



COPPE/UFRJ

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM UM PLANO DE
MANEJO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS PLUVIAIS
APLICADO À BAIXADA FLUMINENSE

Oswaldo Moura Rezende

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
José Paulo Soares de Azevedo

Rio de Janeiro
Março de 2010

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM UM PLANO DE
MANEJO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS PLUVIAIS
APLICADO À BAIXADA FLUMINENSE

Oswaldo Moura Rezende

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 Gomez Miguez, D.Sc.

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Paulo Roberto Ferreira Carneiro, D.Sc.

Prof. Paulo Canedo de Magalhães, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010

Rezende, Osvaldo Moura

Avaliação de Medidas de Controle de Inundações em um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais Aplicado à Baixada Fluminense/ Osvaldo Moura Rezende – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

X, 208 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

José Paulo Soares de Azevedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 201 - 208.

1. Manejo Sustentável de Águas Pluviais. 2. Medidas de Controle de Inundações Distribuídas. 3. Modelagem Matemática por Células de Escoamento. I. Miguez, Marcelo Gomes *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Estamos condenados à civilização.
Ou progredimos ou desaparecemos.*

Euclides da Cunha

AGRADECIMENTOS

Durante todo o tempo em que estive envolvido, diretamente ou apenas em pensamentos, com o desenvolvimento deste trabalho pude contar com o apoio e a consideração de muitas pessoas. Algumas lidaram de uma forma mais direta, seja pelo contato profissional ou acadêmico e outras de forma mais pessoal. Porém, todas elas formaram uma base de suporte de grande importância para permitir uma caminhada menos tempestuosa nestes últimos anos, que demandaram uma dedicação quase exclusiva à Universidade. Assim, deixo aqui um pequeno, porém sincero, agradecimento a todas essas pessoas.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Gomes Miguez, agradeço pelo apoio técnico e pessoal durante os anos do Mestrado na COPPE, através de uma relação franca, respeitosa e também divertida. Obrigado Professor pela disposição, amizade e dedicação.

Ao Professor Paulo Roberto Ferreira Carneiro agradeço pela orientação na condução e direcionamento do trabalho, sempre importantes para um resultado mais eficiente e eficaz. Agradeço também, a excelente relação profissional que mantivemos e, acima de tudo, a amizade estabelecida, que certamente será sempre cultivada.

À minha mãe, Angela, e ao meu pai, Cacau, meu imenso agradecimento por tudo o que fizeram por mim. Desde sempre. Obrigado pela verdadeira educação que me disponibilizaram integralmente, pelo exemplo de caráter e de amor.

Aos meus irmãos queridos, Rodrigo e Fernanda, pela convivência nos últimos 27 anos de minha vida, muitas vezes catastrófica, mas sempre com finais felizes. Agradeço pela consideração e pela paciência nos últimos meses que antecederam o fechamento deste trabalho. Desculpem-me pelas noites intensamente mal humoradas, tensas e estressantes que ofereci a vocês dois...

À minha companheira de todas as horas, todas as horas mesmo, destes últimos 15 meses, Camille Dehu, um agradecimento muito especial pelo suporte em momentos muito difíceis e pelo compartilhamento de momentos muito felizes. Obrigado pela diversão, sinceridade, sensibilidade, inteligência e beleza que você compartilhou comigo. Muito obrigado por essa intensa relação de amizade, companheirismo, parceria e amor.

Certamente, essa caminhada seria muito mais difícil, se não impossível, se não pudesse contar com os grandes amigos. Esses que estão sempre dispostos a nos ajudar, por isso são chamados

amigos. Por muita sorte, fui felicitado por uma vida repleta de amizades e, portanto, deixo um agradecimento geral para todos eles, que sabem quem são, pelo suporte em todas as fases da vida além desses últimos anos de academia.

Cabe destacar, neste agradecimento, a participação de um grupo de amigos mais próximos do meu dia-a-dia. Destaco ainda, neste grupo, o amigo Matheus, pela amizade nascida em 2001 dentro da UFRJ e desenvolvida por toda minha formação acadêmica, obrigado pela parceria dentro e fora da Universidade, no lápis e no copo, na ilha e na Lapa... E muito obrigado também, igualmente parceiros, para qualquer parada, Sibia, Rodrigo, Melzinha, Luiz Arend, Gustavo e mais uma galera com quem tenho compartilhado meus dias no Fundão.

Ao grande Paulo Marcelo, meu orientador profissional desde os tempos de estagiário do Laboratório de Hidrologia, um muito obrigado pela divertida relação que criamos. Valeu pelos toques profissionais e pela confiança...

Agradeço também o papel desempenhado pelo Professor Paulo Canedo no decorrer do programa de Mestrado na COPPE. Primeiramente, como mestre, pela excelente qualidade de suas aulas, estimulando ainda mais o meu interesse pelo tema Recursos Hídricos e, também, como profissional, pela coordenação nos projetos em que estive envolvido, demonstrando uma verdadeira paixão pela profissão e dando, mais uma vez, uma excelente aula de pragmatismo e senso crítico.

Não poderia deixar de agradecer a toda equipe do LABHID que também representaram uma ótima relação de amizade, tornando a rotina do trabalho muito mais legal e dinâmica... Obrigado pelo suporte Jairo, Evaristo, Zé Roberto, Fernando, Valéria, Celso, Fernanda e o Professor Otto.

A todas as pessoas que não foram citadas, mas tiveram um importante papel para mim, seja por um simples “Boa sorte” ou mesmo pela companhia nos almoços e lanches, deixo também um muito obrigado.

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

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

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM UM PLANO DE
MANEJO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS PLUVIAIS APLICADO À BAIXADA
FLUMINENSE

Oswaldo Moura Rezende

Março/2010

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

O problema das enchentes urbanas ainda é, em muitos casos, tratado como uma consequência direta do excesso de chuva, sem se considerar, necessariamente, o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema interrelacionado e interdependente. Esta visão levou a engenharia a buscar soluções locais, agindo sobre os efeitos provocados pelas precipitações na bacia urbanizada, ou seja, na adequação do sistema de drenagem às novas vazões geradas pós-urbanização. Essa abordagem implica em continuadas intervenções localizadas, sempre corretivas, após os eventos de inundação, exigindo investimentos cada vez maiores para implantação de estruturas capazes de comportar o aumento de vazões gerado pela urbanização. Desde a década de 1970, a preocupação com os efeitos do desenvolvimento sobre o meio ambiente vem mudando gradativamente a abordagem da Engenharia na busca de soluções sustentáveis para os problemas originados em decorrência do crescimento urbano. Este trabalho procura demonstrar os benefícios, em termos de redução das inundações, advindos da consideração do planejamento urbano territorial em projetos de controle de inundações, através de um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais. Para a avaliação quantitativa das inundações é utilizado um Modelo de Células de Escoamento.

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

EVALUATION OF FLOOD CONTROL MEASURES IN A SUSTAINABLE
STORMWATER MANAGEMENT PLAN APPLIED TO BAIXADA FLUMINENSE

Oswaldo Moura Rezende

March/2010

Advisors: Marcelo Gomes Miguez

José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

Urban flooding is still often treated as a direct result of excessive rain, without regard on the basin behavior as an interrelated and interdependent system. Under this vision, Engineering has been looking for local solutions, acting on the effects of rainfall over the urbanized watershed, mainly for the adequacy of the drainage network to the new runoff flows generated after development. This approach involves continued localized interventions, often corrective, after flood events, requiring increasing investment for the construction of structures able to accommodate the increased rainflows resulting by urbanization. Since the 1970s, concern about the effects of development on the environment has been changing gradually Engineering approach in finding sustainable solutions to the new problems arising as a result of urban growth. This work attempts to demonstrate the benefits in terms of reducing flooding resulting from the consideration of territorial planning in flood control projects, through a Sustainable Stormwater Management Plan. For the quantitative evaluation of urban flooding is used a Flow Cells Modelling.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Geral	5
1.1.2. Específicos.....	5
1.2. Motivação.....	6
1.3. Hipóteses de Trabalho	9
1.4. Metodologia Geral.....	10
1.5. Escopo do Trabalho	10
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1. Ciclo Hidrológico, Drenagem Urbana e Urbanização.....	13
2.2. Sistema de Manejo Sustentável das Águas Pluviais	40
3. Legislação Aplicada.....	60
3.1. Lei das Águas (9.433/97)	60
3.2. Política Estadual de Recursos Hídricos (3.239/99).....	62
3.3. Estatuto da Cidade (10.257/01).....	64
3.4. Lei do Saneamento (11.445/07).....	67
3.5. Experiência Municipal Brasileira.....	68
4. Medidas de Controle para o Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais da Bacia do rio Pilar/Calombé.....	70
4.1. Medidas de Curto Prazo (Emergenciais e Corretivas).....	71
4.2. Medidas de Médio Prazo.....	71
4.3. Medidas de Longo Prazo	72
4.4. Sistema de Modelagem Matemática	75
4.4.1. Base de Dados.....	77
4.4.2. Modelo de Células de Escoamento para Bacias Urbanas - MODCEL	77
5. Estudo de Caso – Bacia Hidrográfica do Rio Pilar / Calombé	83
5.1. Caracterização da Bacia do Rio Pilar / Calombé.....	86
5.2. Plano Diretor Urbanístico do Município de Duque de Caxias-RJ.....	89
5.3. Aplicação do Modelo Hidrodinâmico	97
5.3.1. Levantamento de Dados	97
5.3.2. Estudos Hidrológicos.....	97
5.3.3. Modelagem Topográfica, Hidráulica e Topológica	102
5.3.4. Entrada de Dados	106

5.3.5. Processo de Calibração	109
5.3.6. Diagnóstico da capacidade atual do sistema de macrodrenagem	111
5.3.7. Cenários de Projeto Simulados	115
5.3.8. Cenários Futuros.....	135
6. Resultados da Modelagem.....	139
6.1. Resumo dos Cenários Simulados	139
6.2. Resultados da Simulação.....	140
6.2.1. Diagnóstico da Capacidade Atual do Sistema de Macrodrenagem.....	140
6.2.2. Condição 1 – Solução Convencional de Canalização.....	145
6.2.3. Condição 2 – Projeto Sustentável com uso de Medidas Distribuídas na Bacia	162
6.2.4. Análise Comparativa dos Resultados	188
7. Conclusões e Recomendações.....	193
7.1. Conclusões	193
7.2. Recomendações	198
Referências Bibliográficas	201

1. Introdução

Historicamente o problema das enchentes urbanas foi tratado como uma consequência direta do excesso de chuva, sem se considerar, necessariamente, o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema interrelacionado e interdependente. Esta visão levou a engenharia a buscar soluções locais, intervindo no efeito provocado pelas precipitações na bacia urbanizada, ou seja, na adequação do sistema de drenagem às novas vazões geradas pós-urbanização.

Com esta abordagem, os projetos convencionais de controle de enchentes buscavam o aumento da capacidade dos rios e canais em drenar mais rapidamente as águas pluviais, isto é, o sistema de drenagem deveria atender às mudanças geradas pelo processo de urbanização nos hidrogramas naturais da bacia, que, pelo aumento da impermeabilização do solo, acentua e antecipa o pico do hidrograma de cheia.

A partir da década de 70, do século XX, observa-se um grande crescimento da preocupação com o meio ambiente, transformando a natureza em assunto indissociável do desenvolvimento humano. Isso pode ser visto na criação do Clube de Roma, nascido nos anos 60 para discutir e analisar a situação em que o mundo se encontrava, prevendo e sugerindo soluções para o futuro da humanidade. Em 1972 o Clube de Roma publica o relatório “Os limites do crescimento”¹, trazendo à tona as possíveis consequências do modelo de crescimento adotado pelos países e propondo uma diminuição nos níveis de consumo como única solução ao esgotamento dos recursos naturais. Apesar de as propostas formuladas pelo Clube de Roma adotarem uma perspectiva claramente *malthusiana*, com fortes implicações econômicas e políticas, sobretudo para os países periféricos, as discussões introduzidas por esse grupo de pesquisadores teve o mérito de trazer novos contornos para a discussão acerca do desenvolvimento das nações.

O relatório realçava a ineficiência das abordagens gradativas para solução dos crescentes problemas ambientais devido à superexploração dos recursos naturais, expondo a idéia de uma correspondência entre o aumento da demanda e a escassez dos recursos. Segundo essa corrente de pensamento, a população mundial apresentaria sempre um crescimento positivo, impondo uma validade de curto prazo para as soluções adotadas, uma vez que novos limites seriam criados à medida que a população crescesse. Isso fez com que o Clube de Roma

¹ Meadows *et al.* - "The limits of growth" - Universe Books. Nova York, 1972

propusesse a redução da população e o crescimento zero como única alternativa de combate a escassez dos recursos, seja por uma auto-restrição imposta pelos governos ou pelo próprio colapso do sistema.

Baseados nas previsões do Clube de Roma, diversos outros estudos em todo o mundo voltaram-se para um melhor entendimento da relação homem-natureza, e em junho de 1972, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, congregando mais de 110 países, entre eles o Brasil. Deste encontro, popularmente conhecido como “Conferência de Estocolmo”, foi proposta uma nova concepção de desenvolvimento, visando não uma simples diminuição da produção, mas uma produção mais inteligente, mais racionalizada e sem desperdícios. Nascia em Estocolmo o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”, que viria a entrar na agenda do desenvolvimento em diversos países, sobretudo após a Reunião de Cúpula das Nações Unidas para o Meio Ambiente no Rio de Janeiro, em 1992, a ECO-92, com a elaboração da Agenda 21, que definiu os seguintes objetivos voltados para a promoção do desenvolvimento sustentável dos assentamentos humanos:

- ✓ oferecer a todos habitação adequada;
- ✓ aperfeiçoar o manejo dos assentamentos humanos;
- ✓ promover o planejamento e o manejo sustentáveis do uso da terra;
- ✓ promover a existência integrada de infra-estrutura ambiental: água, esgotamento sanitário, drenagem e manejo dos resíduos sólidos.

O conceito de desenvolvimento sustentável passou a incorporar, ao menos no papel, novas diretrizes para o planejamento das cidades. Essa nova abordagem visa transformar a visão hegemônica fortemente fragmentada e setorial, com os diversos setores de infra-estrutura urbana tratados separadamente, por diferentes secretarias e instituições sem articulação entre si, por um planejamento integrado das políticas públicas que interferem no território.

A abordagem integrada aplicada ao plano de drenagem urbana consiste na vinculação, de forma simultânea, dos aspectos ligados ao manejo das águas pluviais com o projeto de ordenamento territorial, agregando soluções para problemas relacionados às águas pluviais, à valorização do espaço urbano ou, de forma inversa, buscando a adoção de padrões urbanísticos adequados ao manejo sustentável das águas pluviais. A nova visão acadêmica e técnica sobre as inundações urbanas salienta a importância do tratamento do problema em sua

fonte, de uma maneira sistêmica, com ações distribuídas sobre a paisagem urbana, a fim de atenuar e retardar o pico de cheia, permitindo também, a recarga das águas subterrâneas pelo favorecimento da infiltração, procurando restabelecer, o quanto possível, as condições naturais de escoamento pré-urbanização (MASCARENHAS *et al.*, 2007).

