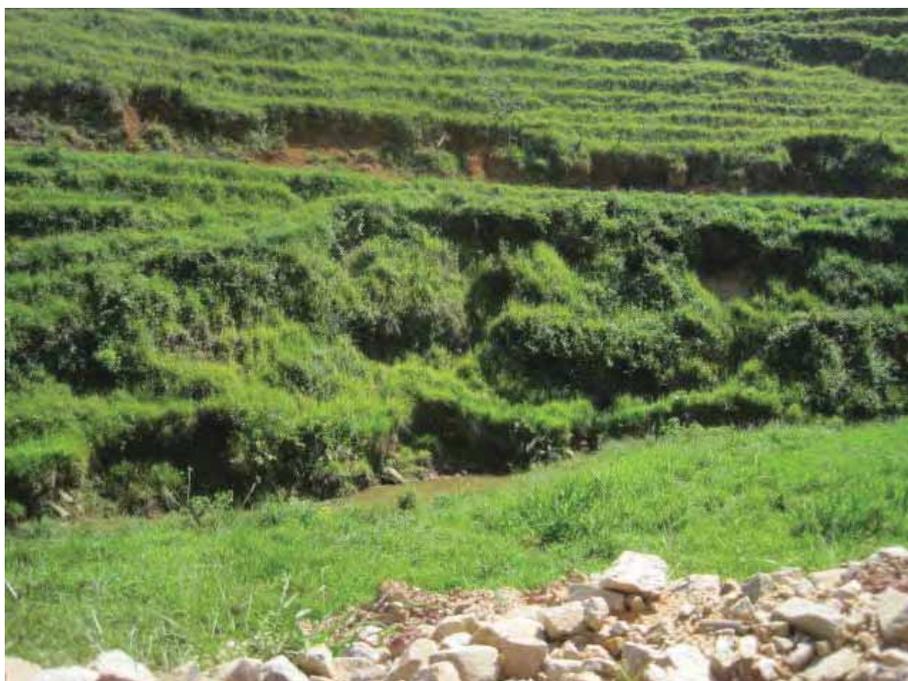


Figura C.66: Fotografia que mostra os sedimentos retirados da estrada, na margem esquerda, e erosão na margem direita.

A Figura C.67 mostra outro ponto do trecho 6 onde é possível observar, além da erosão das margens, a presença de uma árvore que foi carregada, provavelmente, na última cheia do rio Sesmaria.



Figura C.67: Ponto do trecho 6 onde há uma árvore que foi carregada na última cheia.

Trecho 7

O trecho 7 também está localizado na área rural da bacia (Figura C.68). A vegetação predominante é a gramínea, também presente nas margens, repetindo a situação dos trechos anteriores.



Figura C.68: Imagem mostrando o trecho 7. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

Na Figura C.69 pode-se verificar que é um trecho de planície descontínua.

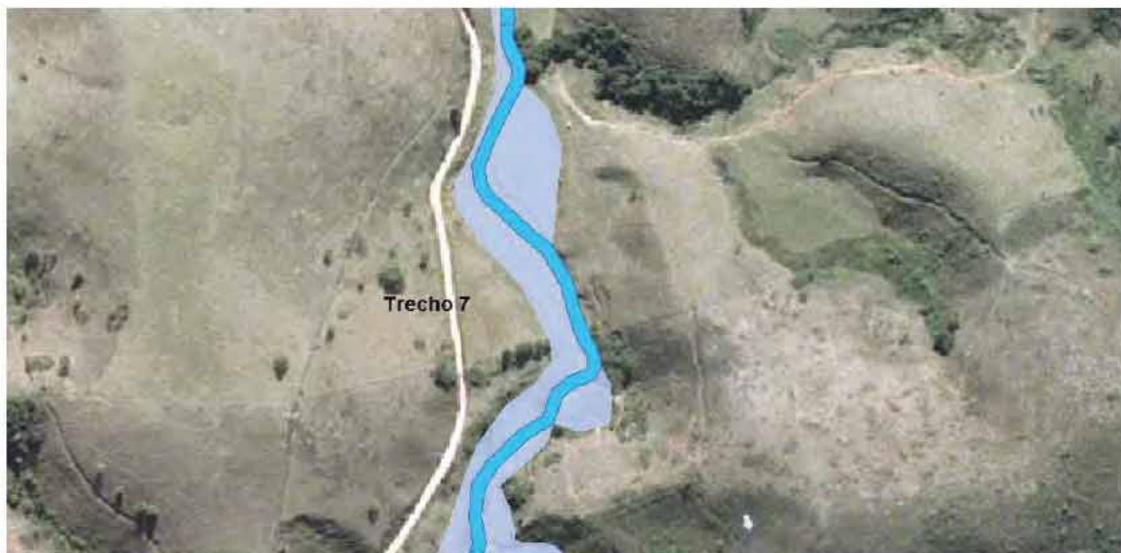


Figura C.69: Planície descontínua sinuosa referente ao trecho 7. Fonte: Google Earth.

Foi calculada, com fórmula de Manning, a vazão de *bankfull* para a seção considerada e com o uso do MODCEL foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.7. Neste trecho, a vazão

de *bankfull* é menor do que a vazão obtida para uma chuva com tempo de recorrência de 1 ano.

Tabela C.7: Vazões obtidas para o trecho 7.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
7	13.08	28.13	31.91	36.12	38.69	40.32	40.73	42.81	45.21

A estrada que passa próximo à margem esquerda limita o espaço do rio, mas não há pontos fixos neste trecho. Também não são avistadas construções.

A Figura C.70 e a Figura C.71 apresentam imagens de satélite dos anos de 2003 e de 2010 do trecho 7. Uma análise comparativa permite observar que houve erosão das margens, o que provocou o alargamento do canal em vários pontos. Isto tem acontecido nos demais trechos analisados, o que pode indicar que houve um aumento da vazão sólida arrastada e que há transporte sólido significativo para tempos de recorrência menores que 1 ano, conforme foi exposto na descrição geral, no item vazão efetiva x vazão de *bankfull*. Também pode estar relacionado a um aumento na vazão líquida, que é a responsável pelo transporte dos sedimentos.

A Figura C.72 mostra uma imagem do recurso *street view* do aplicativo Google Earth, onde é possível visualizar a erosão das margens. O pé da margem está sendo submetido a fortes erosões, sobretudo nas zonas inferiores que sustentam o talude.



Figura C.70: Imagem de 2003 do trecho 7. Fonte: Google Earth.



Figura C.71: Imagem de 2010 do trecho 7. Fonte: Google Earth.



Figura C.72: Imagem do recurso street view do Google Earth que mostra a erosão das margens. Vista de montante do rio.

Trecho 8

O trecho 8 é um trecho de sinuosidade moderada a alta, localizado em área rural. Apesar de a vegetação predominante ser a gramínea, quando comparado aos trechos anteriores, este trecho apresenta maior quantidade de áreas com resquícios de floresta, como é possível ver na Figura C.73.

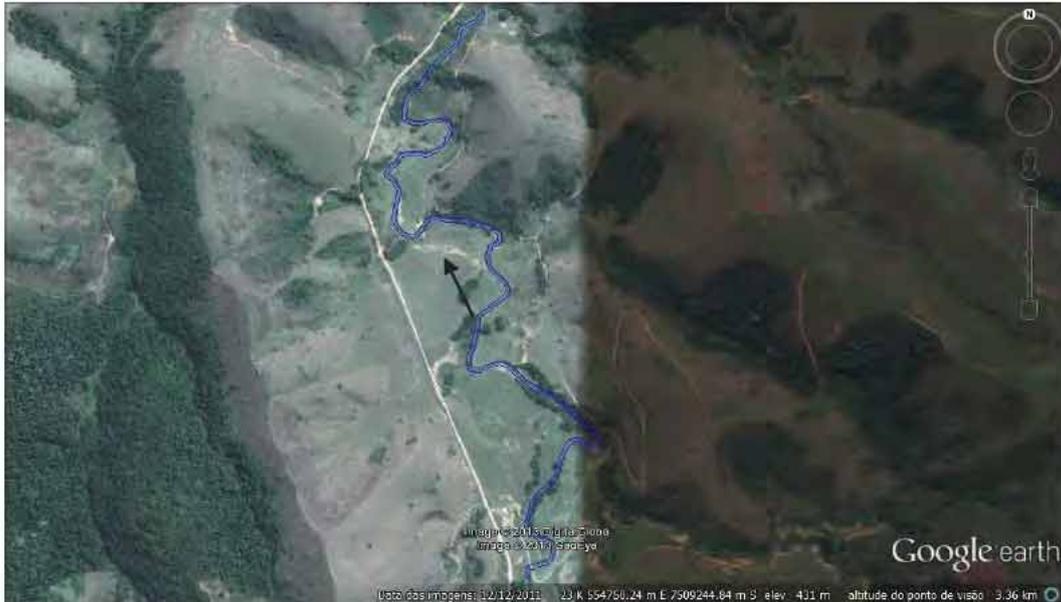


Figura C.73: Imagem mostrando o trecho 8. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

A planície de inundação deste trecho pode ser vista na Figura C.74. Esta planície acompanha o curso sinuoso do rio.

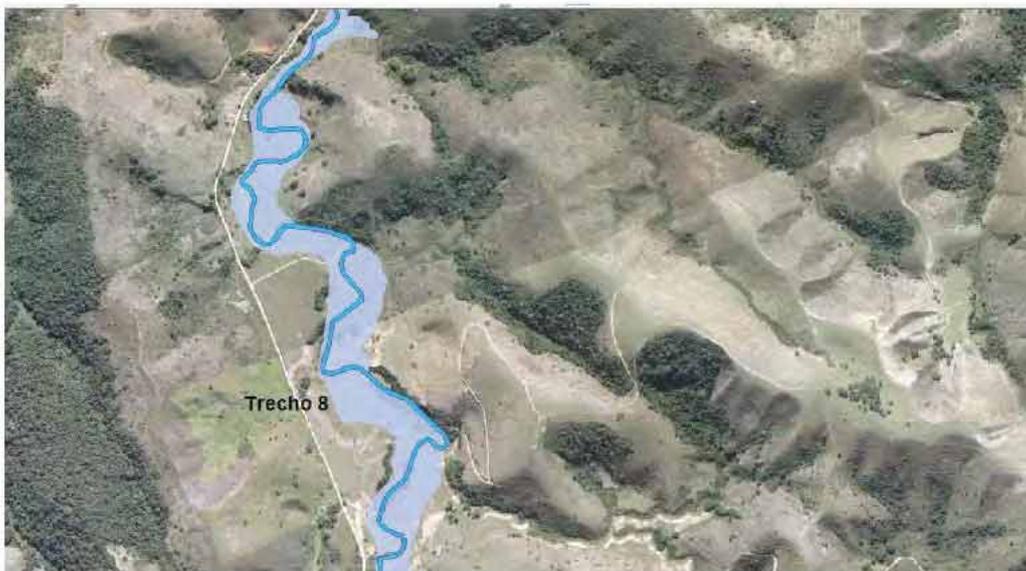


Figura C.74: Planície descontínua sinuosa referente ao trecho 8.

Para o trecho 8 foram obtidas vazões para diversos tempos de recorrência com o uso do MODCEL e a vazão de *bankfull* foi calculada com fórmula de Manning. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela C.8.

Tabela C.8: Vazões obtidas para o trecho 8.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
8	10.01	19.25	20.82	22.66	24.36	26.27	26.88	29.24	31.92

Como pontos fixos neste trecho, há uma ponte estreita de madeira, localizada no limite entre os trechos 8 e 9. Além da ponte, há a estrada, que em alguns pontos passa muito próximo ao rio Sesmaria.

Este trecho não se comportou diferente dos anteriores. Como se pode observar nas imagens do aplicativo Google Earth, dos anos de 2003 e 2010. Na Figura C.75 e na Figura C.76 aparece todo o trecho 8. Na Figura C.77 e na Figura C.78 aparece uma parte do trecho com maior detalhe, indicando o ponto onde se observou o alargamento da calha do rio devido à erosão das margens.



Figura C.75: Imagem de 2003 do trecho 8. Fonte: Google Earth.



Figura C.76: Imagem de 2010 do trecho 8. Fonte: Google Earth.

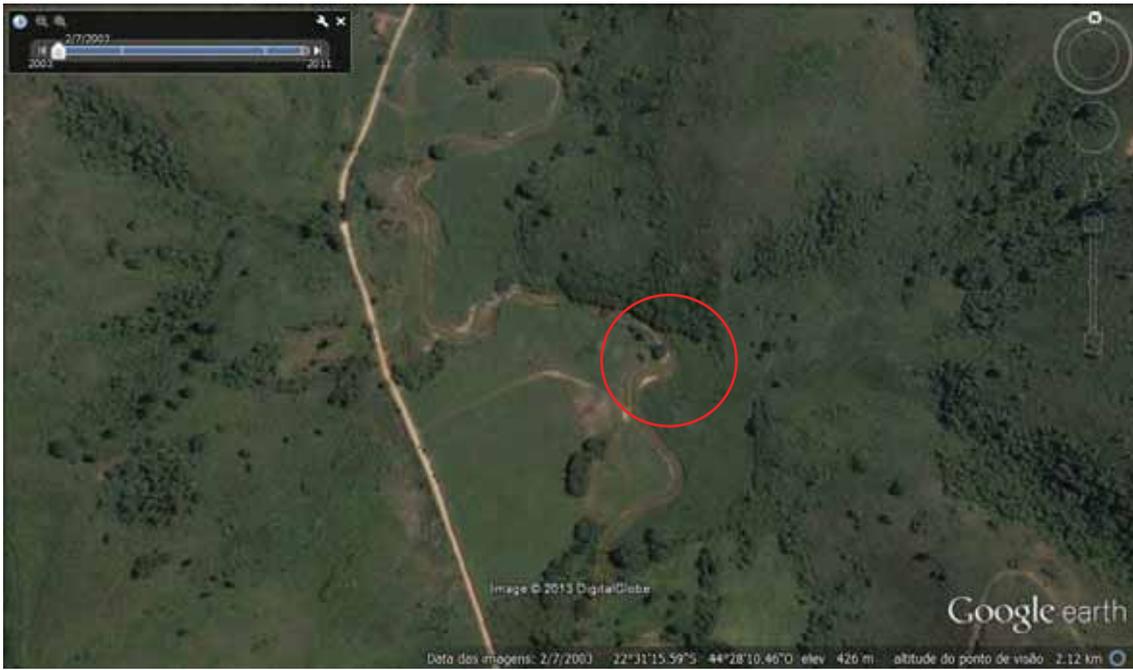


Figura C.77: Imagem de 2003 do trecho 8, com maior detalhe onde se observou o alargamento do canal. Fonte: Google Earth

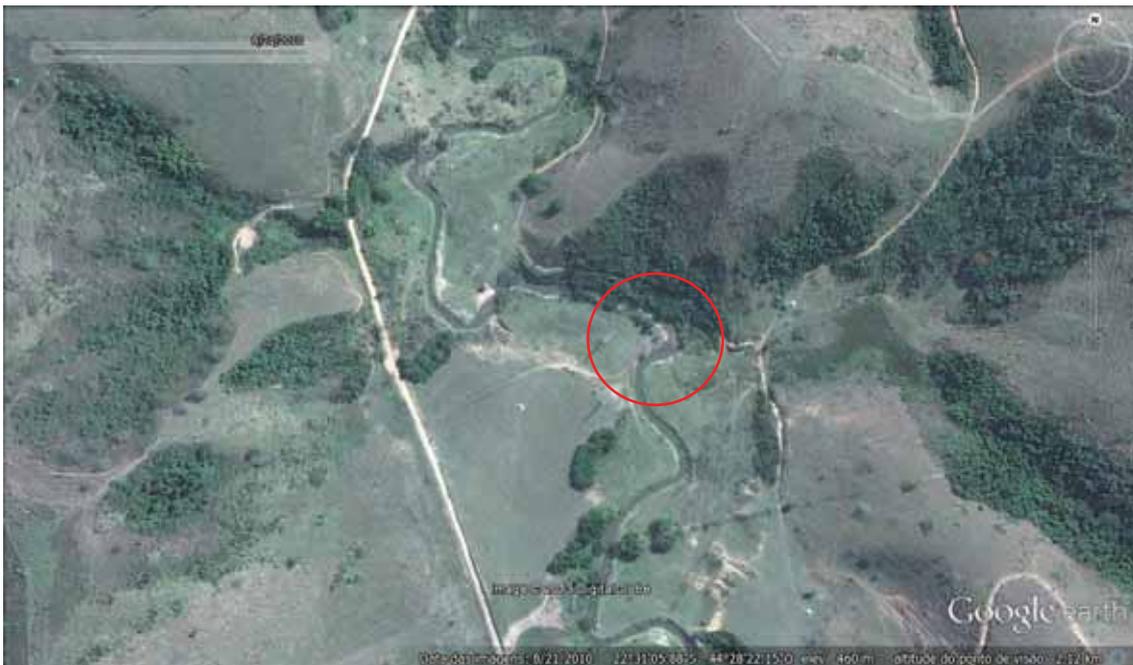


Figura C.78: Imagem de 2010 do trecho 8, com maior detalhe onde se observou o alargamento do canal. Fonte: Google Earth

Na Figura C.79 pode-se observar um dos pontos de erosão da margem do rio Sesmaria no trecho 8.



Figura C.79: Fotografia do trecho 8, indicando erosão da margem.

Trecho 9

O trecho 9 (Figura C.80), localizado na parte rural da bacia, tem como vegetação predominante a gramínea. Apresenta planície levemente sinuosa, como pode ser visto na Figura C.81.



Figura C.80: Imagem mostrando o trecho 9. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

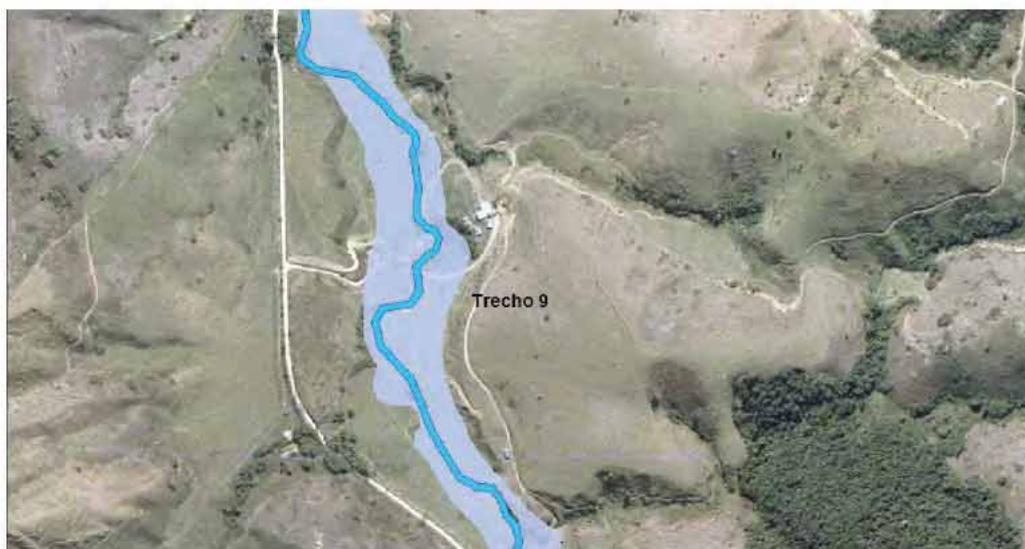


Figura C.81: Planície de inundação do trecho 9.

Neste trecho, está localizada uma ponte de pequeno porte em área particular. A estrada passa próximo da parte final do trecho, como pode ser visto na Figura C.80 e na Figura C.81.

A vazão de *bankfull*, calculada para a seção levantada para este trecho, com fórmula de Manning, e as vazões obtidas no MODCEL, para este trecho, estão apresentadas na Tabela C.9.

Tabela C.9: Vazões obtidas para o trecho 9.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
9	12.36	19.66	21.98	24.07	25.59	27.22	27.74	29.49	31.46

A análise comparativa de imagens de 2003 e 2010 mostra que, neste trecho, o alargamento da calha também é visível. A Figura C.82 e a Figura C.83 apresentam todo o trecho 9. A Figura C.84 e a Figura C.85 mostram a parte inicial do trecho com maior detalhe. O trecho central é apresentado na Figura C.86 e na Figura C.87, e a parte final é apresentada na Figura C.88 e na Figura C.89. São indicados pontos onde se observou o alargamento da calha.

A Figura C.90 e a Figura C.91 evidenciam a erosão da margem neste trecho. Isto indica um ajuste do rio às novas condições de escoamento e dos regimes sedimentares, impostas pelas transformações ocorridas na bacia.