Porém, a visão convencional da mera adaptação do sistema de drenagem aos padrões de escoamento das águas pluviais modificados pelo processo de urbanização e alteração do uso do solo ainda é freqüentemente adotada, principalmente nos países periféricos como o Brasil. Nesta linha, grandes investimentos são destinados a obras de controle de enchentes sem a devida consideração das diversas relações entre as parcelas do ciclo hidrológico e do funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema. Como conseqüência, o poder público é obrigado a realizar recorrentes intervenções para adequar o sistema de drenagem às novas vazões de cheia, modificadas pela alteração do uso e ocupação do solo, devido a um processo de urbanização desordenado e sem planejamento.

As características hidrológicas de uma área estão intimamente ligadas ao tipo de uso e ocupação do solo. Leopold (1968) destacou quatro importantes efeitos na hidrologia de uma área ocasionados por mudanças no uso o solo, sendo esses efeitos causadores de alterações:

- ✓ nas características da vazão de pico de escoamento (*peak flow*);
- ✓ na quantidade do escoamento superficial (*runoff*);
- ✓ na qualidade da água;
- ✓ nas amenidades hidrológicas (*hydrologic amenities*²).

De todas as mudanças no uso do solo que afetam a hidrologia de uma área, a urbanização é a mais impactante. O crescimento urbano acarreta profundas modificações no uso do solo, que exerce grande influência no balanço hidrológico de uma região. Uma urbanização sem planejamento pode alterar significativamente as parcelas do ciclo hidrológico, gerando transtornos para a população residente na bacia hidrográfica. Essas alterações podem ser:

- ✓ redução da interceptação;

² Segundo Leopold (1968), a expressão *Hydrologic amenities*, pode ser utilizada para descrever a impressão ou aparência que o rio, seus canais e seus vales, causam no observador. Neste trabalho, a expressão é entendida como o valor ambiental da bacia hidrológica.

- ✓ redução da evapotranspiração;
- ✓ redução do armazenamento superficial;
- ✓ redução da infiltração e recarga dos lençóis subterrâneos;
- ✓ aumento do volume do escoamento superficial.

O volume de escoamento superficial é função das características de infiltração, da declividade da superfície e do tipo de cobertura vegetal, variáveis altamente modificadas pela urbanização de uma bacia (Leopold, 1968). Uma consequência direta dessas alterações no ciclo hidrológico, decorrentes do processo de urbanização sem um planejamento adequado, é o aumento da frequência e magnitude das inundações nos períodos das chuvas. Esse quadro resulta na necessidade de investimentos do poder público para minimizar os prejuízos acarretados pelas inundações. Frequentemente esses investimentos são destinados para soluções clássicas, não sustentáveis, que produzem uma falsa sensação de segurança à população. Na falta de uma política planejada de uso e ocupação do solo, a população ocupa as áreas cujo risco foi supostamente reduzido pelas obras de drenagem. Essa situação pode acarretar os seguintes novos problemas:

→ transferência da inundação para jusante pelo aumento da velocidade e da capacidade dos escoamentos produzidos pelas obras de drenagem;

→ necessidade de maiores investimentos nas áreas mais baixas da bacia devido ao aumento do volume de água drenado das partes altas;

→ necessidade de novos investimentos na rede de drenagem para adequar as estruturas às novas vazões decorrentes das modificações no padrão de urbanização da bacia.

Compreender a maneira pela qual o processo de urbanização age sobre as inundações é muito importante para um planejamento urbano adequado. A combinação de medidas estruturais e não-estruturais, integradas aos planos diretores, e o uso de estruturas da paisagem urbana com funções hidráulicas, permite uma composição capaz de lidar com os problemas de inundação urbana de forma sustentável (MIGUEZ *et al.*, 2005).

A saúde e a vitalidade dos rios e áreas ribeirinhas são ingredientes essenciais à saúde e ao bem-estar de toda a população residente na bacia. Assegurar a sua continuidade sustentável,

no intuito de se alcançar benefícios sociais, econômicos, culturais e ambientais, é um objetivo a ser perseguido e compartilhado por todos os agentes interessados.

1.1. Objetivos

Para este trabalho de pesquisa, os objetivos foram destacados em dois grupos, *objetivo geral* e *objetivos específicos*. No primeiro, é definida a finalidade do estudo, sendo no segundo, definidas as metas necessárias para alcançar esta finalidade.

1.1.1. Geral

Como objetivo geral, o presente trabalho visa:

- ✓ demonstrar a necessidade da articulação do Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais com os demais planos urbanísticos, em especial com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.

1.1.2. Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- ✓ apresentar a concepção do manejo sustentável de águas pluviais, suas principais características e sua aplicação em uma bacia localizada na Baixada Fluminense;
- ✓ analisar o comportamento hidrológico e hidrodinâmico de uma bacia hidrográfica sujeita a profundos impactos no uso e ocupação do solo, devido ao processo de urbanização;
- ✓ analisar a validade de dois projetos com diferentes concepções, *convencional* X *sustentável*, para o controle de inundações, considerando possíveis cenários de desenvolvimento urbano;
- ✓ discutir os possíveis benefícios de um planejamento urbano integrado, considerando os processos de urbanização *vis-à-vis* um plano de manejo sustentável de águas pluviais.

1.2. Motivação

Nos países periféricos, a industrialização tardia induziu um rápido processo de urbanização, observado na segunda metade do século XX. O veloz crescimento da população urbana dificultou a elaboração de um planejamento adequado, que criasse uma paisagem urbana projetada e funcional, em uma cidade guiada por planos diretores. Diversas áreas cresceram sem qualquer tipo de planejamento ou controle, criando regiões com muitos problemas e desafios, onde a arquitetura e a engenharia devem buscar novas soluções para adequar essa cidade irregular. Em alguns casos, o processo de urbanização progride para um nível no qual altas taxas de impermeabilidade e densidade demográfica são atingidas, com uma ocupação generalizada de toda a bacia, inclusive áreas naturalmente sujeitas a inundações. Nestes casos, essas regiões podem ser classificadas como ambientes ultra-urbanos (MIGUEZ *et al.*, 2005).

No Brasil, inúmeras abordagens ditas convencionais aos desafios de drenagem urbana e controle das inundações podem ser encontradas. Uma região emblemática e muito representativa da história do desenvolvimento das medidas de combate às enchentes encontra-se no estado do Rio de Janeiro, mais precisamente na região denominada Baixada Fluminense.

A Baixada Fluminense apresenta uma gama de dificuldades e problemas ligados ao processo de urbanização em regiões metropolitanas, como um passado com crescimento populacional vertiginoso, ocupação e uso do solo sem planejamento e controle, falta de investimentos em infra-estrutura urbana e descontinuidade nas políticas públicas.

A região da Baixada Fluminense abrange uma grande área situada na Baía de Guanabara, delimitada pelas serras do Tinguá, Gericinó e do Mar, apresentando originalmente extensas áreas de alagadiços e pântanos nas margens dos rios Iguaçú, Inhomirim, Sarapuí, Meriti e em vários de seus afluentes. Hoje a Baixada Fluminense (antiga Baixada da Guanabara) é composta pelos municípios de Magé, Duque de Caxias, São João de Meriti, Belford Roxo, Nilópolis, Mesquita e Nova Iguaçu.

A partir do final do século XIX, os pântanos existentes foram considerados inimigos da saúde pública e da qualidade de vida dos moradores da Baixada Fluminense, e iniciaram-se inúmeros planos e intervenções para promover o dessecamento dessas regiões, como o imposto implantado sobre “carro, carroças, carretões e zorras” de aluguel em 1857, destinando esta renda especificadamente ao serviço de dessecamento de pântanos, a limpeza e

canalização dos rios Bonga, Caioaba e Pilar (em Estrela) e dessecamento do pântano de Belém em Iguaçu, no ano de 1870 (TÔRRES, 1997) e as obras de retificação do rio Sarapuí e seu desvio para o curso inferior do rio Iguaçu, no início do século XX. Essas intervenções vieram sob a criação do antigo Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), que visavam “atender um interesse do Governo em criar um “cinturão verde” para abastecimento da capital e arredores em hortifrutigranjeiros, que vinham das distantes regiões do vale do Paraíba.” (LABHID, 1996).

Porém, com a queda da atividade agrícola na região e um processo de êxodo rural em todo o país, nos anos 50, as terras da bacia do rio Iguaçu/Sarapuí passaram a sofrer uma intensa especulação imobiliária, através da criação de loteamentos sem qualquer controle, desrespeitando as mínimas condições de habitabilidade. Esse processo de ocupação urbana resultou no aumento da perda de eficiência das obras de saneamento do DNOS, que já possuíam pouca ou nenhuma manutenção, tornando-as, em muitos casos, completamente inócuas.

Mais recentemente, as principais intervenções para o controle de inundações da bacia se deram pela criação do Comitê de Saneamento da Baixada, após a calamitosa enchente de 1988, e, mais recentemente, o *Plano Diretor Integrado de Controle de Inundações da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí*³, concluído pela SERLA em 1996 (LABHID, 1996).

Uma das bacias hidrográficas mais importantes da região, a bacia do rio Iguaçu-Sarapuí drena uma área de aproximadamente 726 km², abrangendo a totalidade dos municípios de Belford Roxo e Mesquita e parte dos municípios de Duque de Caxias, São João de Meriti, Nilópolis, Nova Iguaçu e Rio de Janeiro, todos pertencentes à Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Além da importância regional e econômica da área em que a bacia se encontra, podem-se destacar como pontos importantes:

- ✓ apresenta áreas com grande desenvolvimento urbano e industrial;
- ✓ possui áreas rurais em processo de urbanização;
- ✓ possui mananciais importantes para o abastecimento de água da Baixada Fluminense;
- ✓ apresenta grande número de habitações em áreas inundáveis.

³ Disponível em www.hidro.ufrj.br. Acessado em 14/12/2009

Além disso, essa bacia recebeu importantes investimentos para o controle das enchentes a partir dos anos 30 do século XX, primeiramente implantando-se estruturas projetadas para uso agrícola, como destaca Carneiro (2003):

(...) o início de uma ação articulada no setor de recursos hídricos no país só ocorreu no ano de 1933 com a criação da Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense, no âmbito do Departamento Nacional de Portos e Navegação. Essa Comissão foi responsável pela formulação de um extenso programa de drenagem da Baixada Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, sem precedentes no país, com o intuito principal de tornar agricultável a vasta planície lacustre do Estado do Rio de Janeiro e, secundariamente, erradicar a febre amarela e controlar as inundações.

Com o intenso crescimento populacional e a ocupação não planejada da bacia, essas estruturas tornaram-se obsoletas e a população passou a sofrer constantemente com os efeitos das inundações urbanas.

No ano de 1988, um evento hidrológico de grande magnitude atingiu a Baixada, acarretando grandes perdas econômicas para a região, destruição de edificações e perda de vidas. A partir desse evento, o Governo do Estado do Rio de Janeiro criou o programa Reconstrução-Rio, de caráter emergencial e que visava à reestruturação da infra-estrutura urbana das áreas afetadas, com ênfase nas obras de macrodrenagem.

Após essas intervenções, ainda encontravam-se diversos locais com intensos problemas de inundações, primordialmente pela dificuldade em se solucionar o problema da ocupação das áreas de risco, devido, sobretudo, à falta de políticas urbanas e habitacionais que contivessem a ocupação desordenada e irregular. Isso fez com que se adotassem medidas estruturais mais dispendiosas, como implantação de grandes galerias e canalização dos cursos d'água em concreto, comprometendo o orçamento total do plano e inviabilizando medidas de controle em outras localidades (LABHID, 1996).

Para aumentar e difundir os benefícios do controle de inundações e atender às áreas desfavorecidas pelo programa Reconstrução-Rio, a SERLA montou uma equipe técnica para a confecção do Plano Diretor Integrado de Controle de Inundações da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí, tendo sido seu relatório final publicado em fevereiro de 1996.

No Relatório Final do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí (LABHID, 1996) foram destacadas conseqüências desse processo de ocupação ocorrido na Baixada Fluminense, processo esse que permaneceu com o mesmo padrão até os dias de hoje, sendo aquelas mencionadas conseqüências aqui repetidas como verdadeiramente atuais:

- ✓ ocupação do leito maior dos rios e, em muitos casos, do leito menor, o que tem impossibilitado a construção de avenidas canais e a manutenção dos cursos d'água;
- ✓ acelerado processo de assoreamento, devido ao desmatamento das encostas e ao lixo não recolhido por administrações municipais bastante carentes;
- ✓ aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização da bacia hidrográfica;
- ✓ destruição das estruturas hidráulicas, particularmente comportas e bombas, para venda dos componentes como sucata ou por puro vandalismo.

Recentemente, no ano de 2008, foi iniciada a revisão desse plano, denominado *Plano Diretor de Recursos Hídricos, Controle de Inundações e Recuperação Ambiental da Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí*, com vistas à formação de base técnica atualizada para elaboração de projetos de controle de inundações que viabilizassem investimento do Governo Federal através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Esse estudo de revisão, elaborado pelo Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente da COPPE/UFRJ, previu ações conjuntas para prover a preservação ambiental e evitar a degradação da área urbana, por meio de intervenções estruturais na macrodrenagem e não estruturais, como a revisão dos Sistemas de Controle do Uso do Solo. Essas ações tomam por base os mais recentes conceitos de controle das inundações, utilizando técnicas de reservação, recuperação ambiental dos cursos d'água e preservação das áreas de infiltração natural e amortecimento de cheias.

1.3. Hipóteses de Trabalho

A estratégia de combate às enchentes deve considerar todos os aspectos relacionados às águas pluviais, sua dependência dos processos físicos da bacia hidrográfica e sua interação com o processo de urbanização da região.

Considerando o exposto até aqui, a seguinte hipótese foi considerada neste trabalho:

→ Os sistemas de manejo sustentável de águas pluviais, considerando a abordagem integrada de planejamento na busca de soluções, produzem significativos benefícios econômicos e sociais quando confrontados com técnicas convencionais de combate às inundações, possibilitando uma maior eficiência na gestão das águas urbanas.

1.4. Metodologia Geral

Para a realização deste trabalho foi adotado um procedimento metodológico baseado nas seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica, buscando uma sustentação teórica para o trabalho.
2. Definição da bacia do rio Pilar/Calombé, no município de Duque de Caxias, RJ, como Estudo de Caso.
3. Definição do Modelo de Células de Escoamento como ferramenta de modelagem.
4. Elaboração de um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais para a bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé.
5. Elaboração das alternativas de intervenção e definição dos cenários de simulação para diagnóstico e avaliação dos projetos.
6. Simulação dos cenários propostos e apresentação dos resultados.
7. Discussão dos resultados frente às alternativas e seus possíveis benefícios.