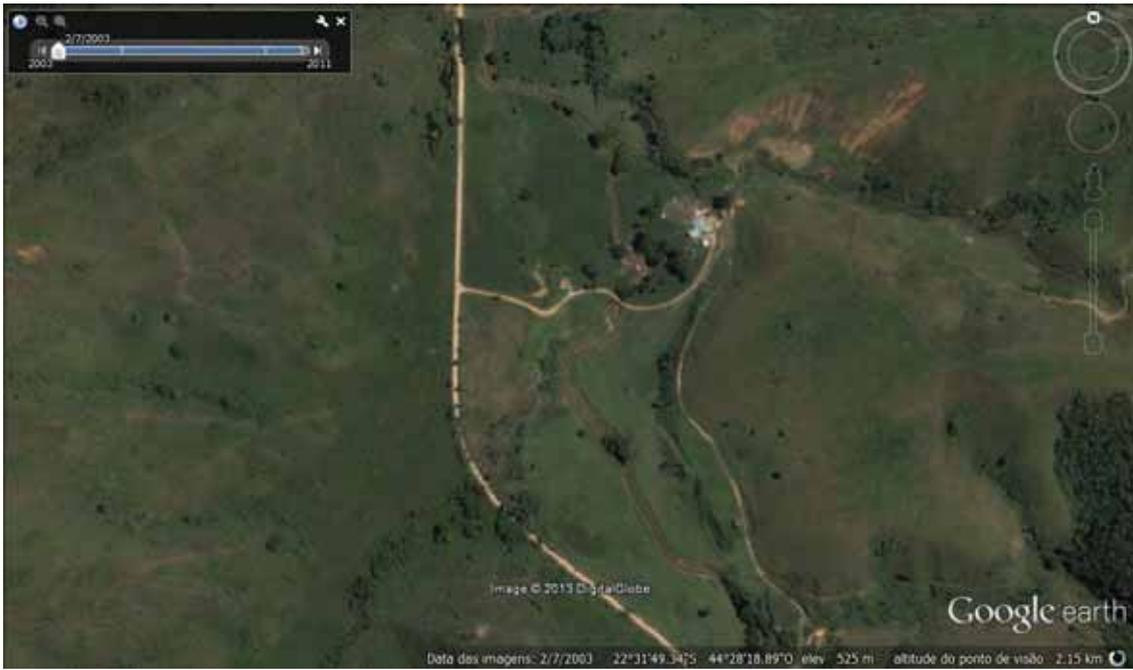


Figura C.82: Imagem do trecho 9 do ano de 2003. Fonte: Google Earth.



Figura C.83: Imagem do trecho 9 do ano de 2010. Fonte: Google Earth.

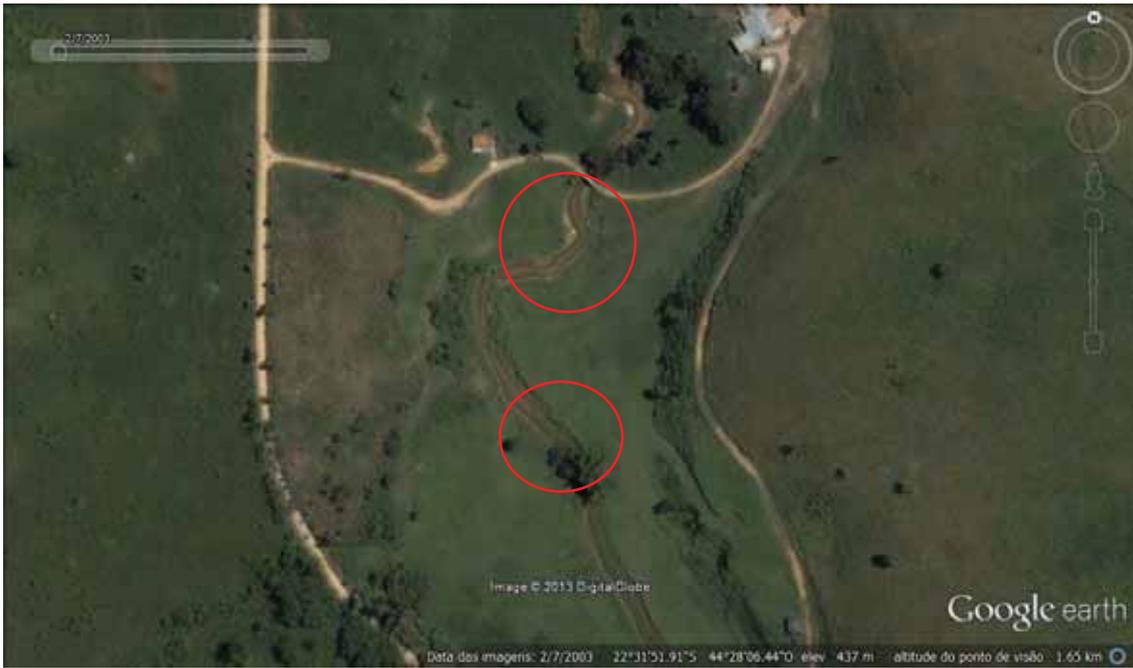


Figura C.84: Imagem de 2003 da parte inicial do trecho 9. Fonte: Google Earth.



Figura C.85: Imagem de 2010 da parte inicial do trecho 9. Fonte: Google Earth.



Figura C.86: Imagem de 2003 da parte central do trecho 9. Fonte: Google Earth.

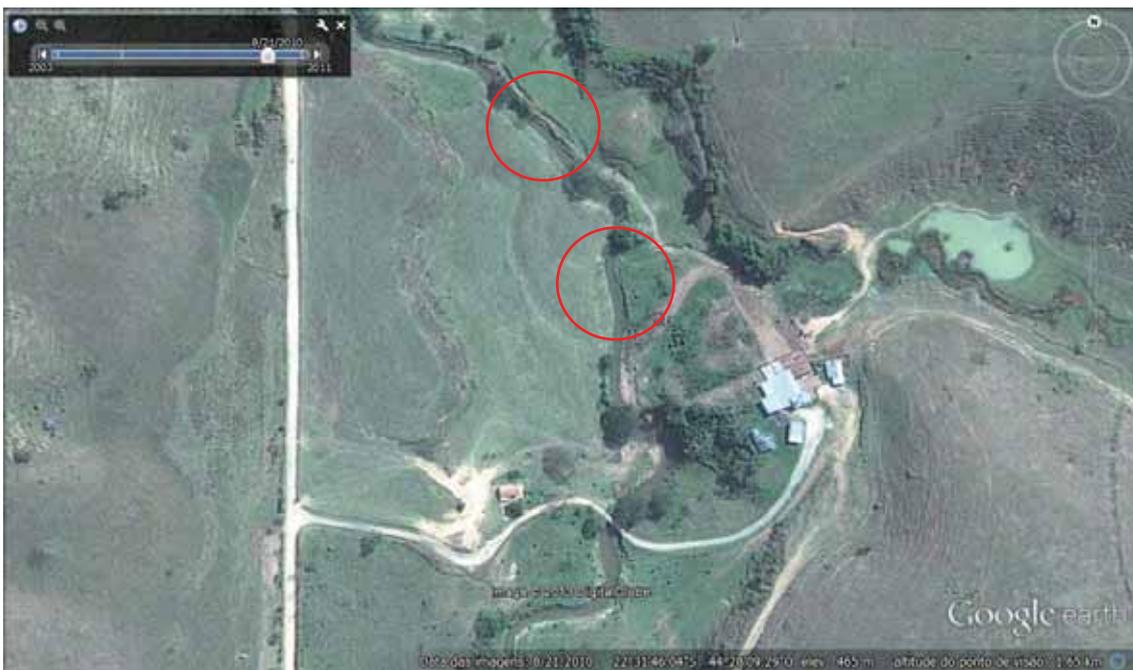


Figura C.87: Imagem de 2010 da parte central do trecho 9. Fonte: Google Earth.



Figura C.88: Imagem de 2003 da parte final do trecho 9. Fonte: Google Earth.

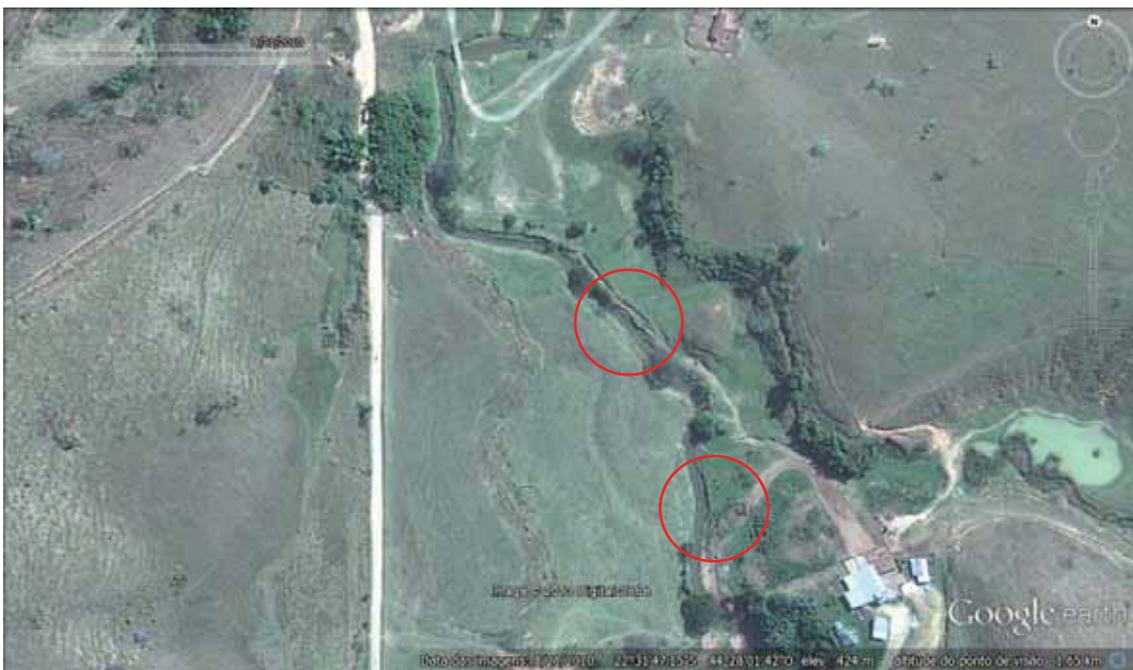


Figura C.89: Imagem de 2010 da parte final do trecho 9. Fonte: Google Earth.



Figura C.90: Fotografia de um ponto do trecho 9, olhando para montante.



Figura C.91: Erosão na margem do rio Sesmaria no trecho 9.

Trecho 10

O trecho 10 (Figura C.92) é um trecho rural. Sua margem esquerda é vegetada apenas com gramíneas e sua margem direita, além das gramíneas, possui vegetação arbustiva e resquício de floresta; no entanto, a vegetação marginal predominante é a gramínea. É caracterizado como um trecho de planície descontínua sinuosa, como pode ser visto na Figura C.93. Como ponto fixo há uma ponte neste trecho.