1.5. Escopo do Trabalho

Após feita a introdução do tema de inundações urbanas, apresentado os objetivos do presente trabalho e suas etapas metodológicas para alcançar esses objetivos neste Capítulo 1, será apresentado, no Capítulo 2, um estudo de revisão bibliográfica a fim de se situar o estado da arte do controle de inundações urbanas e, com isso, construir uma base teórica para sustentar o trabalho.

No Capítulo 3, estão descritas brevemente possíveis relações entre a legislação brasileira e o controle de inundações, apresentando algumas leis que podem interferir no processo de gerenciamento das inundações urbanas e no manejo das águas pluviais. Também são comentados alguns casos de aplicação da legislação municipal para um melhor resultado do controle sobre a urbanização na busca de um menor impacto sobre o sistema de drenagem.

O Capítulo 4 apresenta a proposta de um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais para o controle de inundações na bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé, baseado nos conceitos

apresentados na revisão bibliográfica. Esse Plano visa instituir estratégias de controle com medidas de intervenção distribuídas pela bacia, para o curto, médio e longo prazo, no intuito de se adequar o controle de inundações aos novos conceitos de manejo sustentável, procurando combinar as técnicas de controle com medidas de preservação ambiental e valorização urbana. Para uma melhor compreensão do processo de pesquisa para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho, neste capítulo são apresentadas as etapas metodológicas para simulação dos cenários, as fontes de aquisição de dados necessários ao estudo e uma síntese sobre a ferramenta de modelagem escolhida para simulação dos cenários escolhidos, o Modelo de Células de Escoamento⁴.

A aplicação dos conceitos discutidos é apresentada no Capítulo 5, que descreve o local escolhido para o estudo de caso. Neste capítulo são também apresentados os cenários de simulação para o diagnóstico dos problemas de inundações presentes na região e para os projetos propostos para comparação, sendo um representativo de práticas tradicionais da engenharia de drenagem, ainda muito utilizadas, a canalização em concreto da macrodrenagem, e outro representativo de uma nova concepção, fazendo uso de medidas distribuídas na bacia, evitando a rápida transferência das águas para jusante.

Após descrever os projetos propostos e os cenários de simulação, são apresentados, no Capítulo 6, os resultados para cada cenário simulado, trazendo ao final um item de comparação entre os resultados, para, assim, confrontar os possíveis benefícios e problemas resultantes de cada intervenção.

Finalmente, no Capítulo 7 é feita a conclusão do trabalho, apresentando os resultados alcançados com esta pesquisa e sugerindo recomendações para futuros trabalhos nesta linha de abordagem.

⁴ MODCEL – Modelo de Células de Escoamento para Cálculo de Cheias Urbanas em Planícies de Inundação – LHC/COPPE/UFRJ (MIGUEZ, 2001; MASCARENHAS e MIGUEZ, 2002; MASCARENHAS et al 2005)

2. Revisão Bibliográfica

A Drenagem Urbana pluvial tem tido diversas considerações ao longo da história, sendo as águas pluviais encaradas como recurso vital, conveniente mecanismo de limpeza, eficiente meio de transporte para resíduos, interesse para as inundações urbanas, efluente incômodo e também meio transmissor de doenças (BURIAN e EDWARDS, 2002).

A abordagem tradicional do problema de inundações urbanas foca, geralmente, a readequação da rede de drenagem, principalmente através de projetos de galerias e canais, objetivando o rápido transporte das águas pluviais excedentes para longe do local de intervenção. Essa solução mostra-se adequada em um primeiro momento, transferindo todo o excesso de água de uma região com problemas para jusante. Porém, a urbanização de regiões mais altas da bacia implica no aumento do aporte de águas pluviais afluentes para essa região, demandando novas intervenções na rede de drenagem para a readequação da sua capacidade hidráulica, de acordo com as novas vazões de cheia. Porém, com o passar do tempo, a simples adequação da rede para as novas vazões geradas, torna-se um grande problema, exigindo cada vez maiores áreas em um ambiente já, muitas vezes, completamente ocupado, levando à necessidade de desapropriações e realocações de moradias, o que pode inviabilizar a obra, seja economicamente ou socialmente.

Assim, cria-se a necessidade de uma nova visão, mais abrangente e sistêmica, capaz de oferecer uma maior sustentabilidade aos processos de controle de inundações. Essa abordagem holística surge como uma quebra do antigo paradigma de rápido transporte das águas de chuva e é baseado no:

“(...) conceito de drenagem sustentável, o qual estabelece que sistemas de drenagem precisam ser concebidos no intuito de minimizar impactos da urbanização sobre os padrões naturais de escoamento, combinando aspectos quantitativos e qualitativos, alcançando objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no espaço e no tempo.” (MIGUEZ e MAGALHAES, 2010)

Este capítulo visa situar a problemática da drenagem urbana e do controle de inundações em seu Estado da Arte, apresentando uma revisão bibliográfica sobre o tema, no intuito de se criar um embasamento teórico para suportar a discussão pretendida neste trabalho.

2.1. Ciclo Hidrológico, Drenagem Urbana e Urbanização

A água circula pelo planeta em todos os seus estados, líquido, sólido e gasoso. A essa circulação dá-se o nome *ciclo hidrológico*, o qual Silveira (2004) define da seguinte maneira:

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. (SILVEIRA, 2004)

Essa circulação acontece em diversos sentidos, sendo de grande importância as trocas verticais entre a superfície terrestre e a atmosfera. O transporte da água no sentido *superfície terrestre* → *atmosfera* acontece principalmente através dos fenômenos de evapotranspiração, sendo o inverso, *atmosfera* → *superfície terrestre*, ocorrendo em qualquer estado físico da água, sendo mais significativos os transportes decorrentes de precipitações, tanto como chuva quanto como neve.

O ciclo hidrológico pode ser analisado em suas diferentes fases. Inicialmente, a energia solar fornece calor para aquecer a superfície terrestre e, conseqüentemente, evaporar as águas em estado líquido presentes nos oceanos, lagos e rios, somando-se ao fenômeno de transpiração vegetal e assim transportando a água para a atmosfera. Uma vez na atmosfera, o vapor d'água pode condensar-se, formando micro-partículas de gotas de água que se juntam com partículas de poeira e eventualmente gelo para formar um aerossol que conhecemos como as nuvens.

O gelo e a poeira funcionam como núcleos de aglutinação que fazem com que as partículas de água fiquem maiores e mais pesadas, até alcançarem um ponto em que seu peso torna-se superior às forças de turbulência e empuxo que as mantêm suspensas no ar. Quando isso acontece ocorre o fenômeno da precipitação, que em forma de chuva ou gelo, transporta a água de volta à superfície terrestre.

Caindo sobre a superfície, a água precipitada fica inicialmente retida na vegetação e em outros obstáculos até alcançar o solo. Uma vez no solo, a água infiltra-se pelos poros, podendo seguir caminho verticalmente até alcançar o lençol freático, ou percolar pela camada superior do solo até retornar à superfície. Quando o solo encontra-se saturado, ou quando a quantidade de água que chega à superfície é superior à capacidade de infiltração, inicia-se o processo de escoamento superficial, que é caracterizado pelo movimento das águas de chuva sobre as superfícies até alcançarem talvegues para formar pequenos caminhos de água e assim chegarem aos rios, lagos e oceanos.

A interferência do ser humano neste processo se dá de forma mais significativa na tentativa de se controlar os processos de escoamento superficial por uso da drenagem, que é, historicamente, a infra-estrutura responsável por direcionar as águas precipitadas sobre o solo mais rapidamente para o seu destino final, evitando que fique acumulada em regiões de interesse para ocupação humana.

O sistema de drenagem urbana constitui-se basicamente de dois subsistemas característicos:

1. Macro-Drenagem → É formada pela hidrografia natural da bacia. A rede de macro-drenagem recebe grandes intervenções hidráulicas a fim de retificar os rios, aumentar sua capacidade de escoamento, diminuir áreas de alagamento, entre outras, com riscos ou recorrência variando entre 10 e 100 anos. Mas, essas intervenções convencionais normalmente tornam-se obsoletas pela falta de manutenção ou projetos mal dimensionados, ou ainda, como é muito comum nos países em desenvolvimento, perdem sua validade, pois não contam com uma boa política de habitação e uso do solo que alteram significativamente as parcelas do ciclo hidrológico da bacia, exigindo revisões das estruturas dimensionadas.
2. Micro-Drenagem → É constituída pela drenagem dos loteamentos urbanos e áreas públicas como praças, parques e ruas, convencionalmente visando à retirada das águas precipitadas e sua condução para a rede secundária, ou macro-drenagem, o mais rapidamente possível, com um risco associado de 2 a 10 anos.

Tucci (2003) divide os problemas relacionados com as inundações em dois processos principais:

- ✓ *Inundações de áreas ribeirinhas*: ocorre principalmente pelo processo natural de cheia do rio em eventos de grandes precipitações. Nestas ocasiões o nível d'água do rio sobe e passa a escoar em sua calha secundária, com uma recorrência de aproximadamente 2 anos (TUCCI, 2003). A inundação ocorre quando essa calha secundária está ocupada por habitações humanas, que acabam por dificultar 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*: ocorre principalmente em consequência do aumento da taxa de impermeabilização do solo devido o processo de urbanização. Na medida em que a

cidade se desenvolve, reduz-se a cobertura vegetal e impermeabilizam-se as superfícies, dificultando a infiltração da água de chuva no solo e assim, aumentando o volume de água escoada superficialmente, podendo superar a capacidade de escoamento de rios, córregos, canais e da própria rede de microdrenagem.

A prática moderna da Drenagem Urbana tem início nas cidades européias durante o século XIX. Segundo BURIAN *et al.* (1999), o desenvolvimento da drenagem urbana nos Estados Unidos, durante os séculos XIX e XX, pode ser agrupado em nove categorias:

1. Melhorias nos materiais das tubulações, nos métodos construtivos e práticas de manutenção.
2. Uso do sistema de condução da água para remover as águas residuárias.
3. Projeto detalhado do sistema de esgotamento.
4. Sistema unitário versus sistema com separação absoluta.
5. Identificação das doenças de veiculação hídrica.
6. Introdução do tratamento de águas residuárias.
7. Avanços no campo da Hidrologia Urbana.
8. Avanços computacionais.
9. Consciência ambiental.

Os impactos causados pelas enchentes vêm crescendo muito devido às modificações antrópicas nas bacias hidrográficas e a progressiva ocupação das áreas naturais de inundação. A urbanização modifica o ciclo hidrológico, alterando suas parcelas e o balanço hídrico da bacia hidrográfica como ilustrado na Figura 2.1. A urbanização caótica associada ao uso inadequado do solo provoca a redução da capacidade de armazenamento natural dos deflúvios. A solução adotada tradicionalmente visa o aumento da velocidade dos escoamentos com obras de canalização (CANHOLI, 2005).

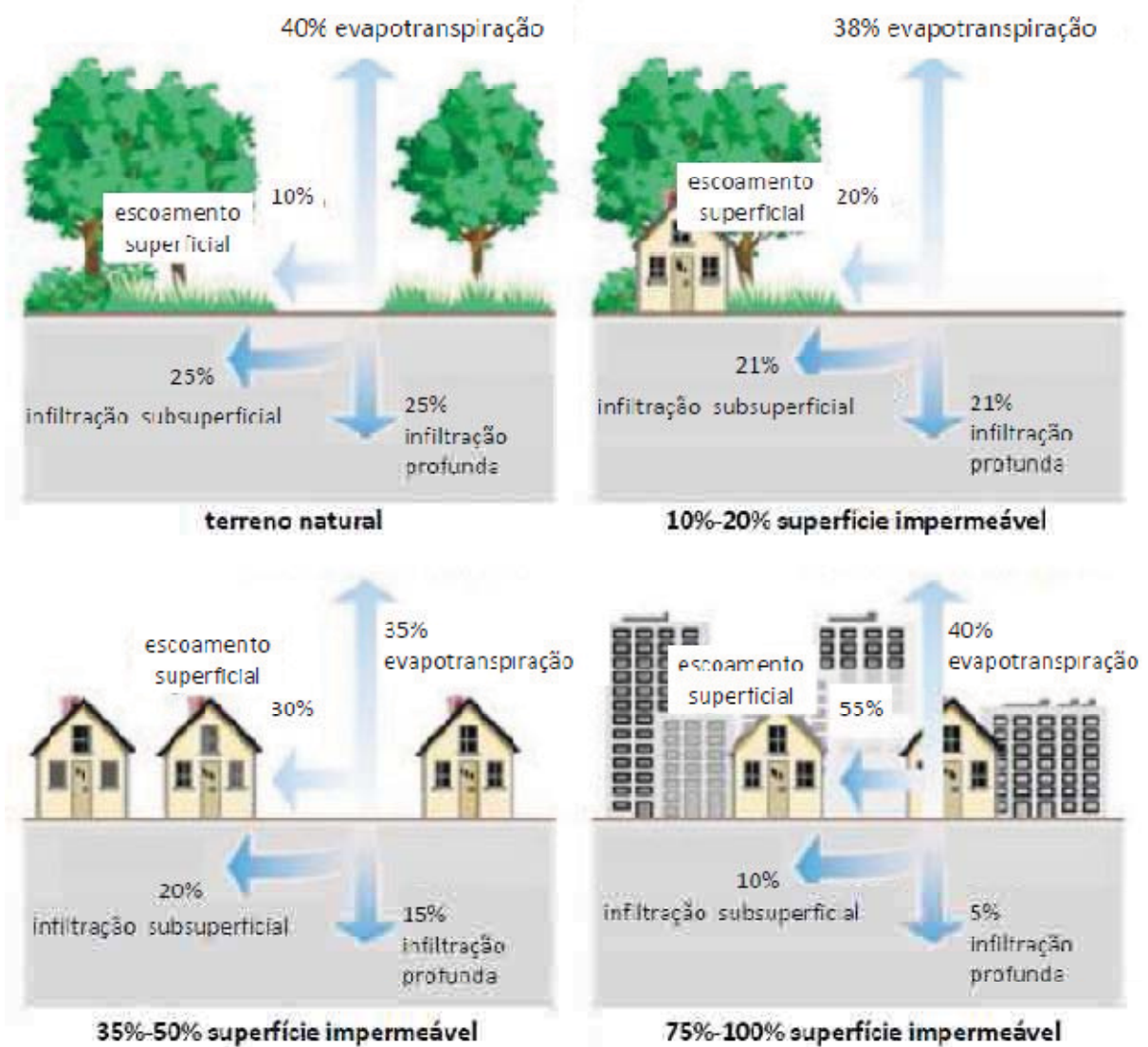


Figura 2.1 – Alterações nas parcelas do ciclo hidrológico em diferentes fases da urbanização (FISRWG, 2001, apud CARDOSO, 2008)

Miguez (2005) enfatiza alguns aspectos relacionados à urbanização e às inundações urbanas comuns em países periféricos:

- ✓ Grande crescimento populacional em um curto período de tempo;
- ✓ Urbanização sem planejamento e desordenada;
- ✓ Deficiência na cobertura espacial das infra-estruturas de saneamento;
- ✓ Grande necessidade de definição de planos e orientações para o gerenciamento da drenagem urbana e qualificação do quadro técnico municipal;
- ✓ Políticas habitacionais incapazes de prevenir e evitar ocupações irregulares;

- ✓ Ocupação de áreas de risco de inundações legais e ilegais;
- ✓ Grande número de sub-habitações;
- ✓ Falta de programas de educação e sensibilização da população, que freqüentemente causam danos às estruturas de controle de inundações e dispõem resíduos domésticos nas ruas e nas margens dos rios;
- ✓ Dificuldade para diagnosticar os problemas e implantar soluções devido a problemas de segurança pública, em áreas à margem da cidade local.