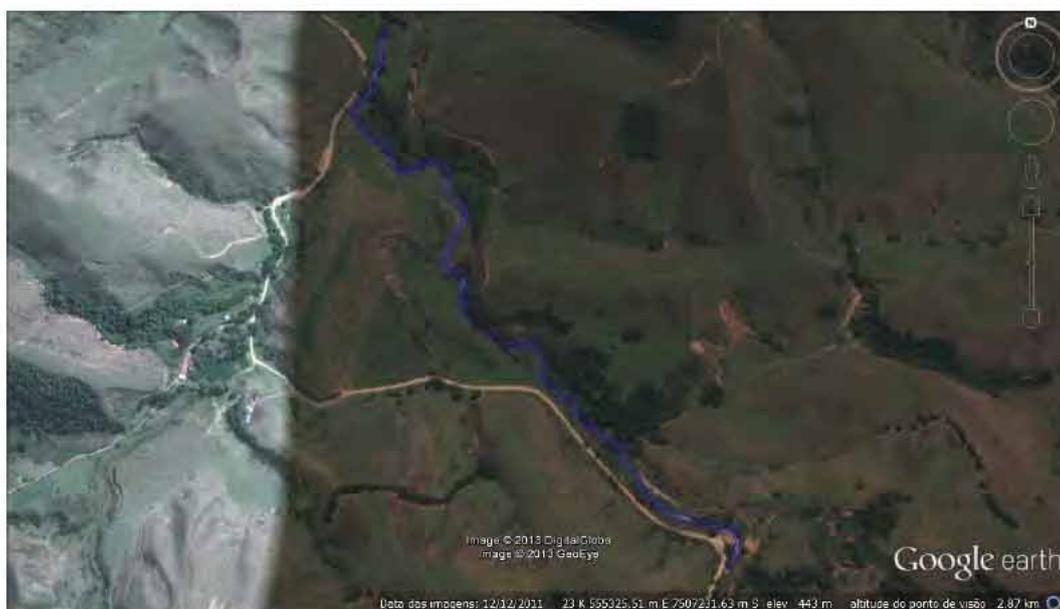


Figura C.92: Imagem mostrando o trecho 10. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.



Figura C.93: Planície de inundação do trecho 10.

As vazões obtidas para este trecho, com o uso do MODCEL para diversos tempos de recorrência (1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos), e a vazão de *bankfull*, calculada com fórmula de Manning, para a seção desse trecho estão listadas na Tabela C.10.

Tabela C.10: vazões obtidas para o trecho 10.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
10	14.81	24.54	26.84	29.99	32.27	34.84	35.63	37.69	39.36

Foram analisadas imagens de satélite, dos anos de 2003 e 2010, do trecho 10, com o objetivo de verificar o comportamento do rio a partir de mudanças recentes. Na Figura C.94 e na Figura C.95 está apresentado todo o trecho 10 em ambos os anos. Na Figura C.96 e na Figura C.97 é possível ver com maior detalhe a parte inicial do trecho e as mudanças que ocorreram neste período. Pode-se observar a construção de uma ponte, entre os limites do trecho 10 e 11. Mais uma vez, a erosão das margens e o alargamento da calha são visíveis ao longo do trecho. Houve também um pequeno aumento da sinuosidade do rio, como pode ser visto na Figura C.97, assinalado com uma circunferência em vermelho. Na Figura C.98 e na Figura C.99 é apresentada, com maior detalhe, a parte central do trecho. Na Figura C.100 e na Figura C.101 também é notável o alargamento da calha.

Na Figura C.100 e na Figura C.101, assinalado em amarelo, é possível ver a entrada de um afluente, próximo ao limite do trecho 10 com o trecho 9. Nota-se que após a entrada do afluente houve o estreitamento da calha do rio Sesmaria. Provavelmente, este afluente transportou sedimentos para o rio Sesmaria, e por se tratar de um ponto de baixa declividade os sedimentos se acumularam neste local, estreitando a calha do rio.

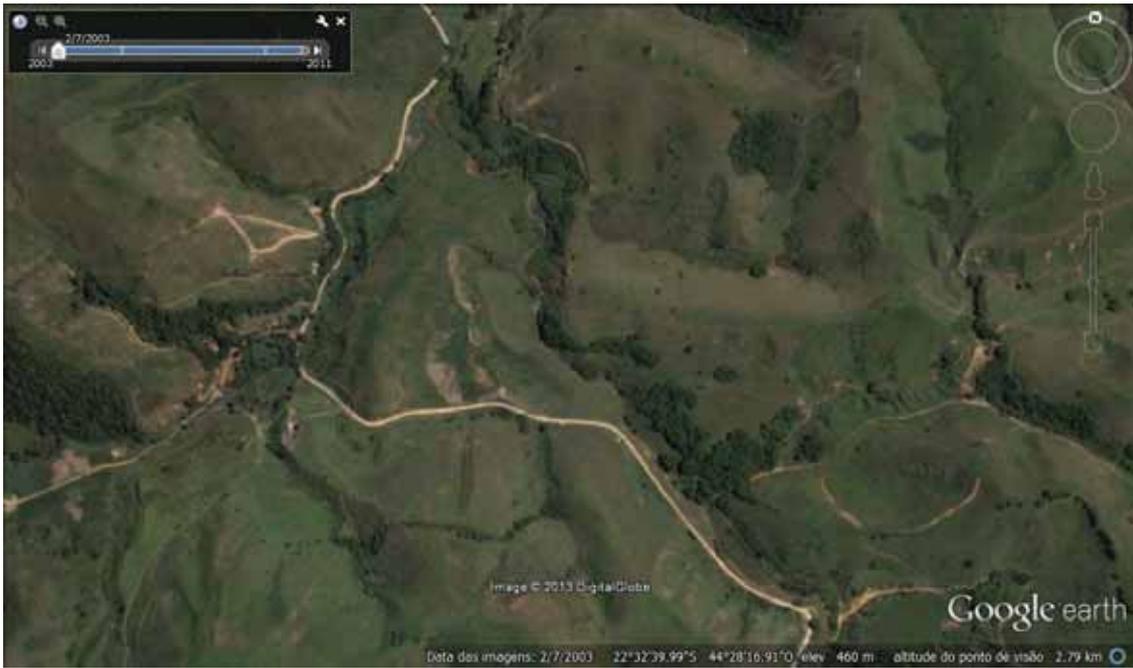


Figura C.94: Imagem de 2003 do trecho 10. Fonte: Google Earth.



Figura C.95: Imagem de 2010 do trecho 10. Fonte: Google Earth.

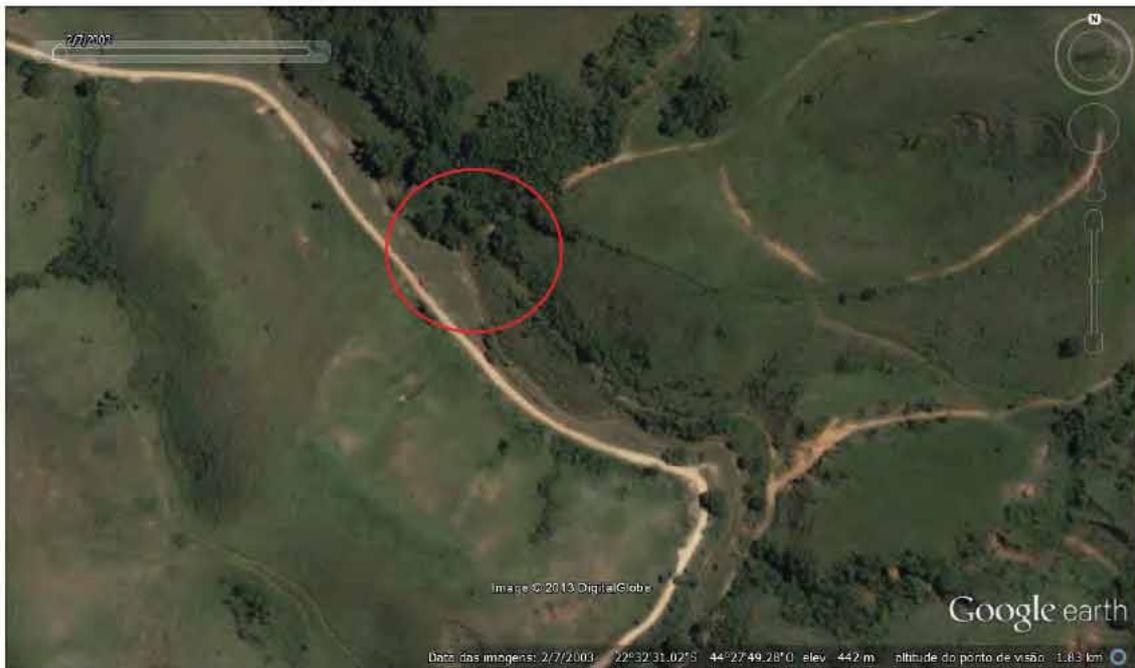


Figura C.96: Imagem de 2003 da parte inicial do trecho 10. Fonte: Google Earth.



Figura C.97: Imagem de 2010 da parte inicial do trecho 10. Fonte: Google Earth.

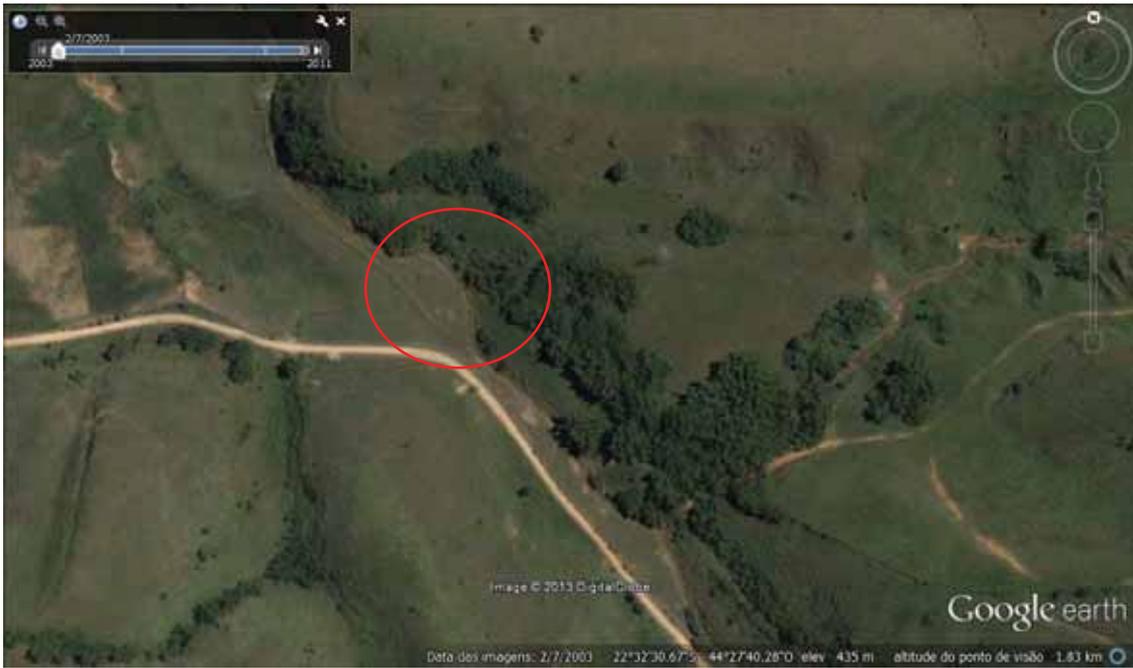


Figura C.98: Imagem de 2003 da parte central do trecho 10. Fonte: Google Earth.



Figura C.99: Imagem de 2010 da parte central do trecho 10. Fonte: Google Earth.



Figura C.100: Imagem de 2003 da parte final do trecho 10. Fonte: Google Earth.



Figura C.101: Imagem de 2010 da parte final do trecho 10. Fonte: Google Earth.

A partir de visitas de campo e da análise de imagens foi possível concluir que o rio Sesmaria está em busca de um novo equilíbrio. Isto se reflete na atual dinâmica do rio. Após o desmatamento houve um aumento significativo no aporte de sedimentos, que acabou por elevar o nível do rio e a formar uma planície de inundação mais alta. Como pode-se observar na Figura C.102, a planície pós-desmatamento, era mais alta do que a planície ativa. Com a erosão desta planície antiga surgiu a atual planície de inundação. Atualmente, o rio está erodindo a planície ativa, alargando a sua calha, e possivelmente dentro de um certo horizonte de tempo, caso não haja a proteção destas margens, a força do rio pode acabar por erodir toda a planície atual.

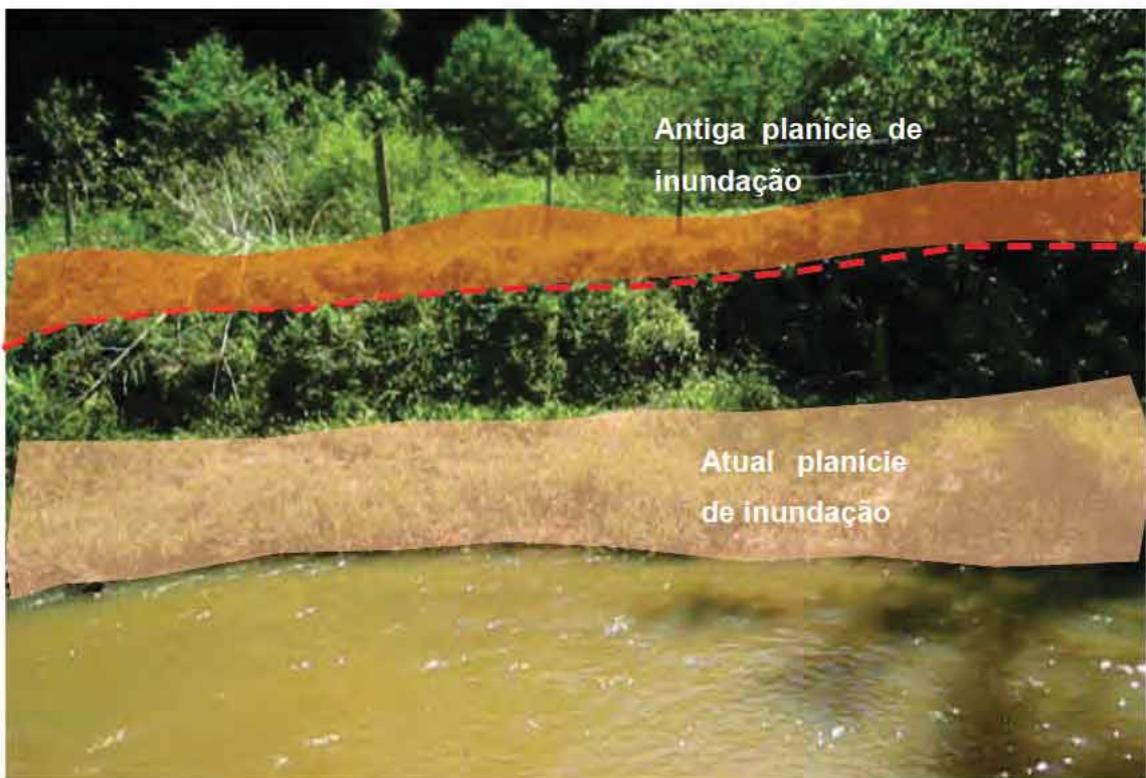


Figura C.102: Fotografia do trecho 10, indicando a planície de inundação ativa, a planície do período anterior ao desmatamento e onde ocorreu erosão.

Trecho 11

O trecho 11 se caracteriza como um trecho confinado, com maior porcentagem de vegetação marginal, como pode ser visto na Figura C.103. A planície de inundação correspondente a este trecho está apresentada na Figura C.104.



Figura C.103: Imagem mostrando o trecho 11. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

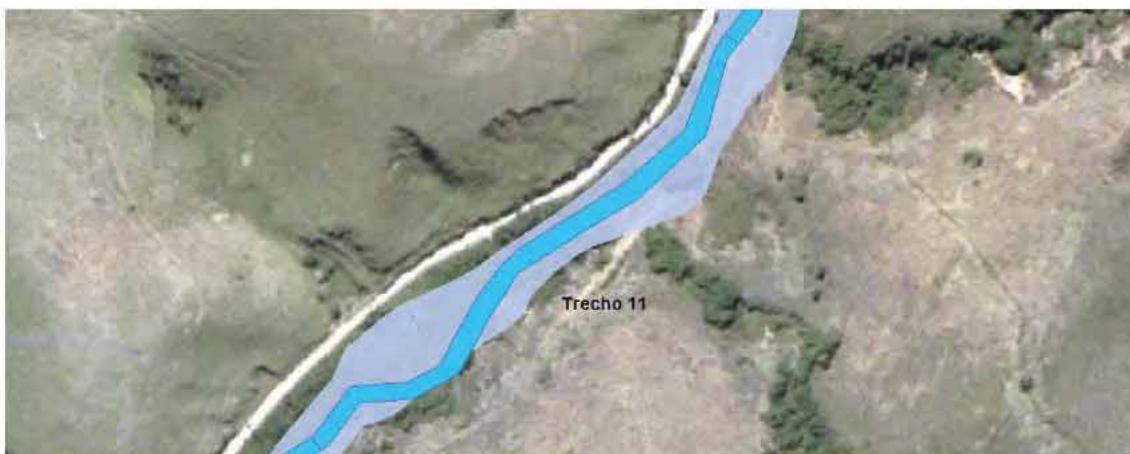


Figura C.104: Planície de inundação do trecho 11.

Foram obtidas vazões com o uso do MODCEL para diversos tempos de recorrência e foi calculada a vazão de *bankfull* com fórmula de Manning. Os valores obtidos para o trecho 11 estão apresentados na Tabela C.11.

Tabela C.11: vazões obtidas para o trecho 11.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
24.74	26.46	30.47	36.03	40.21	44.45	45.89	49.98	54.28

Na Figura C.105 e na Figura C.106, têm-se imagens de 2003 e de 2010 do trecho 11. Comparando as duas imagens, é possível perceber que a de 2010 mostra um alargamento da calha do rio em relação a 2003. Este processo de erosão das margens tem se repetido sistematicamente em todos os trechos.



Figura C.105: Imagem de 2003 do trecho 11. Fonte: Google Earth.



Figura C.106: Imagem de 2010 do trecho 11. Fonte: Google Earth.

Na Figura C.107 e na Figura C.108, é possível ver sinais de erosão e também a presença de detritos lenhosos neste trecho.



Figura C.107: Fotografia de parte do trecho 11, olhando para jusante.



Figura C.108: Fotografia de um ponto do trecho 11, mostrando erosão da margem e a presença de detritos lenhosos.

Trecho 12

O trecho 12 representa um trecho confinado, conforme se pode observar na Figura C.109, com planície de inundação estreita (Figura C.110) e quase nenhuma vegetação marginal.



Figura C.109: Imagem do trecho 12. Fonte: Google Earth.

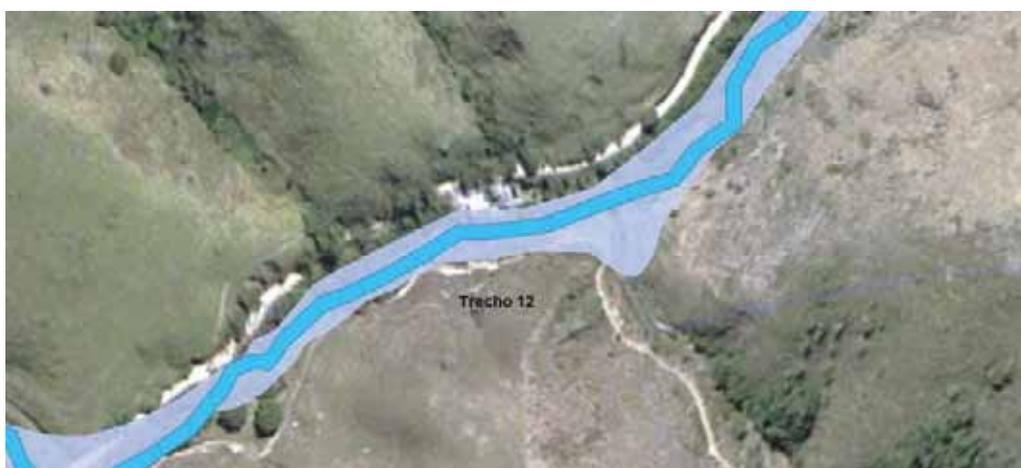


Figura C.110: Planície de inundação do trecho 12.

Foi calculada, com fórmula de Manning, a vazão de *bankfull* para a seção considerada para este trecho, e com o uso do MODCEL foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência (1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos). Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.12. Como se pode observar, a vazão de *bankfull* para este trecho é menor do que a encontrada para 1 ano de tempo de recorrência.

Tabela C.12: Vazões obtidas para o trecho 12.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
21.91	24.98	28.12	31.41	33.58	35.51	36.19	38.37	41.36

Imagens de satélite, de 2003 e 2010, do aplicativo Google Earth, permitiram observar mudanças recentes neste trecho. Como pode ser visto na Figura C.111 e na Figura C.112, houve um pequeno alargamento da calha ao longo do trecho. Talvez, devido ao vale confinado, este trecho sofra poucas mudanças, se caracterizando como uma zona de transporte de sedimentos.