Habitualmente, o processo de urbanização tem seu início nas áreas mais baixas da bacia, que possuem um melhor acesso e melhores condições para a construção, permitindo a instalação das comunidades e atividades produtivas. Após a ocupação das áreas mais planas, a urbanização se expande para as regiões mais altas, substituindo a vegetação natural por áreas impermeáveis e, assim, dificultando a retenção das águas de chuva.

Os impactos causados no ciclo natural da água pelo processo de urbanização de uma área ocorrem em todas as suas etapas de desenvolvimento, desde a fase de limpeza do terreno até a fase de implantação da rede de drenagem, como segue (TORONTO AND REGION CONSERVATION, 2006):

1. Com a limpeza dos terrenos para a preparação do local, é removida a cobertura vegetal que é responsável por interceptar e desacelerar o escoamento superficial e devolver a água para a atmosfera através da evapotranspiração.
2. Os serviços de terraplanagem nivelam o terreno, eliminando as depressões naturais que diminuem a velocidade do escoamento e providenciam o armazenamento provisório para a água da chuva infiltrar ou evaporar.
3. A retirada do solo e da camada de húmus superficial e a compactação do subsolo reduzem ou eliminam o percurso de recarga das águas subterrâneas, reduzindo também a capacidade do solo de reter umidade e retornar água para a atmosfera através da evapotranspiração. A água que infiltraria e reabasteceria as águas subterrâneas, é rapidamente transformada em escoamento superficial.

4. A adição de superfícies impermeáveis associadas a comunidades, com prédios, ruas e estacionamentos, reduz ainda mais as características de infiltração do solo, contribuindo para aumentar o escoamento superficial.
5. Esses efeitos são agravados pela implantação dos serviços de drenagem, compostos pelas sarjetas, galerias de drenagem e canais que são incorporadas ao desenvolvimento urbano para prover o rápido transporte das águas de chuva para os corpos receptores.

Leopold (1968) agrupa os impactos causados na bacia hidrográfica, pela urbanização, em três grupos: **impactos na quantidade, impactos na qualidade e impactos no valor ambiental** da bacia. Um fator influente sobre todos esses grupos é a produção de sedimentos. O sistema hidrodinâmico tem suas características definidas, em parte, pela existência de sedimentos misturados à água, que ajudam a definir a morfologia dos corpos d'água. A produção de sedimentos em áreas urbanas tende a ser muito maior que em áreas não urbanizadas, principalmente pela existência de solo exposto em áreas de construção, o que leva ao desequilíbrio natural desses sistemas.

Impactos na quantidade

Uma alteração ocasionada pela urbanização, bem perceptível, é aquela causada no regime de escoamento dos rios, que está diretamente relacionada à porcentagem de área impermeável na bacia e à velocidade do escoamento através das planícies até os rios. A primeira depende do tipo do uso e ocupação do solo, enquanto a segunda depende da densidade, do tamanho e das características dos rios tributários e da existência de sistema de drenagem. O aumento da impermeabilização de superfícies e a implantação de rede de drenagem podem aumentar as vazões máximas de um evento de chuva em até 6 vezes (LEOPOLD, 1968). Esse aumento pode ser visto na relação mostrada no gráfico da Figura 2.2.

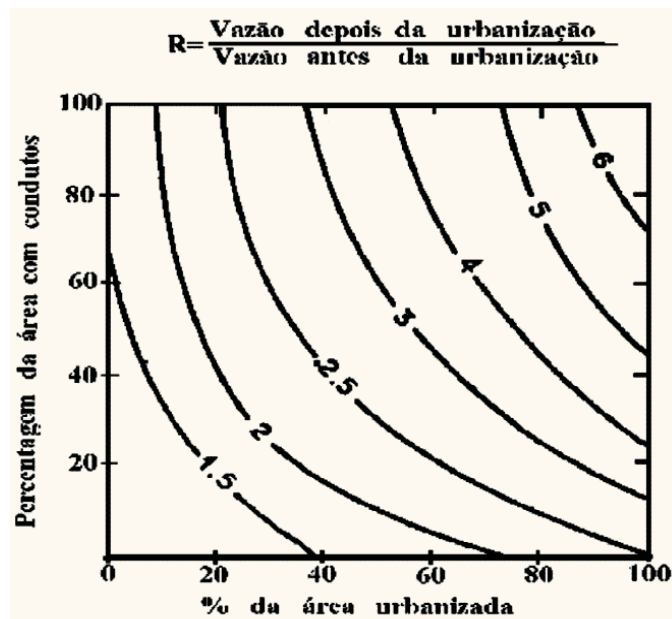


Figura 2.2 – Aumento da vazão de pico após o processo de urbanização (LEOPOLD, 1968)

Mascarenhas et al. (2005) simulou os efeitos da urbanização em uma área com 360 m², considerando variações nas condições locais de uso e ocupação do solo, desde as condições de cobertura vegetal natural até a condição de impermeabilização de quase toda a área. O resultado dessa avaliação, considerando um evento hidrológico com tempo de recorrência de 5 anos e duração crítica para toda a bacia, demonstrou um aumento no pico de vazão de cerca de 3,4 vezes devido a urbanização da área.

A variação do volume de escoamento superficial, além de impactar os picos de vazão nas cheias, também influencia o escoamento de base dos rios, pois grandes volumes de escoamento superficial diminuem a água disponível para renovação da umidade do solo e recarga do armazenamento de água subterrânea. Portanto, o aumento da impermeabilização do solo leva ao aumento do volume de escoamento superficial, que, por sua vez, aumenta os picos de cheia nas épocas de fortes chuvas e diminui a vazão de base nas épocas secas.

Impactos na Qualidade

A introdução de efluentes de esgotos **in natura**, ou mesmo tratados em estações, é um grande agente de degradação dos corpos d'água. Essa introdução leva ao aumento da quantidade de nutrientes disponíveis, propiciando, assim, o crescimento de algas e bactérias, o que pode desequilibrar toda a biota aquática, levando, em casos extremos, à eutrofização do corpo d'água. Além disso, o uso agrícola também aumenta a quantidade de nutrientes nos rios, tanto

pela existência de excrementos de animais, como pelo uso de fertilizantes comerciais nas lavouras.

Mesmo em uma situação com cobertura total e eficiente de tratamento dos esgotos urbanos, a lavagem da superfície urbanizada pelas chuvas carrega para os corpos d'água inúmeros tipos de poluentes, como combustíveis e óleos, e também uma quantidade razoável de carga orgânica, tendo profundo impacto na qualidade da água. Tucci (2003) sintetizou alguns valores da literatura para a concentração de poluentes na água pluvial escoada sobre a superfície urbana. Esses valores estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores médios, em mg/l, de parâmetros de qualidade de água pluvial para algumas cidades (TUCCI, 2003)

Parâmetro	Durham ¹	Cincinatti ²	Tulsa ³	Porto Alegre ⁴	APWA ⁵	
					mín	máx
DBO		19	11,8	31,8	1	700
Sólidos Totais	1440		545	1523	450	14.600
PH		7,5	7,4	7,2		
Coliformes (NMP/100ml)				1,5·10 ⁷	55	11,2·10 ⁷
Ferro	12			30,3		
Chumbo	0,46			0,19		
Amônia		0,4		1,0		

¹ Colson (1974); ² Weibel et al. (1964); ³ AVCO (1970); ⁴ Ide (1984); ⁵ APWA (1969)

Impactos no valor ambiental (amenities)

Leopold (1968) destaca três principais fatores responsáveis pela deterioração do valor ambiental de uma bacia hidrográfica urbanizada:

- ✓ **Instabilidade do canal** → A mudança no regime de escoamento dos rios em áreas urbanas, altera a estabilidade do canal, que tende a apresentar margens instáveis e sem vegetação, leito assoreado e com lodo, e acúmulo de sedimentos e detritos.
- ✓ **Acúmulo de lixo nos canais e nas planícies** → Latas, garrafas, plástico, resíduos de construção, e todo tipo de resíduo gerado nas cidades.
- ✓ **Desequilíbrio da biota aquática** → O aumento de nutrientes favorece o crescimento de algas, aumenta a turbidez da água e pode gerar odores desagradáveis. O aumento da

turbidez e a diminuição do oxigênio dissolvido também reduzem a variedade de espécies aquáticas, como os peixes.

Toronto and Region Conservation (2006) categoriza os impactos da urbanização de acordo com seus efeitos no balanço hidrológico:

- ✓ **Mudanças no fluxo dos corpos d'água:** os efeitos podem ser sentidos pelo aumento do pico de vazão das cheias e da velocidade e do volume dos escoamentos superficiais, o que leva a um aumento dos riscos associados às inundações, uma vez que eventos com extravasamento da calha principal tornam-se mais freqüentes e intensos. A maior constância de eventos com escoamento no canal a plena calha, **id est**, calha cheia, leva à intensificação dos processos de erosão das margens. Outro efeito negativo está associado às vazões de estiagem, que tendem a diminuir devido à redução da capacidade de infiltração do solo, responsável pelo reabastecimento das águas subterrâneas.
- ✓ **Alterações na geometria dos canais:** as mudanças descritas acima causam grandes transformações na morfologia dos canais. A largura do canal aumenta para comportar o aumento da vazão em eventos de cheia, o que também propicia a erosão das margens, que por sua vez irão assorear o leito do rio nos trechos de jusante, mais lentos, pela sedimentação do material erodido. Isso faz com que a declividade média do corpo d'água tenda a diminuir, favorecendo ainda mais o processo de sedimentação, processo intensificado nas épocas de seca, quando as velocidades do fluxo são ainda menores. Por outro lado, a urbanização tende a aumentar a descarga de sedimentos grosseiros nos rios, o que intensifica o processo de erosão das margens e reduz a sinuosidade do curso, aumentando as velocidades de escoamento, a erosão do leito e, assim, aumentando a declividade do fundo. O alargamento da seção transversal pela erosão das margens expõe as raízes das árvores que compõem a mata ciliar, tornando-as vulneráveis aos eventos de cheia, enfraquecendo ainda mais a integridade estrutural das margens fluviais.
- ✓ **Degradação do habitat aquático:** essas mudanças nos padrões físicos do escoamento das águas pluviais causados pela urbanização da bacia hidrográfica acabam por degradar o meio aquático, reduzindo a sua qualidade ambiental. O aporte de água mais quente drenada de áreas impermeabilizadas e de bacias de retenção e a perda da mata ciliar podem ocasionar a elevação da temperatura média da água, o que contribui para a redução do nível de oxigênio dissolvido, imprescindível para a existência de um ecossistema

aquático equilibrado. As transformações morfológicas dos rios podem causar profundos efeitos de degradação ao ambiente aquático, desde a completa retirada de comunidades biológicas pelo processo de erosão das margens até mudanças nos padrões de escoamento natural dos rios, que possuem ambientes diversificados, com trechos mais profundos e trechos mais rasos, produzindo locais para desenvolvimento e reprodução de muitas espécies. Rios em bacias urbanizadas tendem a possuir leitos mais uniformes e com pequena lamina de água. A diminuição da vazão de base dos rios também produz impactos negativos para o habitat aquático, aumentando a vulnerabilidade do habitat fluvial nessas épocas de estiagem.

- ✓ **Prejuízo à qualidade da água:** à medida que a água pluvial escoar sobre as superfícies urbanizadas, ela lava essas superfícies, transportando uma grande quantidade de poluentes, tanto artificiais como naturais, para os corpos d'água receptores. Entre esses poluentes, grande parte é composta por matéria orgânica, que acaba por aumentar as concentrações de nutrientes presentes na água, como nitrogênio e fósforo, apresentando, ainda, altas concentrações de hidrocarbonetos e metais, presentes em óleos, combustíveis, pneus e gases do escapamento dos automóveis, que são carregados das ruas. Outro impacto para a qualidade da água é o aumento da presença de microrganismos patogênicos nos corpos receptores, provindos de ligações clandestinas de esgotamento sanitário na rede de drenagem, transbordamento ou mau funcionamento do sistema de águas servidas, fezes de animais e transbordamento de fossas sépticas.

Assim, o avanço da urbanização e a conseqüente modificação no ciclo hidrológico produzem uma série de impactos, acarretando, ao final, a perda de oportunidades de usos da água, pois reduz a sua disponibilidade na qualidade e/ou quantidade requerida para diversos usos. Essa sucessão de impactos está apresentada no diagrama da **Figura 2.3**.

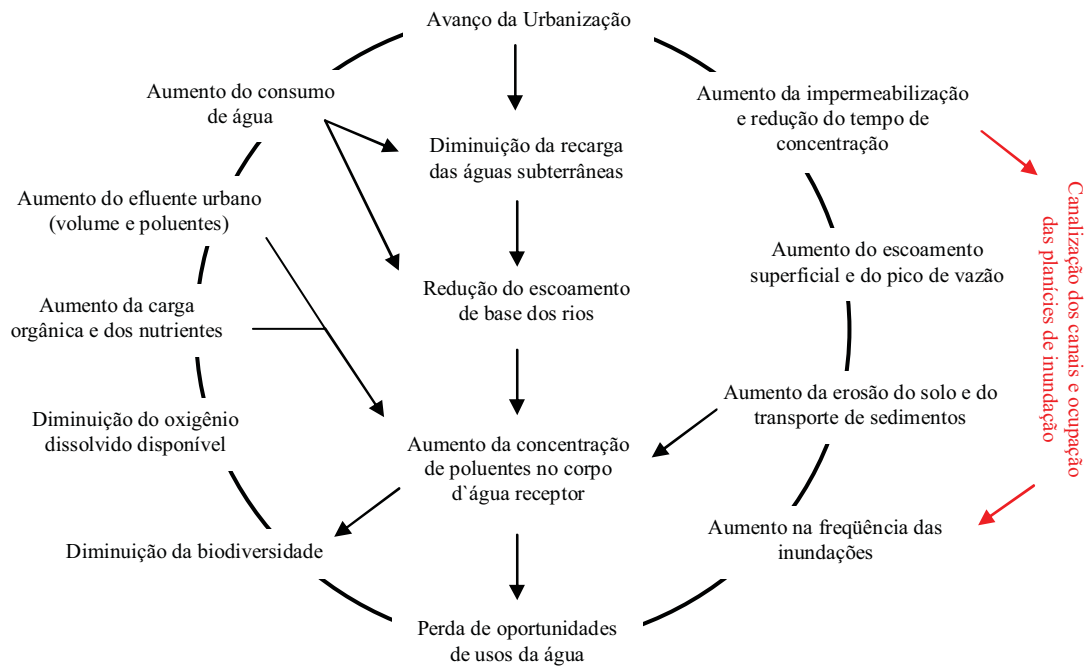


Figura 2.3 – Impactos da urbanização da bacia hidrográfica no ciclo da água.