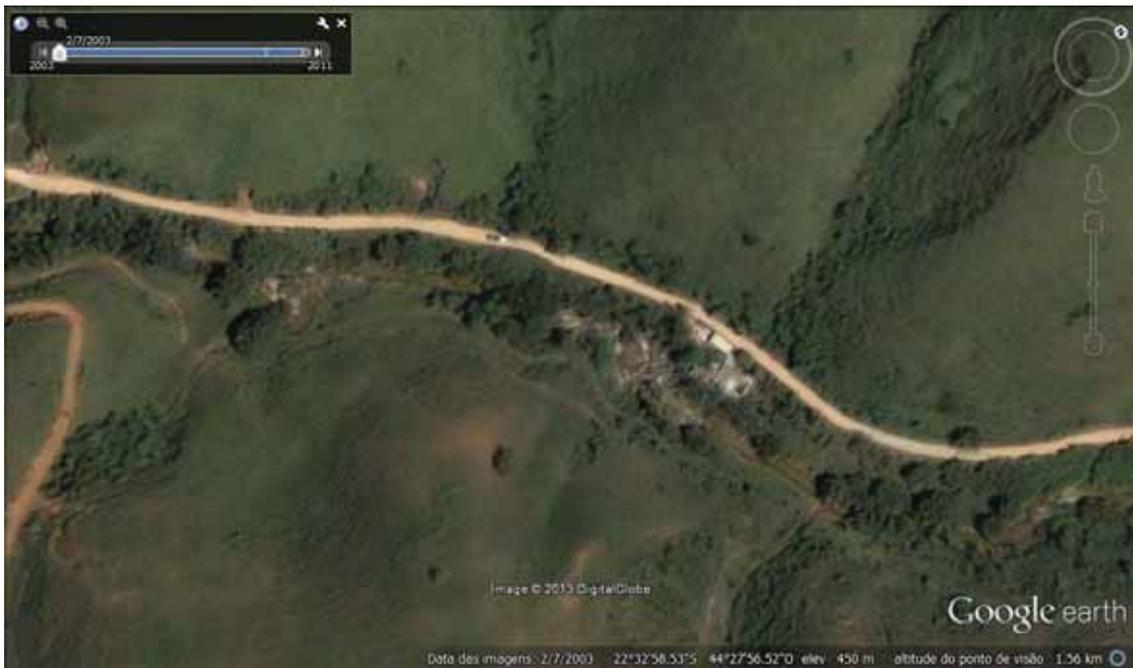


Figura C.111: Imagem de 2003 do trecho 12. Fonte: Google Earth.



Figura C.112: Imagem de 2010 do trecho 12. Fonte: Google Earth.

Trecho 13

O trecho 13, apresentado na Figura C.113, possui pouca vegetação marginal e sua planície de inundação sinuosa é apresentada na Figura C.114. Como ponto de controle há uma pequena ponte, mais a jusante, já quase no limite com o trecho 12 (Figura C.113).



Figura C.113: Imagem mostrando o trecho 13. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.



Figura C.114: Planície de inundação do trecho 13.

Com fórmula de Manning foi calculada a vazão de *bankfull* para a seção considerada para este trecho, e, com o uso do MODCEL, foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.13.

Tabela C.13: vazões obtidas para o trecho 13.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
12.92	14.05	15.02	16.40	17.72	18.75	19.15	20.33	22.23

A análise de imagens de satélite do aplicativo Google Earth, dos anos de 2003 e 2010, possibilitou observar que, nesse intervalo de 7 anos, houve alargamento da calha do rio em vários pontos, como pode ser visto na Figura C.115 e na Figura C.116, onde está apresentado todo o trecho, e com maior detalhe na Figura C.117, na Figura C.118, na Figura C.119 e na Figura C.120. Isso indica que o rio está em busca de um novo equilíbrio e, portanto, está erodindo os pacotes sedimentares formados após o desmatamento da bacia para o cultivo de café, que durante anos, foi a principal atividade econômica da região.

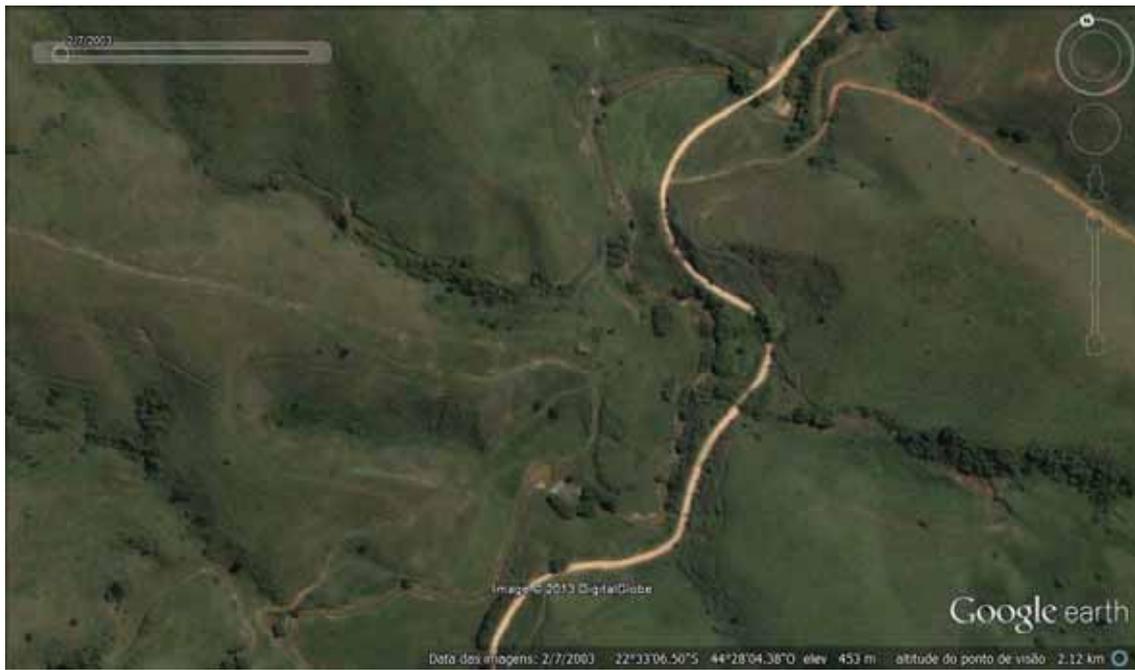


Figura C.115: Imagem de 2003 do trecho 13. Fonte: Google Earth.



Figura C.116: Imagem de 2010 do trecho 13. Fonte: Google Earth.



Figura C.117: Imagem de 2003 da parte inicial do trecho 13. Fonte: Google Earth.



Figura C.118: Imagem de 2010 da parte inicial do trecho 13. Fonte: Google Earth.



Figura C.119: Imagem da parte final do trecho 13, de 2003. Fonte: Google Earth.



Figura C.120: Imagem da parte final do trecho 13, de 2010. Fonte: Google Earth.

A Figura C.121 e a Figura C.122 apresentam sinais de que o rio está erodindo sobre os pacotes sedimentares, que é a provável causa do alargamento da calha fluvial. A força hidráulica atuou na base, retirando o material de sustentação e isso ocasionou a erosão por solapamento. Na Figura C.122, uma parte da margem que solapou se encontra vegetada com gramínea. Esse tipo de vegetação cresce em locais inundáveis no período da seca, e não indica estabilidade.



Figura C.121: Vista de montante de um ponto do trecho 13.



Figura C.122: Foto que mostra que o rio está incidindo sobre o pacote sedimentar e, por meio da erosão das margens, alargando sua calha.

Na Figura C.123, pode-se observar a deposição de sedimento arenoso na margem interna e a presença de detrito lenhoso, também ilustrados na Figura C.124. Estes detritos provavelmente foram carregados pela cheia que ocorreu um pouco antes desta visita de campo, em 2010.



Figura C.123: Foto do trecho 13 que mostra a deposição de sedimentos na margem interna e também a presença de detritos lenhosos.



Figura C.124: Foto do trecho 13 mostrando a presença de detritos lenhosos.

Trecho 14

Este trecho é um trecho de baixa sinuosidade e planície descontínua. Possui quase total ausência de vegetação marginal (Figura C.125). A planície de inundação deste trecho está apresentada na Figura C.126.



Figura C.125: Imagem mostrando o trecho 14. A seta indica a direção do fluxo. Fonte: Google Earth.

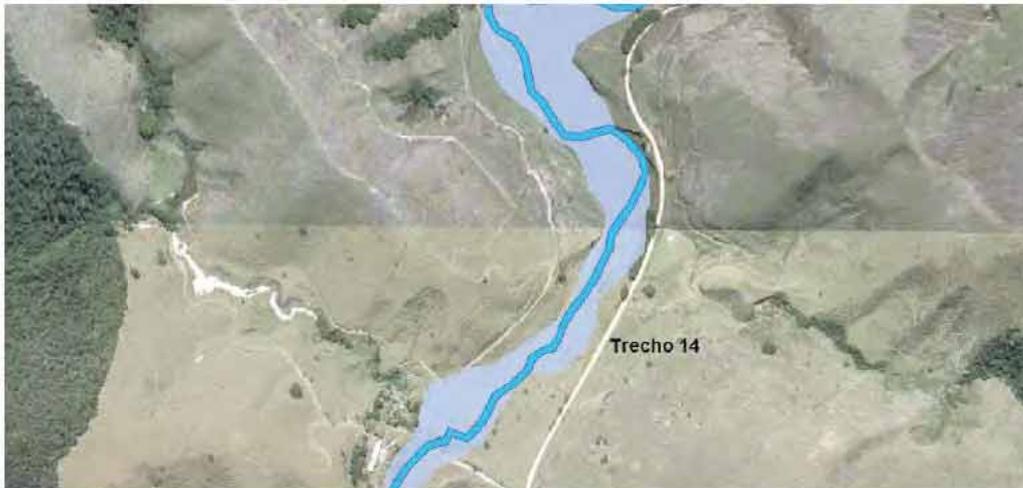


Figura C.126: Planície de inundação do trecho 14.

Foi calculada a vazão de *bankfull* para a seção considerada para este trecho com fórmula de Manning e, com o uso do MODCEL foram obtidas as vazões para diversos tempos de recorrência. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.14.

Tabela C.14: Vazões obtidas para o trecho 14.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
10.67	16.45	17.84	19.60	20.92	22.44	22.99	24.65	27.09

Observações feitas a partir de imagens de satélite dos anos de 2003 e 2010 mostraram um leve alargamento da calha do rio, em quase todo o curso do rio neste trecho. A mudança mais significativa foi a deposição de sedimentos da bacia na lagoa, indicada na Figura C.127, e na Figura C.128, e o aparecimento de erosão na encosta. Este ponto de erosão e a sedimentação desta lagoa podem ser vistos na Figura C.129.



Figura C.127: Imagem de 2003, indicando uma lagoa natural. Fonte: Google Earth.



Figura C.128: Imagem de 2010, indicando uma lagoa natural e erosão na encosta. Fonte: Google Earth.



Figura C.129: Lagoa sedimentada e pontos de erosão nas encostas.

Em visitas de campo foi possível observar que, neste trecho, há vários pontos de erosão nas encostas, conforme apresentado na Figura C.129, e erosão na margem direita do rio (Figura C.130). Esta erosão provocou problemas na estrada e foi preciso reforçar a estrutura da mesma com o uso de concreto (Figura C.131).



Figura C.130: Foto mostrando o lixo, inclusive uma Televisão.



Figura C.131: Desbarrancamento de parte da estrada causada pela erosão.

Foi possível observar também a presença de uma ilha de ponta e de detritos lenhosos que foram acumulados nela. Esta ilha se apresenta estável, o que pode ser constatado pela presença de vegetação arbustiva (Figura C.132).