(Adaptado de CHOCAT *et al*, 2007).

O desenvolvimento da urbanização em bacias hidrográficas leva a processos antrópicos que, muitas vezes, tendem a agravar seriamente os eventos de inundação das cidades. Os principais agravantes desses eventos e suas conseqüências podem ser caracterizados em:

- ✓ **Retirada da cobertura vegetal** → facilita processos erosivos que contribuem para o assoreamento dos rios, diminuição da calha fluvial e, conseqüentemente, da capacidade de vazão do canal; diminui a capacidade de amortecimento das cheias; diminui o processo de evapotranspiração; aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial.
- ✓ **Impermeabilização do solo** → diminui o processo de evapotranspiração; reduz o potencial de infiltração e a recarga dos aquíferos; aumenta e acelera o escoamento superficial.
- ✓ **Ocupação de áreas potencialmente alagáveis** (margens dos rios; várzeas de inundação; pontos baixos da cidade) → reduz a capacidade de condução de vazão do canal, quando as margens e o leito secundário são ocupados; aumenta a quantidade de resíduos na calha dos rios; expõe mais pessoas às inundações, intensificando a vulnerabilidade da população aos eventos de cheia.

- ✓ **Favelização** (margens e encostas) → retirada da cobertura vegetal; diminuição da capacidade de vazão do canal; aumento da quantidade de resíduos sólidos e carga orgânica no sistema de drenagem, por não contar com serviço de saneamento eficiente, exposição crítica dessas comunidades ao risco de inundação e acidentes maiores.
- ✓ **Resíduos Sólidos** (lixo domiciliar e resíduos da construção civil) → acúmulo de partículas em pontos de estrangulamento do escoamento, reduzindo a capacidade de condução de vazão do trecho, o que produz um efeito de remanso para montante e, com isso, o aumento nos níveis d'água na calha do rio, assim propiciando maiores e mais freqüentes inundações nos trechos acima deste ponto.
- ✓ **Intervenções urbanas físicas nos cursos d'água** (pontes, aterros e travessias) → diminuição da capacidade de condução de vazão e, conseqüentemente, aumento do efeito de remanso para montante. Esse quadro torna-se ainda mais grave quando combinado com o lançamento de resíduos sólidos no sistema de drenagem, que tendem a se concentrar nestas seções.

Um dos indicativos do crescimento da urbanização é a taxa de impermeabilização de superfícies na bacia. O impacto causado pelo aumento da área impermeável terá reflexo direto nos custos do sistema de drenagem, como calculado por Nascimento *et al.* (2003) para diversos cenários de impermeabilização máxima de uma bacia, variando de 100% a 30% da bacia considerada impermeável. Na Figura 2.4 são apresentados os resultados deste estudo. Fica possível extrair desses resultados a grande participação da macrodrenagem nos custos total do sistema, sendo tanto maior seu peso quanto menor é o percentual de impermeabilização. Para o **Cenário 1**, a macrodrenagem representa 61,6% do custo total, enquanto que no **Cenário 6** esse valor chega a 71,1%. Segundo esses custos, a impermeabilização de uma bacia com uma taxa de 100% (**Cenário 1**) eleva os custos totais com o sistema de drenagem em cerca de 25,9% em relação à um cenário com impermeabilização máxima de 50% da bacia (**Cenário 5**).

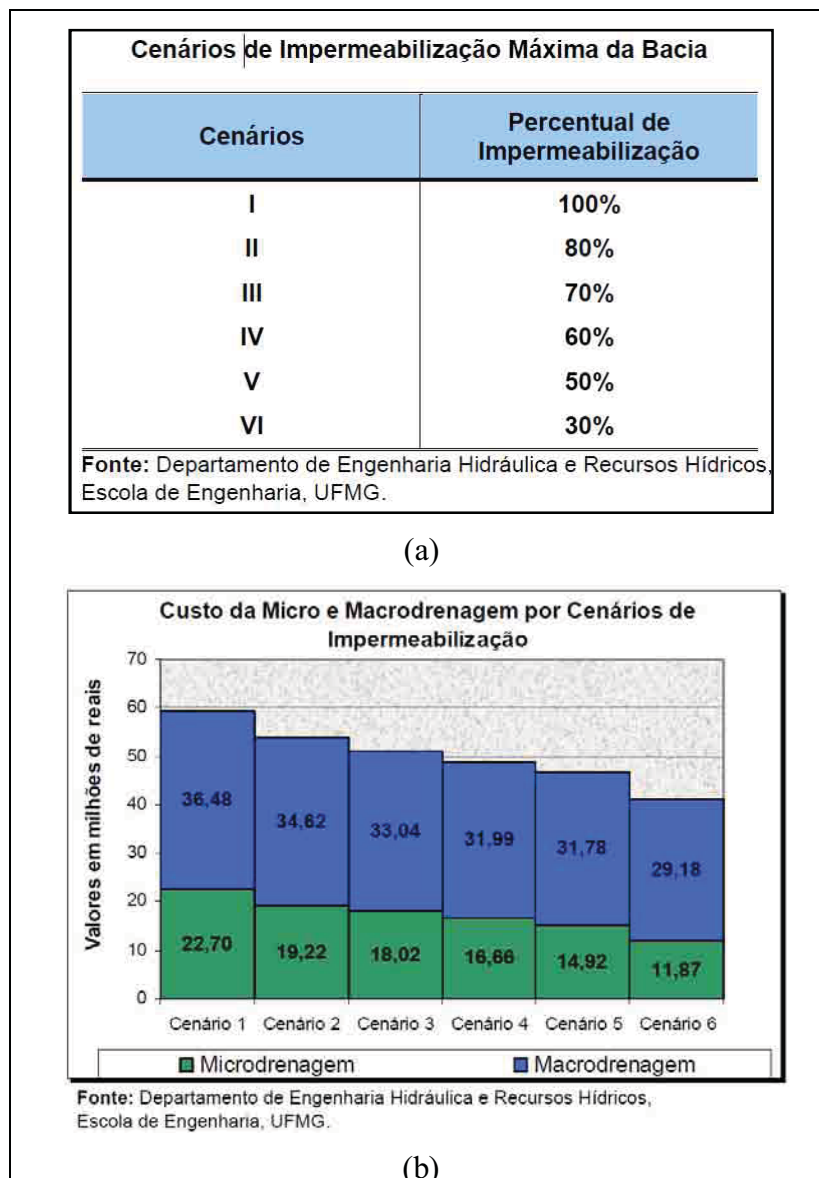


Figura 2.4 – Taxas de impermeabilização da bacia (a) e custos relativos para o sistema de drenagem (b) segundo cada cenário (NASCIMENTO *et al.*, 2003)

O combate às enchentes vem passando por uma mudança de concepção, permitindo novas avaliações dos processos de inundação, visualizando toda a bacia como um sistema integrado e tratando o problema com conceitos de prevenção e harmonização e não apenas uma tentativa de controle e combate locais, nos quais as intervenções buscam soluções pontuais. Tucci (2005) distribui a abordagem sobre as águas urbanas, quanto ao seu desenvolvimento histórico, em quatro fases principais: **Pré-Higienista, Higienista, Corretiva, Desenvolvimento Sustentável**. A Tabela 2.2 apresenta essas fases e suas principais características.

Tabela 2.2 – Fases do desenvolvimento das águas urbanas

FASE	CARACTERÍSTICA	CONSEQUÊNCIA
Pré-Higienista: Até início do séc. XX	Esgoto em fossas ou diretamente nas ruas, sem coleta ou tratamento	Epidemias e doenças com alta taxa de mortalidade
Higienista: Até os anos 1970	Tout à l'égout – Transporte do esgoto junto às águas pluviais, por canalização dos escoamentos.	Redução das doenças e da mortalidade, degradação dos corpos d'água, contaminação dos mananciais.
Corretiva: Entre 1970 e 1990	Sistema separador absoluto, tratamento dos esgotos, amortecimento dos escoamentos pluviais.	Melhoria da qualidade da água dos rios, poluição difusa, obras de grande impacto.
Desenvolvimento Sustentável: Após 1990	Tratamento do escoamento pluvial, preservação do sistema natural, integração institucional.	Conservação ambiental, melhoria da qualidade de vida, controle das inundações.

TUCCI (2005)

Burian et al. (1999) destacam a mudança ocorrida na perspectiva pública sobre a drenagem urbana, passando de uma reflexão tardia negligenciada para um sistema de obras públicas vital e como um importante componente de um sistema urbano sustentável.

Canholi (2005) aponta a drenagem como um problema de abordagem regional e, segundo o autor, os problemas das inundações urbanas decorrem:

- ✓ da rápida expansão da população urbana;
- ✓ do baixo nível de conscientização do problema;
- ✓ da inexistência de planos de longo prazo;
- ✓ da utilização precária de medidas não estruturais;
- ✓ da manutenção inadequada dos sistemas de controle das inundações.

Os projetos de controle das cheias devem prever tanto **medidas estruturais** como **não-estruturais**, que estão apresentadas na Tabela 2.3. **Medidas estruturais** são intervenções diretas nas calhas dos rios ou na paisagem urbana, como canalização, barragens, reservatórios,

criação de parques longitudinais inundáveis, diques, reservatórios em praças ou lotes, entre outros. São consideradas medidas de controle e, geralmente, imprescindíveis para ações corretivas. Por sua vez, as **medidas não-estruturais** são constituídas por ações indiretas, como zoneamento urbano (identificação das áreas alagáveis e restrições na legislação urbana), reservação de áreas para alagamento, preservação das várzeas, educação ambiental, sistemas de alerta, plano de resíduos sólidos, dentre outros. Essas medidas podem ser vistas como um aprendizado de convivência harmônica com os eventos de enchentes, tendo um caráter preventivo e complementar ao corretivo.

Tabela 2.3 – Medidas para controle das inundações

ESTRUTURAIS	Extensivas	Agem na bacia, modificando as relações entre precipitação e vazão	
	Intensivas	Agem diretamente na calha do rio, modificando as grandezas hidráulicas e características hidrodinâmicas do escoamento	Aceleram o escoamento
			Retardam o escoamento
Derivam o escoamento			
NÃO-ESTRUTURAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Preservação⁵ da cobertura vegetal – Florestas e matas ciliares • Regulamentação do uso do solo e zoneamento das áreas de inundação • Construção à prova de inundações • Seguro-inundação • Sistema de previsão e alerta de inundações • Educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, da erosão e do lixo 		

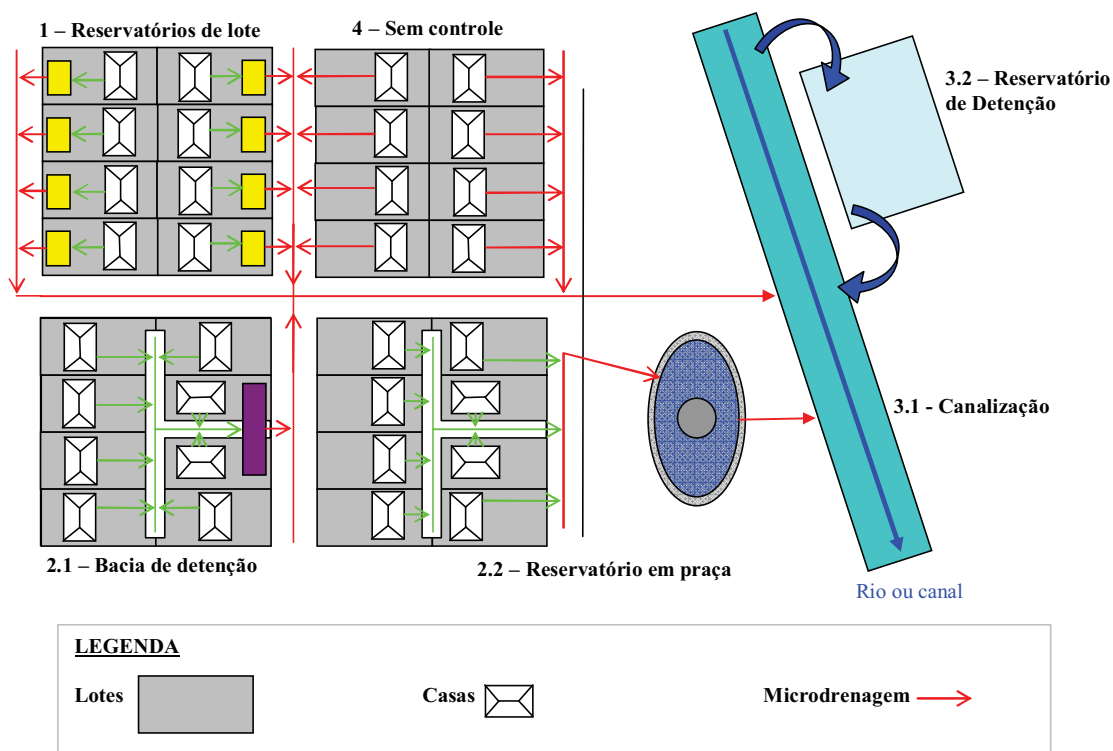
Medidas Estruturais:

“Medidas estruturais são fundamentais quando problemas de inundações estão instalados, no intuito de se reverter e controlar a situação existente.” (MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010)

Tucci (1995) estabelece uma classificação para as medidas estruturais de acordo com a sua atuação na bacia, dividindo-as em medidas **distribuídas**, na **microdrenagem** e na **macrodrenagem**. Essas medidas são descritas a seguir e exemplificadas na Figura 2.5:

⁵ **Preservação ≠ Reflorestamento** - O **reflorestamento** de encostas e a recuperação da mata ciliar são, em alguns estudos, classificados como medidas **não estruturais** que visam aumentar a capacidade de amortecimento das águas pluviais, por meio do restabelecimento dos processos de evapotranspiração, infiltração e interceptação da precipitação. Porém, ao voltar-se para a sua ação sobre a bacia, percebe-se que busca a reestruturação do funcionamento hidrológico, como citado acima, modificando a relação **precipitação X vazão** e, portanto, devendo ser classificada como uma **medida estrutural extensiva**.

- ✓ **Distribuídas:** é o controle que atua sobre o lote, praças e passeios. São também conhecidas como controle na fonte.
- ✓ **Na microdrenagem:** é o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos.
- ✓ **Na macrodrenagem:** é o controle que atua sobre os rios e canais.



**Figura 2.5 –Alguns tipos de medidas de controle segundo local de atuação:
1. Distribuídas; 2. Na microdrenagem; 3. Na macrodrenagem (Elaborado pelo autor)**

A **canalização** é, sem dúvida, a medida tradicional mais adotada em intervenções de controle de inundações. Seu objetivo é melhorar a capacidade hidráulica da rede de macrodrenagem, através da retirada de obstruções ao escoamento da calha principal dos rios, retificação de trechos e regularização das margens, como exemplificado na foto apresentada na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Exemplo de canalização com uso de concreto (Acervo pessoal)⁶

Outra medida tradicional muito utilizada para conter o transbordamento de rios é a implantação de **diques marginais** associados a **polders**, especialmente em áreas baixas da bacia, que permitem a proteção das planícies ocupadas pela urbanização. As áreas protegidas, que ficam impossibilitadas de drenar as águas precipitadas sobre a sua bacia durante os eventos de cheia do rio, são geralmente ligadas ao corpo d'água principal por comportas de sentido único (comportas FLAP) ou por estações de bombeamento. Assim, é necessária a preservação de áreas desocupadas para receber e armazenar essas águas temporariamente. Essas áreas são chamadas de **reservatórios-pulmão**.

Essas duas medidas, apresentadas acima, compõem as principais medidas estruturais intensivas utilizadas em projetos de drenagem e controle de inundações. Outra medida, bem difundida nas últimas décadas, é a previsão de **bacias de detenção** para atenuação dos picos de

⁶ Fotografia do rio Dona Eugênia, município de Mesquita, RJ. (30/08/2009)

cheia, intensificados pelo aumento da impermeabilização de superfícies naturais. Esses dispositivos são, geralmente, projetados em áreas mais altas da bacia, a montante das regiões mais urbanizadas, onde a ocupação ainda é mais esparsa e existem áreas para implantação das bacias. Com o aumento da urbanização, a cidade expande-se para montante da bacia, ocupando todos os espaços disponíveis. Nesses ambientes, as bacias de retenção foram adaptadas para utilização em outras escalas, permitindo a utilização de espaços públicos, como parques, estacionamentos e praças, com o intuito de armazenar, temporariamente, as águas pluviais de eventos menos frequentes e, ainda, agregar valores ambiental e urbanístico a uma região, como pode ser observado na bacia de retenção implantada em Santiago do Chile, que é associada a um projeto de paisagismo (Figura 2.7). Portanto, a utilização desta estrutura tem uma abrangência de utilização muito larga, podendo ser utilizada de forma intensiva em um determinado local, através da implantação de grandes reservatórios, ou de forma extensiva, pela distribuição sobre a bacia hidrográfica de diversos dispositivos, com escalas diferentes, podendo agir em praças ou nos próprios lotes.



Figura 2.7 – Exemplo de bacia de retenção em Santiago do Chile⁷. (Acervo pessoal)

Uma outra alternativa para o uso de estruturas de reservação temporária da água de chuva, pode ser a utilização de reservatórios que possuam o objetivo de melhorar a qualidade da água

⁷ Fotografia realizada no dia 23/07/2009 na Zona de Desenvolvimento Urbano Condicionado Valle Grande (ZODUC) em Santiago do Chile.

pluvial, antes que esta seja encaminhada para o corpo d'água receptor. Essas estruturas são as **bacias de retenção e banhados construídos (constructed wetlands)**. Deve-se ressaltar que o objetivo principal desta medida é o tratamento da água de chuva, sendo secundários seus efeitos quantitativos e, portanto, limitados. Isso se deve, em parte, pela necessidade de se prever uma lâmina de água permanente e, também, um maior tempo de permanência da água no interior do reservatório, para, assim, permitir os processos de tratamento com a eficiência requerida. Na Figura 2.8 é apresentada uma fotografia de uma bacia de retenção construída na cidade de Lagord, região de Poitou-Charentes, França. Essa bacia faz parte de um planejamento da drenagem de toda a aglomeração de La Rochelle⁸, onde fica a cidade de Lagord, com vistas para o tratamento das águas pluviais.



Figura 2.8 – Bacia de retenção na cidade de Lagord, região de Poitou-Charentes, França (Acervo pessoal)

Medidas extensivas podem ser atingidas, também, com a utilização de **estruturas de infiltração**, que visam favorecer processos de infiltração da água precipitada no solo, permitindo o restabelecimento parcial do comportamento hidrológico natural da bacia

⁸ Disponível em: <<http://www.agglo-larochelle.fr/>>. Acessado em: 09/02/2010.

(MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010). Essas medidas podem ser divididas em diferentes categorias de acordo com seu funcionamento, como será abordado mais adiante.

O **reflorestamento** de áreas degradadas, como das encostas e margens de rios que foram ocupadas irregularmente, é uma importante medida extensiva para restabelecimento do balanço hidrológico natural de uma bacia urbanizada. Miguez e Magalhães (2010) indicam que o reflorestamento previne a erosão do solo, preserva a camada superficial do solo e favorece a infiltração e, assim, o volume de escoamento superficial é reduzido, permitindo o correto funcionamento das estruturas de drenagem, uma vez que uma menor quantidade de água e sedimentos chega ao sistema.



Figura 2.9 – Exemplos de degradação da cobertura vegetal natural: (a) Desmatamento e ocupação de encosta; (b) Ocupação das margens do rio (Acervo pessoal)⁹

Medidas Não-Estruturais:

A **preservação da cobertura vegetal** garante a manutenção de um balanço hidrológico equilibrado, preservando suas funções hidrológicas exercidas na bacia, como a manutenção da capacidade de infiltração, interceptação e detenção das águas precipitadas. A mata ciliar auxilia, ainda, na filtragem do escoamento superficial afluente aos corpos d'água, reduzindo a carga de poluentes e beneficiando a qualidade da água fluvial.

As intervenções estruturais para o controle de inundações não fornecem uma proteção completa para as áreas de risco, estando essas sujeitas a eventos com magnitude superior ao nível de proteção projetado. Portanto, são necessárias medidas que visam prevenir a população sobre esses riscos. Miguez e Magalhães (2010) percebem o impedimento ou a

⁹ Fotografias no município de Mesquita, RJ, na bacia do hidrográfica rio Dona Eugênia. (20/05/2009)

restrição da ocupação das planícies de inundação, como a mais importante medida não estrutural. O **zoneamento das áreas de inundação** é um importante instrumento para mitigar os efeitos danosos de uma enchente de maior porte. Através da modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica, são traçadas manchas de inundação para eventos com diferentes tempos de recorrência (TR), i.e., 5, 10, 20, 50 e 100 anos, e, a partir dessas manchas, são formuladas diretrizes, regulamentos e normas legais de planejamento e uso do solo para cada faixa de inundação, de acordo com o risco a que cada área está sujeita. WRC (1971) identificou três faixas de inundação segundo o risco associado, **zona de passagem de enchentes (FAIXA 1)**, **zona com restrições (FAIXA 2)** e **zona de baixo risco (FAIXA 3)**, descritas na Tabela 2.4 e ilustradas na Figura 2.10.

Tabela 2.4 – Faixas de inundação de acordo com o risco de inundações e uso do solo

Faixa de inundação	Risco	Uso e ocupação do solo
- 1 - Zona de passagem de cheias	Alto risco de inundação.	Possui função hidráulica. - Não deve ser ocupada. - Uso para agricultura. - Paisagismo e proteção ambiental.
- 2 - Zona com restrições	Inundações com TR entre 5 e 25 anos.	- Parques e atividades recreativas. - Uso agrícola. - Habitação com mais de um nível. - Industrial e comercial, áreas de estacionamento e carregamento, armazenamento de equipamentos facilmente removíveis. - Serviços básicos: linhas de transmissão, estradas e pontes.
- 3 - Zona de baixo risco	Inundações com TR entre 50 e 100 anos.	- Não necessita regulamentação quanto às cheias. - Ocupação sem restrições. - Devem ser adotadas medidas de orientação sobre os riscos, ainda que pequenos, a fim de mitigar possíveis danos em eventos críticos.

Fonte: (TUCCI, 2007, NAGEM, 2008)

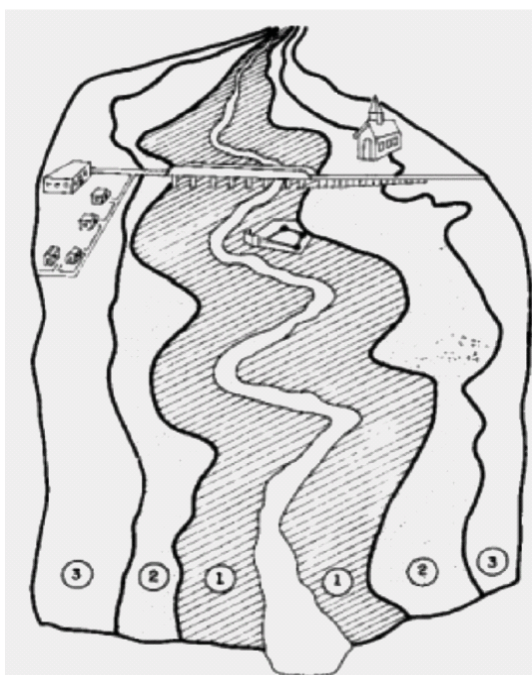


Figura 2.10 – Faixas de inundação (WRC, 1971)

Sob a mesma ótica do zoneamento, a **construção à prova de inundações** visa à redução dos possíveis danos decorrentes de uma inundação que atinja as edificações localizadas e áreas com maior risco. É uma medida preventiva, que deve ser tomada, principalmente, pelos ocupantes da FAIXA 2 de inundação. Essa medida deve ser adaptada para as características locais da inundação, como profundidade de submersão, velocidade do escoamento na cheia, a duração e a frequência das inundações. Nagem (2008) apresenta uma divisão das medidas a serem adotadas nas construções, para se protegerem das inundações: **permanentes, de contingência, e emergenciais**, como exemplificadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Exemplos de adaptações para construções à prova de inundações

MEDIDAS	Permanentes	Diques, comportas no acesso a residência (stop logs), pilotis, bombas de esgotamento, muretas, vedação de aberturas, etc.
	de contingência	Amparos, vedações dos esgotos com registros nas tubulações de saída e tampões rosqueáveis nos ralos internos, paredes móveis, etc.
	Emergenciais	Sacos de areia, enchimentos de terra, barreiras de lenha, canais de drenagem, etc.

Assim como estamos dispostos a pagar por uma proteção contra o risco de um acidente ou roubo de nossos veículos, seria racional pensarmos o mesmo quanto à disposição a pagar por um **seguro contra inundações**. Porém, Righetto e Mendiondo (2004) apontam a disposição a pagar por um seguro-enchente, de pequenos comerciantes da cidade de São Carlos, em São Paulo, como um valor muito abaixo do valor das mercadorias a serem seguradas,

inviabilizando a medida. Isso pode derivar de inúmeros fatores, como o período em que foram realizadas as entrevistas, de forma que se foram feitas numa situação na qual não ocorriam inundações severas há muito tempo, os atingidos tenderiam a se esquecer ou minimizar os efeitos que sofreram. Tucci (2007) atenta, ainda, para os casos em que as áreas de risco são ocupadas pela população de baixa renda, tornando a implementação do seguro inviável, seja pela incapacidade dos moradores de pagar o prêmio, seja pelo baixo valor dos imóveis a serem segurados.

Uma outra importante medida de prevenção é a adoção de um **Sistema de previsão e alerta de inundações**. Tucci (2007) escreve que “o sistema de previsão de alerta tem a finalidade de se antecipar à ocorrência da inundação, avisando a população e tomando as medidas necessárias para reduzir os prejuízos resultantes da inundação”.

Assim, o sistema de alerta pretende reduzir a vulnerabilidade da população em áreas de risco, através de um melhor desenvolvimento da capacidade de resposta dos habitantes e do poder público frente a um evento de inundação. Esse sistema deve atuar em três fases distintas: **prevenção, alerta e mitigação** (TUCCI, 2007). Essas fases estão resumidas no esquema apresentado na Figura 2.11.

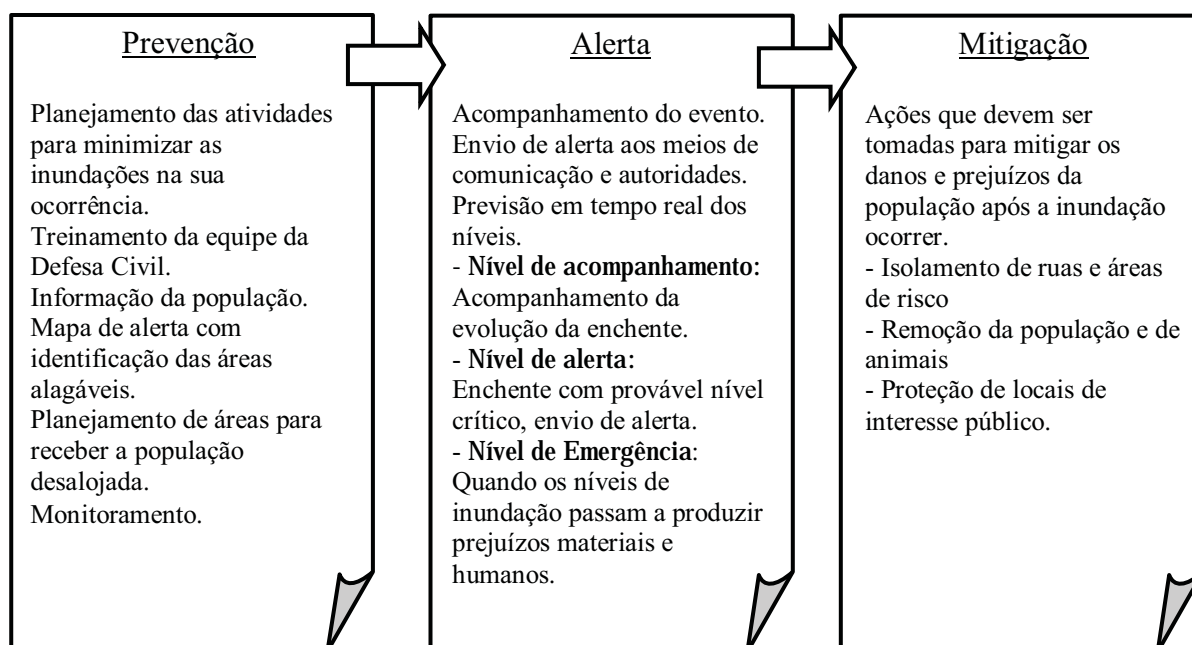


Figura 2.11 – Esquema de evolução das fases do sistema de previsão e alerta de inundações
(adaptado de TUCCI, 2007 e NAGEM, 2008)

Medidas de alerta, porém, podem apresentar uma eficácia reduzida quando implantadas em bacias de resposta rápida, associadas a bacias urbanas de pequeno porte e tempo de concentração reduzido.