Figura C.132: Ilha presente no trecho 14.

Trecho 15

Este trecho possui pouca vegetação marginal e localiza-se próximo a uma fazenda de cultivo de eucalipto, como pode ser observado na Figura C.133. Na Figura C.134 observa-se a planície de inundação descontínua deste trecho



Figura C.133: Imagem do trecho 15. Fonte: Google Earth.



Figura C.134: Imagem mostrando o trecho 15 e sua planície de inundação.

Para a seção transversal deste trecho, foi calculada a vazão de *bankfull* com fórmula de Manning. Foram obtidas, também, as vazões para os tempos de recorrência de 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos com o MODCEL. Estas vazões estão apresentadas na Tabela C.15.

Tabela C.15: Vazões obtidas para o trecho 15.

Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
15.52	17.49	18.96	20.55	21.65	23.55	24.26	26.36	28.91

Observando as imagens de 2003 e de 2010 nota-se o alargamento da calha do rio em alguns pontos, como pode ser visto na Figura C.135 e na Figura C.136. É possível observar, nestas imagens, que o rio possuía um meandro que foi abandonado,

indicando que houve processos de deposição (margem interna) e erosão (margem externa). Os meandros, devido a estes processos, tendem a acentuar sua sinuosidade, chegando a cortar seu caminho em direção aos meandros vizinhos. Considerando que a escala espaço-temporal é pequena (7 anos), o acúmulo de sedimentos nos meandros passa a ser significativa, visto que, a morfologia está mudando em curto espaço de tempo. A presença de sedimentos de fundo em maior quantidade tende a acentuar também a declividade, além da largura. Neste caso, o corte do meandro também resultou em incremento de declividade.



Figura C.135: Imagem de 2003 do trecho 15 e a indicação de um meandro que foi cortado. Fonte: Google Earth.



Figura C.136: Imagem de 2010 do trecho 15 e a indicação de um meandro que foi cortado. Fonte: Google Earth.

Neste trecho foi possível observar, a partir das fotos e imagens, e confirmado em visita de campo, que o desmatamento desta região para o cultivo do café em meados do século 18 acabou por provocar um aumento significativo da vazão sólida, gerando a elevação do leito do rio e a formação de uma planície de inundação (Figura C.137) anterior ao período atual. Nesta mesma figura pode-se observar a planície de inundação ativa, mais baixa do que a anterior, e a erosão que deu origem a ela. Provavelmente o rio está buscando um novo equilíbrio, e ao erodir a deposição originada logo após o desmatamento, criou esta nova planície de inundação.



Figura C.137: Foto do trecho 15, mostrando as planícies atual e anterior e a escarpa de erosão.

Trecho 16

O trecho 16 (Figura C.138) é um trecho confinado com bolsões de várzeas ocasionais, como pode ser visto na Figura C.139. Possui pouca vegetação marginal.



Figura C.138: Imagem do trecho 16. Fonte: Google Earth.

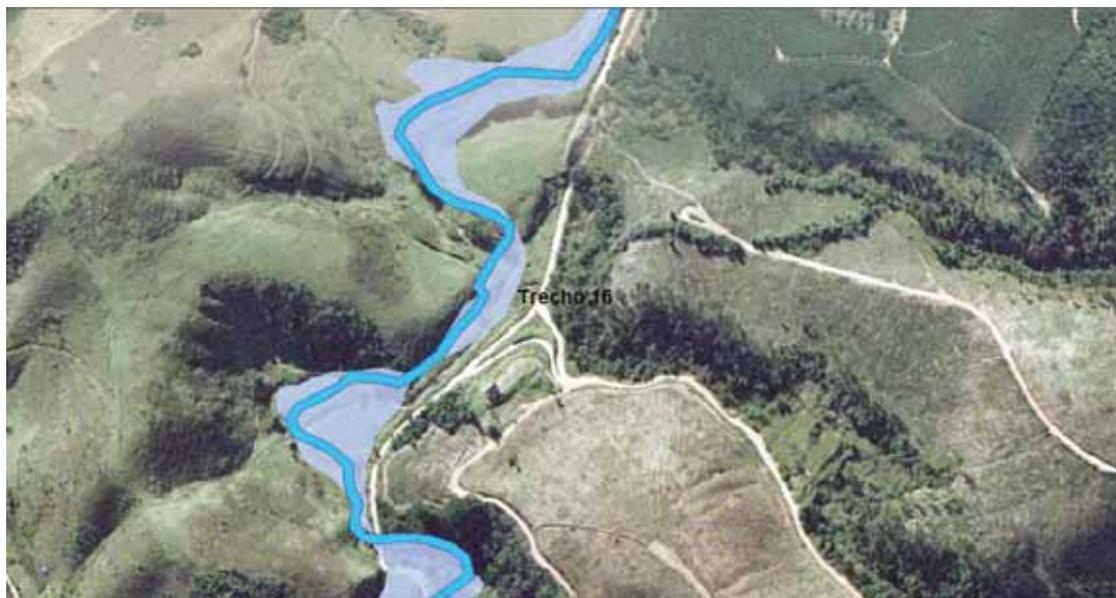


Figura C.139: Imagem mostrando o trecho 16 e sua Planície de inundação.

Para este trecho, foram obtidas vazões para diversos tempos de recorrência e foi calculada a vazão de *bankfull* com fórmula de Manning. Os valores obtidos para estas vazões estão apresentados na Tabela C.16.

Tabela C.16: vazões obtidas para o trecho 16.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
16	9.23	15.60	16.74	18.48	19.86	20.51	20.76	21.46	24.28

Como ponto de controle artificial, há uma ponte bem próxima ao limite deste trecho com o trecho 17 e a estrada, que, em alguns pontos, passa bem próxima ao rio. A Figura C.140 mostra uma foto tirada da ponte, olhando para montante. É possível ver que é um trecho encaixado e com alguma vegetação marginal.



Figura C.140: Foto tirada da ponte do trecho 16, olhando para montante.

A mudança recente, observada ao comparar imagens de 2003 e de 2010 (Figura C.141 e Figura C.142) do aplicativo Google Earth, foi o alargamento da calha do rio, observado também nos demais trechos.



Figura C.141: Imagem do trecho 16 de 2003. Fonte: Google Earth.



Figura C.142: Imagem do trecho 16 de 2010. Fonte: Google Earth.

Trecho 17

O trecho 17 configura um trecho confinado, com vegetação marginal com resquícios de vegetação nativa (Figura C.143) e pouca ocupação. Devido à maior declividade (0.00812 m/m), a água corre com maior velocidade, o que configura um trecho de transferência de sedimentos.



Figura C.143: IMAGEM MOSTRANDO O TRECHO 17. FONTE: GOOGLE EARTH.

Na Figura C.144 é possível notar a presença de vegetação nativa neste trecho.



Figura C.144: Foto do trecho 17, mostrando a vegetação marginal, e resquício de mata nativa.

A planície de inundação ativa do trecho está apresentada na Figura C.145.



Figura C.145: Planície de inundação do trecho 17.

A Tabela C.17 apresenta as vazões obtidas para o trecho 17. A vazão de *bankfull* foi calculada com fórmula de Manning e as vazões para os diversos tempos de recorrência foram obtidas através do MODCEL.

Tabela C.17: Vazões obtidas para o trecho 17.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
17	11.93	18.04	19.10	20.30	21.31	22.31	22.63	23.69	24.64

Observando comparativamente, imagens dos anos de 2003 e de 2010, foi possível verificar que houve um alargamento da calha do rio, assim como nos demais trechos (Figura C.146 e Figura C.147). Isto ocorreu, provavelmente, devido ao incremento na vazão após o desmatamento e ao maior aporte de sedimentos.



Figura C.146: Imagem de 2003 do trecho 17. Fonte: Google Earth.



Figura C.147: Imagem de 2003 do trecho 17. Fonte: Google Earth.

Em visita feita ao local, foi possível observar a erosão causada pelo corte feito para a estrada, na margem esquerda do rio, como pode ser visto na Figura C.148.



Figura C.148: Foto do trecho 17 mostrando a erosão causada pelo corte na estrada. Vista do rio olhando para montante.

Trecho 18

Este trecho está localizado logo após a confluência dos rios Feio e Formoso (Figura C.149). É um trecho com quase ausência de vegetação marginal



Rio Formoso
Figura C.149: Imagem mostrando o trecho 18. Fonte: Google Earth.

A Tabela C.18 apresenta as vazões obtidas para o trecho 18. Para o cálculo da vazão de *bankfull* foi utilizada a fórmula de Manning. As vazões para cada tempo de recorrência foram obtidas com o uso do MODCEL.

Tabela C.18: Vazões obtidas para o trecho 18.

Trecho	Qbank (calculada)	Q TR 1	Q TR 2	Q TR 5	Q TR 10	QTR 20	QTR 25	QTR 50	QTR 100
18	4.68	10.91	11.68	12.58	13.39	14.23	14.51	15.53	16.55

A planície de inundação deste trecho é descontínua e sinuosa, como se pode observar na Figura C.150.



Figura C.150: Planície de inundação descontínua sinuosa do trecho 18.

Foram observadas imagens do aplicativo Google Earth, dos anos de 2003 e 2010 (Figura C.151, Figura C.152, Figura C.153 e Figura C.154), para verificar mudanças recentes na calha do rio. A principal mudança observada foi a indicada na Figura C.155 e na Figura C.156. O rio abandonou um de seus meandros, que foi cortado, e seguiu um caminho mais curto. É possível ver a marca no solo do antigo meandro.

Além do abandono do meandro, é possível observar que em vários pontos a calha do rio está mais larga na imagem de 2010 em relação à de 2003, o que pode indicar que o transporte por arraste é maior.