Todas essas medidas, tanto estruturais, quanto não estruturais, podem ser divididas em dois grandes grupos de soluções, de acordo com a finalidade de cada medida. Assim, as soluções técnicas para o controle das inundações podem ser classificadas em duas correntes de pensamento, são elas:

1. **TÉCNICA CONVENCIONAL OU DE CANALIZAÇÃO** → Consiste em obras destinadas a retirar rapidamente as águas acumuladas em regiões baixas, baseadas em intervenções com o intuito de melhorar o fluxo das águas, através da aceleração do escoamento e do aumento da capacidade hidráulica dos rios e canais, como:
 - ✓ projetos de grandes galerias;
 - ✓ cortes de meandros e retificações;
 - ✓ mudança de declividade do leito do curso d'água;
 - ✓ canalização.

2. **TÉCNICA PRESERVACIONISTA OU COMPENSATÓRIA** → Obras destinadas a controlar e reduzir os volumes e vazões atuando de forma difusa na origem da produção do escoamento superficial. Prevê o planejamento do uso e ocupação do solo nas planícies de inundação.
 - ✓ Redução das vazões → Reservatórios de grande porte e de lote
 - ✓ Redução dos volumes → Baseada em técnicas de infiltração.

Por sua vez, Walesh (1989, **apud** CANHOLI, 2005) cita a categorização das medidas de controle das inundações em duas linhas principais, de acordo com o efeito esperado no escoamento das águas drenadas:

- ✓ **Conceito de canalização:** canalização convencional voltada à implantação de galerias e canais de concreto, retificação de traçado e aumento da declividade de fundo, com o objetivo de promover o rápido afastamento das águas.

✓ **Conceito de reservação:** utilização de reservatórios e outras medidas visando o aumento do tempo de concentração e redução da vazão de pico, i.e., o amortecimento da onda de cheia. Podem ser:

1. Em cada lote
2. No âmbito da sub-bacia – reservatórios com maiores volumes, capazes de armazenar volumes de uma área significativa da bacia.
3. Retardamento na calha – conceito de conservação ou restauração ambiental do rio, aumento da rugosidade do canal, da sinuosidade através da restauração dos meandros do rio e restabelecimento da calha secundária.
4. Derivação – utilização de **by pass**, visando à diminuição dos escoamentos em uma determinada rede de macrodrenagem.
5. Utilização de diques e **polders**.

A detenção dos escoamentos tem por finalidade principal reduzir o pico das enchentes, por meio do amortecimento das ondas de cheia, armazenando uma parte dos volumes gerados no escoamento superficial.

A nova concepção dos projetos de drenagem visa uma integração com os planos de desenvolvimento urbano e a gestão da ocupação e uso do solo assim como o uso de técnicas preservacionistas. Essa visão propicia uma melhor abrangência temporal e espacial dos projetos de combate às inundações, uma vez que busca intervir não na consequência das grandes chuvas, mas nas causas das grandes inundações. A mudança para uma visão sustentável das soluções em drenagem urbana exige um compromisso com as consequências futuras das decisões tomadas no presente, portanto as soluções devem ser flexíveis o bastante para permitir possíveis modificações e adaptações no decorrer do desenvolvimento urbano (CANHOLI, 2005).

Para se alcançar uma eficiência ótima do sistema de drenagem, é necessário que os subsistemas de micro e macro-drenagem sejam capazes de realizar suas funções plenamente, com a micro-drenagem coletando e direcionando as águas dos lotes urbanos para a rede de macro-drenagem, que por sua vez deve comportar todo o volume de escoamento (TUCCI, 2007). Mas, na medida em que se expande a urbanização pela bacia, os índices de

impermeabilidade aumentam muito, o que pode significar um aumento de até seis vezes no volume de escoamento superficial em uma bacia com 60% de área impermeável, em relação às condições rurais (LEOPOLD, 1968), obrigando a novas intervenções no sistema. Por isso é de grande importância articular o planejamento da drenagem e do controle de inundações com o Plano Diretor Urbano, permitindo uma melhor projeção da ocupação e uso do solo futuros, e assim projetos com um maior tempo de validade.

No gráfico apresentado na Figura 2.12 é possível verificar a importância do fenômeno da urbanização no Brasil, com a população urbana chegando a uma taxa de 81% da população total no ano de 2000.

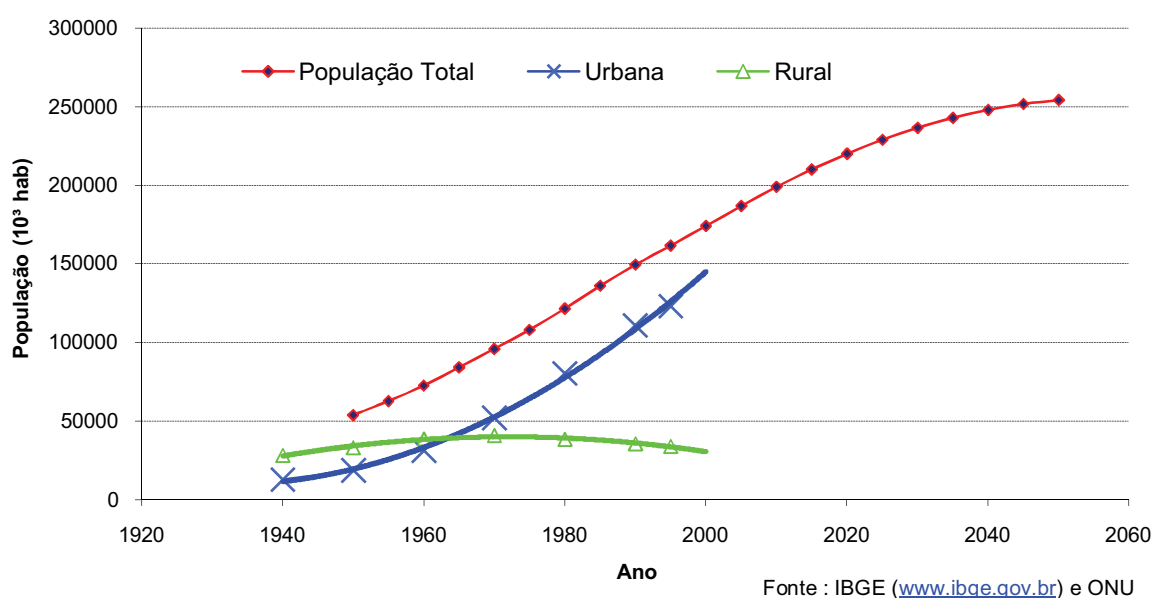


Figura 2.12 – Evolução da população no Brasil

Sob esta nova ótica, os projetos de drenagem urbana, em tese e sempre que possível, devem neutralizar os efeitos da urbanização, restabelecendo as condições hidrológicas da pré-urbanização, trazendo benefícios para a qualidade de vida e visando a preservação ambiental.

As inundações urbanas podem causar grandes perdas econômicas e sociais, produzindo impactos como riscos à saúde pública e perda de vidas humanas, alagamento de habitações, propriedades comerciais e industriais, com perdas econômicas públicas e privadas, alagamento de vias públicas, gerando engarrafamentos, interrupção de serviços, como abastecimento de água, fornecimento de energia e coleta de esgotos (MIGUEZ, 2010).

Freeman (1999) aponta que 60% das mortes e 30% dos prejuízos econômicos causados por desastres naturais são causados por inundações. Esses valores confirmam a grande importância dos investimentos em projetos de controle de inundações.

Os investimentos para intervenções de controle e mitigação das inundações urbanas são realizados pelo poder público e, geralmente, são bastante onerosos. Apesar disto, ainda há uma grande ausência de estudos de viabilidade técnica e econômica que apontem os melhores investimentos.

No Brasil, não existem informações sistematizadas dos prejuízos provocados por inundações, dificultando a utilização metodologias de estudos econômicos que possibilitem averiguar a eficiência econômica de algumas intervenções para controle de inundações, como o caso de estudos de benefício/custo (SALGADO, 1995).

A “eliminação” de riscos de inundações urbanas demandaria grandes e complexas intervenções estruturais no sistema de drenagem pluvial, tornando essa opção inviável economicamente. Portanto, a concepção de projetos de drenagem e controle de inundações visa proteger uma área de um evento hidrológico com um determinado risco aceitável, de acordo com os prejuízos potenciais desse evento.

Desta forma, “... para proteger a população, recomenda-se que estudos analisem qual deve ser a medida ou conjunto de medidas com maior eficiência frente aos benefícios e custos marginais e ao risco de inundação aceitável” (NAGEM, 2008).

Nagem (2008) propõe uma metodologia simplificada e prática para caracterizar os custos provenientes de um evento de inundação em uma bacia urbana no Brasil. A autora afirma que “é necessário que as informações utilizadas sejam de fácil obtenção e que demandem pouco recurso financeiro e tempo na fase de levantamento, mas que, por sua vez, permitam uma composição adequada da situação”.

2.2. Sistema de Manejo Sustentável das Águas Pluviais

Na medida em que a urbanização aumenta e se expande, ela ocupa as várzeas de inundação e impermeabiliza o solo, dificultando a infiltração da água pluvial e realocando essas águas para outros lugares mais baixos. A partir dessa constatação, CANHOLI (2005) sustenta a abordagem da drenagem urbana como um problema de alocação de espaços.

Os projetos de drenagem urbana desenvolvidos convencionalmente, apesar de apresentarem-se num primeiro momento “tecnicamente” corretos, tendem a perder rapidamente sua eficiência, pois não atendem ao alto crescimento da demanda urbana por infra-estrutura, na medida em que a cidade se desenvolve, necessitando de investimentos cada vez mais onerosos para permitir a continuação do funcionamento do sistema de drenagem. Essa situação agrava-se pela não existência ou não cumprimento dos planos de desenvolvimento urbano. Basicamente, os projetos de drenagem urbana e controle das enchentes resumem-se a ações emergenciais, esporádicas e definidas apenas após a ocorrência dos desastres (POMPÊO, 2000), além de atuarem pontualmente.

Este cenário, baseado na simples e rápida retirada da água das áreas pavimentadas com alto grau de impermeabilização por meio de canalizações, apresenta-se insustentável e exige uma nova visão sobre o problema das inundações urbanas. Holtz e Tassi (2007) sugerem que o sistema de drenagem atual deve preferir a solução da simples retirada, com a maior eficiência possível, das águas pluviais não infiltradas provindas do aumento da impermeabilização do solo pelo processo de urbanização, substituindo-a por medidas que visam mitigar os impactos desse processo de impermeabilização, através da facilitação dos processos de infiltração e retenção das águas, no intuito de regenerar as condições hidrológicas de pré-urbanização. Destacam, porém, a importância da combinação do uso das estruturas de drenagem tradicionais e não convencionais objetivando a otimização do sistema. A quebra do antigo paradigma não deve aposentar todas as suas técnicas, mas sim adaptá-las a um novo uso, agregando ao conhecimento tradicional os recursos propostos como solução sustentável.

POMPÊO (2000) enfatiza a necessidade de se pensar preventivamente as atividades relacionadas à atenuação das inundações, realçando o valor do planejamento aplicado aos projetos de controle das inundações. Neste contexto se insere a abordagem ecossistêmica (**Ecosystem Approach**), a qual representa a evolução do pensamento reativo do Plano Diretor de Drenagem convencional para um pensamento proativo e avançado, na forma de gestão do

ambiente natural e construído, considerando-os como componentes interdependentes e integrados.

Uma abordagem ecossistêmica pode resultar em menores gastos, uma vez que busca diminuir a necessidade de ações complexas e custosas de remediação, enfatizando a orientação e o planejamento das decisões nas alterações do uso do solo. De acordo com uma publicação do Ministério do Ambiente e Energia e do Ministério dos Recursos Naturais de Ontário:

Uma abordagem ecossistêmica no planejamento do uso do solo propicia uma orientação precoce e sistemática das interações entre os existentes e potenciais usos do solo e a saúde dos ecossistemas ao longo do tempo. Essa abordagem é baseada no reconhecimento que ecossistemas possuem limites de estresse, os quais podem ser ajustados antes que os ecossistemas se tornem irreversivelmente degradados ou destruídos. (ONTARIO MEE e MNR, 1993)

Essa publicação enfatiza ainda, a necessidade de se considerar com igualdade e ao mesmo tempo objetivos ecológicos, econômicos e sociais.

Esta nova visão tem sido baseada no conceito de Desenvolvimento Sustentável, definido no **Relatório Brundtland** (1986), intitulado “Nosso Futuro Comum”, como sendo o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades”. A partir desse conceito foram desenvolvidas novas abordagens no campo da drenagem urbana, como os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (**SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems**) e as Melhores Práticas de Gerenciamento (**BMPs – Best Management Practices**), desenvolvidos na Europa e Estados Unidos, respectivamente, que buscam reproduzir, o mais próximo possível, as condições naturais de drenagem do local antes de sua urbanização. AMEC (2001) define BMP como um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, considerando não somente preocupações com a quantidade de água, mas também aspectos de qualidade das águas (MIGUEZ, 2005). Pode-se dizer que esses sistemas são projetados tanto para gerenciar os riscos ambientais decorrentes das águas pluviais urbanas como contribuir, sempre que possível, para uma melhoria ambiental e da qualidade de vida urbana.

Projetos de SUDS buscam reduzir os escoamentos superficiais através de estruturas de controle da água pluvial em pequenas unidades. Desta maneira, o controle dos escoamentos superficiais realizado na fonte diminui a necessidade de grandes estruturas de atenuação e controle na calha dos rios.

O Manual de Sistema de Drenagem Sustentável publicado pela CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) em 2007 descreve os principais componentes desse sistema¹⁰:

- ✓ Faixas de filtração (**Filter strips**);
- ✓ Valas de infiltração (**Swales**);
- ✓ Bacias de infiltração (**Infiltration basins**);
- ✓ Bacias de retenção (**Wet ponds**);
- ✓ Bacias de detenção (Extended detention basins);
- ✓ Charcos artificiais ou Banhados construídos (**Constructed wetlands**);
- ✓ Trincheiras de filtração (**Filter drains**);
- ✓ Dispositivos de infiltração (**Infiltration devices**);
- ✓ Pavimentos permeáveis (**Pervious surfaces**);
- ✓ Telhados verdes (**Green roofs**).