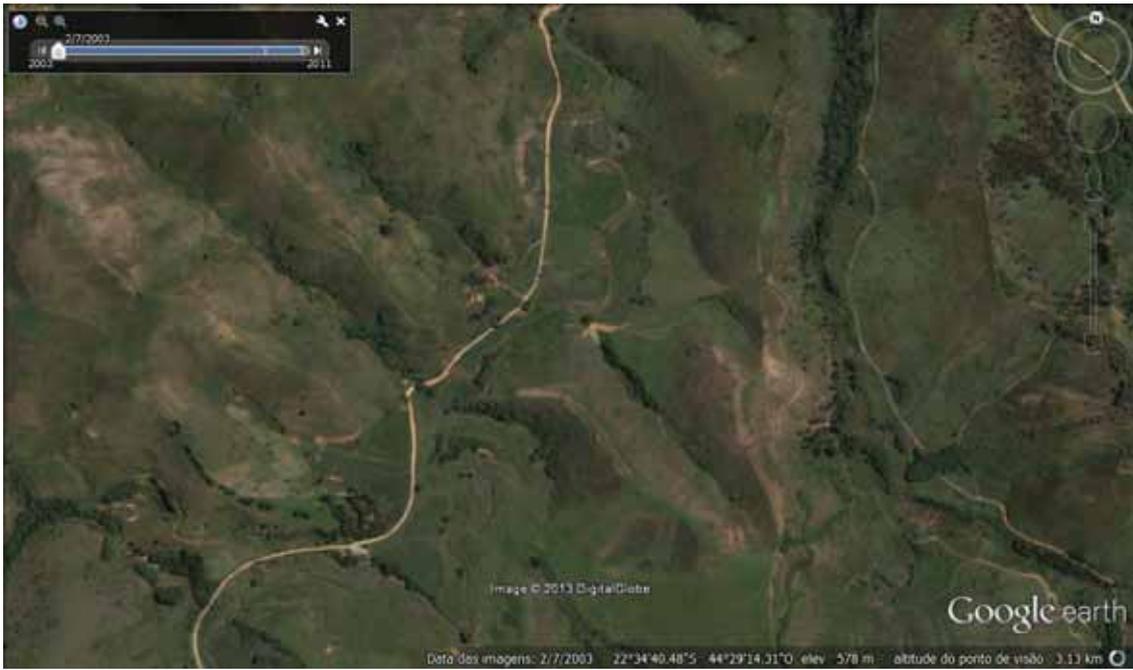


Figura C.151: Imagem de 2003 do trecho 18. Fonte: Google Earth.



Figura C.152: Imagem de 2010 do trecho 18. Fonte: Google Earth.



Figura C.153: Imagem da parte inicial do trecho 18 do ano de 2003. Fonte: Google Earth.



Figura C.154: Imagem da parte inicial do trecho 18 do ano de 2010. Fonte: Google Earth.

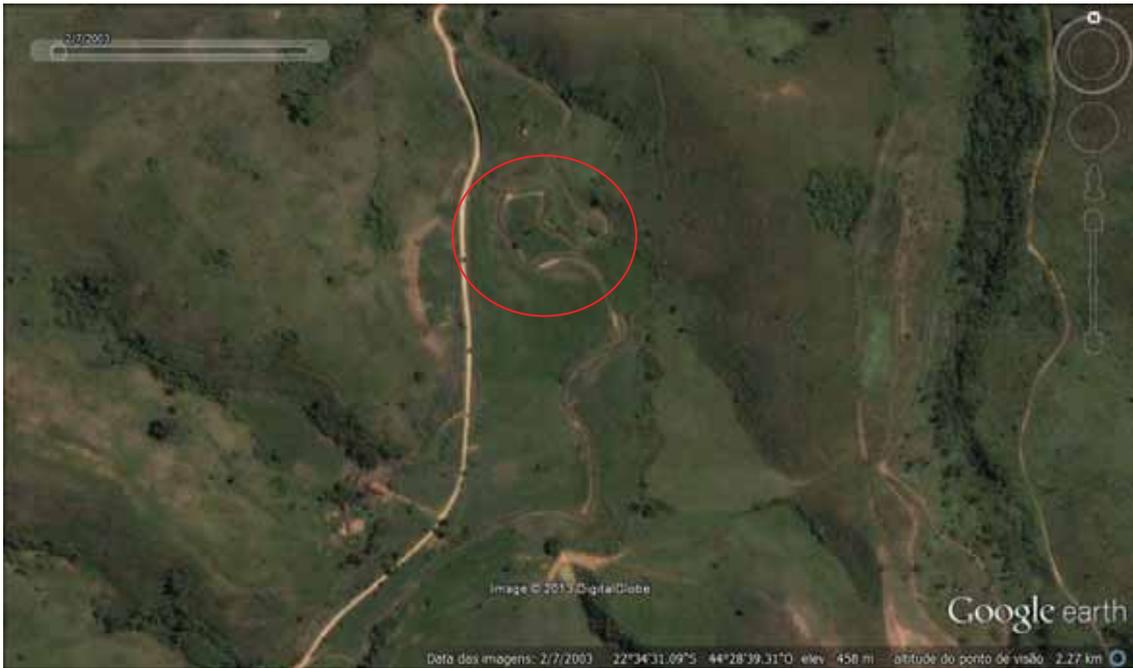


Figura C.155: Imagem da parte final do trecho 18 do ano de 2003, indicando o meandro abandonado. Fonte: Google Earth.

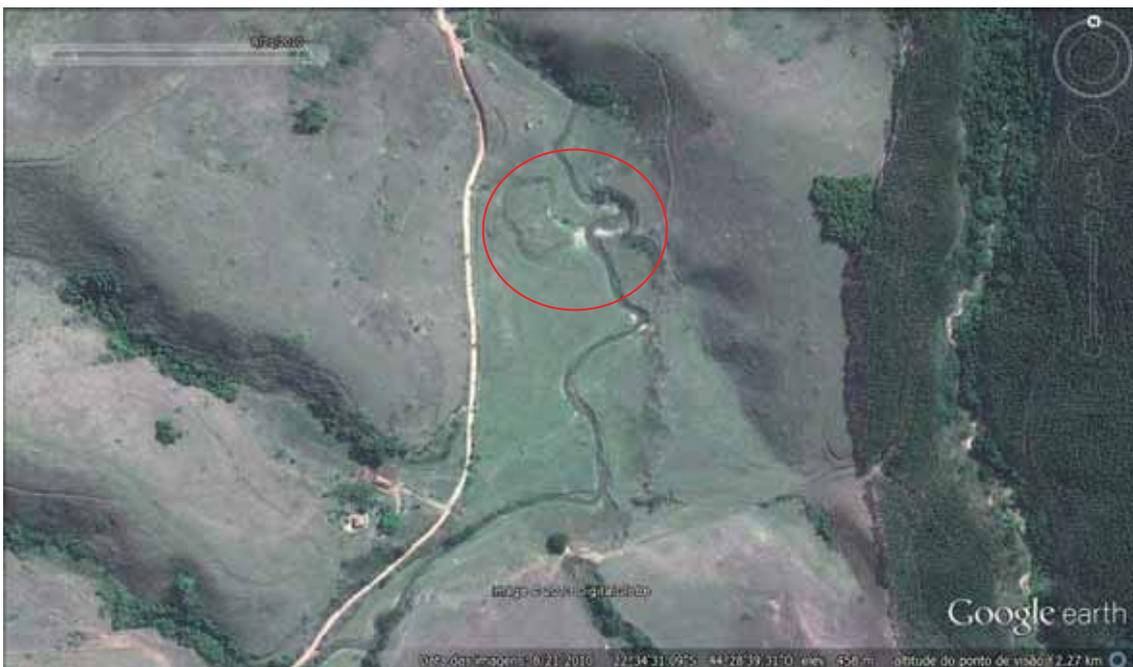


Figura C.156: Imagem da parte final do trecho 18 do ano de 2010, indicando o meandro abandonado. Fonte: Google Earth.

A partir de visitas de campo e da observação de fotos do local foi possível chegar à conclusão de que, após o desmatamento realizado para o plantio do café no século 18, houve um grande aumento no aporte de sedimentos, o que gerou a elevação do leito do rio e formou uma planície de inundação mais alta do que a anterior. Atualmente, a bacia está saindo desta fase e tentando alcançar um novo equilíbrio, com menor aporte de sedimentos do que na fase principal de degradação. O rio passou a incidir sobre os depósitos formados após o desmatamento, criando formas de erosão e formando uma nova planície de inundação aparentemente não homogênea, devido ao abundante transporte de detritos lenhosos que se depositam. Estes detritos criam áreas de assentamento de vegetação que os cobrem rapidamente.

Na Figura C.157, é possível observar a antiga planície de inundação, a escarpa de erosão recente e a planície de inundação recente.

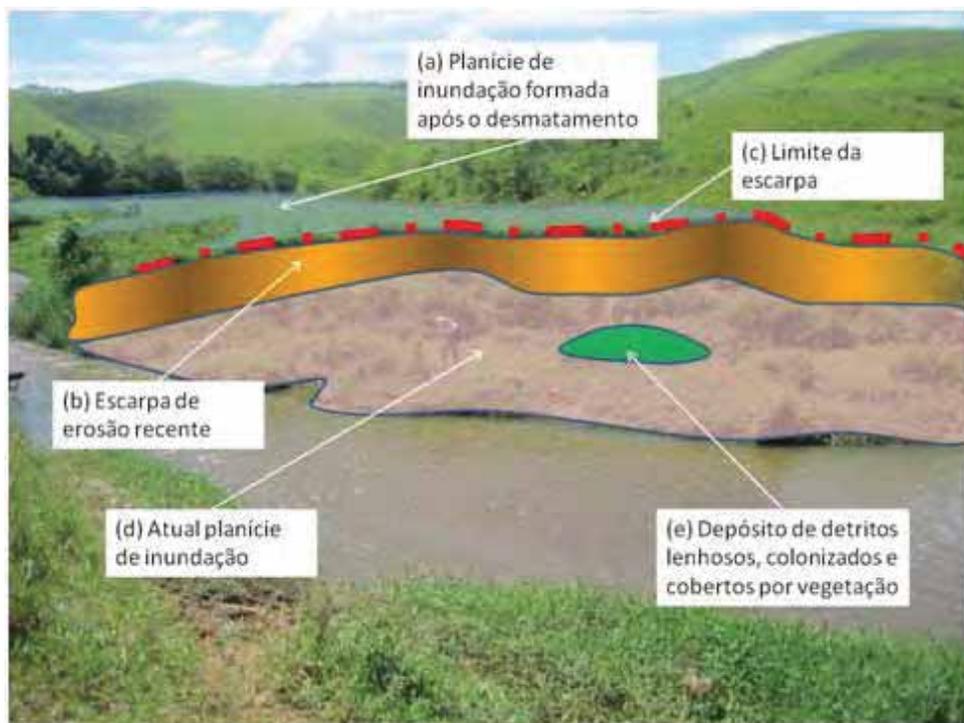


Figura C.157: Foto do trecho 18 mostrando a planície de inundação anterior ao período atual e pós desmatamento (a). formas de erosão (b e c). nova planície de inundação, mais baixa (d). depósitos de detritos lenhosos (e).

O leito do canal atual é, provavelmente, mais elevado em relação ao anterior e ainda não retornou ao nível pré-desmatamento. A confirmação disto está no fato de que se observa uma abundância de sedimentos que criaram barras visíveis (Figura C.158).



Figura C.158: Presença de erosão e barras, evidenciando o aporte de sedimentos.

A Figura C.159, a Figura C.160 e a Figura C.161, são fotos que mostram a ocorrência de barras e ilhas no trecho 18.



Figura C.159: Barra de sedimentos na margem esquerda do rio, à direita da foto.



Figura C.160: Ilha localizada no trecho 18.



Figura C.161: Outra foto do trecho 18 mostrando formas de erosão e ilhas.

D) Anexo 1 – Mapa histórico do estado do Rio de Janeiro de 1892.