Outro conceito que visa à sustentabilidade dos projetos de controle de inundações é o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID – **Low Impact Development**), o qual, segundo Coffman et al (1998) são projetos com objetivo de criar uma “paisagem funcional” capaz de incorporar características de projeto que buscam simular as funções de infiltração e armazenamento da bacia pré-urbanizada. Isso é feito através da redução da modificação do coeficiente curva-número (CN) característico do local, manutenção do tempo de concentração natural e incorporação de medidas de retenção distribuídas na bacia. Essas medidas acabam por reduzir a necessidade de instalação de estruturas de detenção para manter o volume e o pico de vazão do escoamento superficial.

Projetos baseados no LID empregam um número de técnicas de projeto para reduzir as mudanças no CN ou no escoamento superficial. Com isso, é reduzida a necessidade de

¹⁰ Disponível em: <www.ciria.org>. Acessado em: 03/03/2010

implantação de estruturas para manutenção do pico e do volume de água pluvial escoada superficialmente.

Coffman et al (1998) destacam os elementos da base de atuação do LID como sendo:

- ✓ **Curva-número (CN):** minimização das alterações no CN pós-desenvolvimento, através da redução de áreas impermeáveis e preservação da cobertura vegetal (áreas com alta capacidade de infiltração e armazenamento) para reduzir a necessidade de implantação de estruturas de retenção que visam manter o volume de escoamento superficial.
- ✓ **Tempo de Concentração (tc):** manutenção do tempo de concentração pré-urbanização no intuito de minimizar o aumento dos picos de vazão do escoamento superficial após a urbanização, através do alongamento dos caminhos dos escoamentos e aumento da rugosidade das superfícies.
- ✓ **Retenção:** proporcionar armazenamento por retenção da água pluvial para controle do pico e volume do escoamento superficial, a fim de manter o CN pré-urbanização, assim como para o controle de qualidade da água.
- ✓ **Detenção:** proporcionar um armazenamento adicional por retenção da água de chuva, se necessário, para manter o pico de vazão do escoamento superficial pré-urbanização e mitigar problemas de inundações existentes.

A urbanização implica em profundas alterações físicas no terreno natural, como o aumento de áreas impermeáveis, a implantação de novas vias de tráfego e o aterro de áreas baixas, as quais contribuem para a mudança nos padrões de drenagem e para a diminuição da retenção natural, e devem, portanto, “ser acompanhadas de soluções de engenharia para a retenção artificial, estrategicamente planejadas, para a compensação da perda de retenção natural” (D’ALTÉRIO, 2004).

No Brasil, Baptista (2005) classifica essas soluções como **medidas compensatórias**, que podem ser divididas em diferentes técnicas apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Tipos de técnicas compensatórias (BAPTISTA *et al.*, 2005)

Técnicas compensatórias não-estruturais	Legislação	
	Racionalização do uso do solo urbano Educação ambiental Tratamento de fundo de vale	
Técnicas compensatórias estruturais	Bacias	Detenção e retenção Infiltração Detenção/Retenção e infiltração
	Obras lineares	Trincheiras Valas e valetas Pavimentos Revestimentos permeáveis Pavimentos reservatórios
	Obras pontuais	Poços de infiltração Telhados verdes Técnicas adaptadas à parcela

Stahre (2005) categoriza as soluções técnicas sustentáveis em drenagem urbana em quatro grupos de acordo com a sua localização no sistema de drenagem, podendo ser um **controle na fonte**, um **controle no local**, um **transporte lento** ou um **controle a jusante**, como apresentado no esquema da Figura 2.13. Enquanto Canholi¹¹ (2005) as classifica como **medidas não convencionais**, destacando como as mais frequentemente adotadas as que visam:

- ✓ incrementar os processos de infiltração;
- ✓ reter os escoamentos em reservatórios;
- ✓ retardar os fluxos nas calhas dos rios e córregos;

¹¹ O autor menciona também, como medidas não convencionais, o uso de **polder** para proteção de áreas baixas e a derivação do escoamento para diminuir a vazão em trechos fluviais com capacidade hidráulica comprometidos. Porém, neste trabalho, essas medidas são consideradas como medidas convencionais de intervenção.

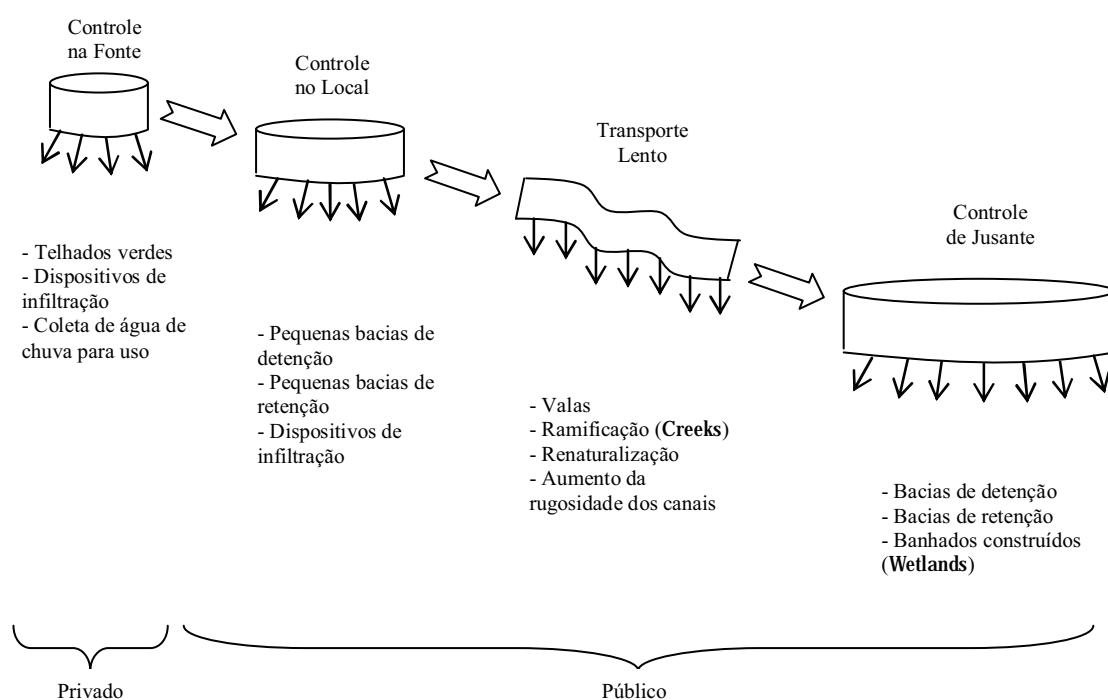


Figura 2.13 - Categorização das soluções técnicas sustentáveis segundo sua localização no sistema de drenagem (Adaptado de STAHR, 2005)

Urbanas e Stahre (1993) apresentam uma classificação dos dispositivos utilizados para detenção dos escoamentos, quanto à sua localização no sistema de drenagem, dividindo-os em dois grupos principais, **retenção na fonte** e **retenção de jusante**. Esses grupos estão descritos a seguir e apresentados na Figura 2.14:

- ✓ **Retenção na Fonte:** são reservatórios localizados próximos aos locais de geração dos escoamentos e apresentam menores dimensões. Sua principal vantagem é a possibilidade de criação de pequenas unidades padronizadas, porém, por ser uma solução muito dispersa, pode apresentar altos custos de operação e manutenção devido ao grande número de unidades, aumentando também a complexidade da avaliação do desempenho global da solução. Entretanto, por ser dispersa, as falhas operacionais em alguns dispositivos, em geral, não comprometem o funcionamento do sistema como um todo, pois pode haver uma acomodação dos escoamentos nas demais estruturas. A redistribuição dos escoamentos pluviais em uma bacia pode ser feita através de estruturas de retenção que variam em tamanho, desde grandes reservatórios, que atenuam localmente as descargas de grandes partes da bacia, a pequenos reservatórios distribuídos sobre a paisagem urbana (MASCARENHAS et al, 2005). Podem ser classificados em:

- a. **Disposição no Local:** controle em lotes e vias de circulação por dispositivos que permitem a infiltração e a percolação. Apresenta como objetivo principal a redução do pico da vazão que chega à rede de drenagem, podendo incorporar, como objetivos adicionais, o aumento da recarga do lençol freático e a possibilidade de aproveitamento da água de chuva para outros fins.
 - b. **Controle na Entrada:** restringe a entrada do escoamento no sistema de drenagem através da reservação da água precipitada, podendo retornar ou não para o sistema, caso haja interesse no aproveitamento da água pluvial. Geralmente, é feito através do **controle nos telhados**, captando as águas precipitadas sobre as telhas por meio de calhas e condutores com capacidade de armazenamento, ou através do **controle em áreas impermeabilizadas**, captando as águas precipitadas sobre grandes áreas como estacionamentos e praças públicas.
 - c. **Detenção IN-SITU:** controla áreas urbanizadas restritas, como loteamentos e condomínios. O controle é feito, normalmente, através de leis restritivas visando o controle de cheias que não permitam o aumento do pico de vazão gerado pelas chuvas precipitadas na área a ser urbanizada, resultando em um impacto zero no sistema de drenagem existente. Pode ser vista como uma medida preventiva.
- ✓ Contenção de Jusante: reservatórios de maior porte que permitem o armazenamento da água drenada por partes mais significantes da bacia. A implantação desses dispositivos possibilita a reabilitação de sistemas existentes, podendo ser considerados, portanto, uma medida corretiva. Podem ser separados em dois grupos: reservatórios **on-line**, quando posicionados no eixo principal do sistema de drenagem, e reservatórios **off-line**, quando posicionados fora do eixo. São exemplos de dispositivos dessa solução:
- a. **Bacias de retenção:** possuem uma lâmina de água permanente, podendo ser integradas à arquitetura urbana como lagos.
 - b. **Bacias de detenção:** possuem água apenas quando em operação, podendo possuir outros usos quando secas, como quadras esportivas e praças de lazer.

- c. **Bacias de sedimentação:** são dimensionadas para permitir a retenção dos sólidos em suspensão.

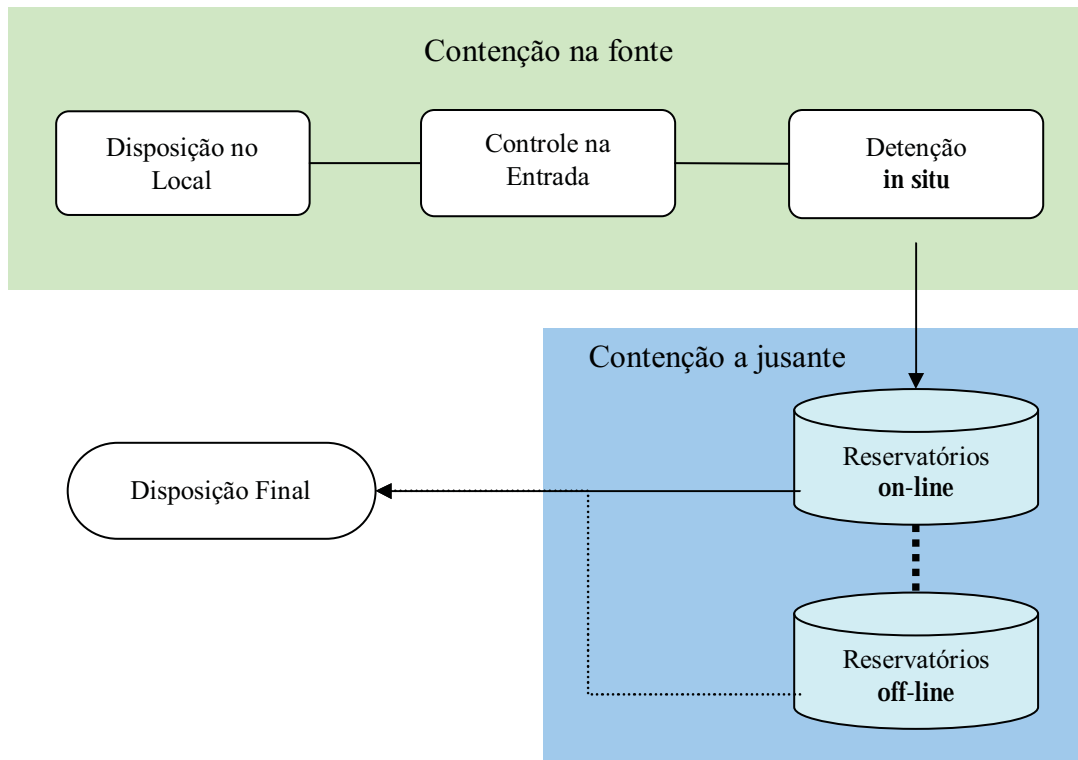


Figura 2.14 - Classificação dos dispositivos de detenção dos escoamentos (Adaptado de CANHOLI, 2005)

Mascarenhas et al (2005) apontam, como principais vantagens e desvantagens relacionadas à implantação de estruturas de controle em lotes (**contenção na fonte**), as seguintes considerações:

- ✓ Mitiga alguns impactos negativos do desenvolvimento urbano, resgatando parte do volume natural de armazenamento, agindo na fonte do escoamento e não simplesmente transferindo os problemas da urbanização para jusante.
- ✓ Em algumas condições hidrológicas, o armazenamento em regiões mais baixas da bacia pode aumentar as inundações, através da combinação dos picos de hidrogramas.
- ✓ É um sistema justo, uma vez que impõe uma parte da responsabilidade do controle em quem urbanizou uma área e tirou benefício disto.
- ✓ Imposição de obrigações e responsabilidades aos proprietários.

- ✓ Estabelecimentos de regras de operação simples e eficientes, desde que levando-se em conta o controle da qualidade para o aproveitamento da água pluvial.
- ✓ Pequeno efeito na remoção de poluentes transportados pela chuva, sendo esse efeito ligado mais aos sólidos em suspensão.
- ✓ Difícil fiscalização pelas autoridades governamentais, uma vez que as intervenções são extensivamente distribuídas pela bacia e em propriedades privadas.
- ✓ Difícil sensibilização e aceitação dos proprietários de lotes nas partes altas da bacia a instalar as estruturas, uma vez que não costumam sofrer os efeitos diretos das inundações.

Outro aspecto importante, segundo Mascarenhas et al (2005), a ser considerado no uso da retenção em lotes, refere-se à combinação espacial dos efeitos. Nas áreas de jusante, parte mais baixa da bacia, é interessante admitir descargas sem controle, de maneira que o pico de vazão do escoamento não se combine com o pico das contribuições de montante, o que poderia resultar em um aumento na vazão máxima do hidrograma combinado. Assim, é muito importante considerar o funcionamento integrado de todo o sistema, permitindo a avaliação dos efeitos da combinação espacial das intervenções. Portanto, a questão do zoneamento espacial, para a aplicação do conceito de retenção em lotes, é fundamental para obter bons resultados.

Uma característica importante para a previsão de estruturas de contenção em projetos de controle de inundações, diz respeito à disponibilidade de espaços livres para implantação dessas estruturas. Em algumas regiões com alta densidade populacional, a falta de espaços livres para implantação de estruturas de controle de inundações e os altos custos requeridos para realocação das pessoas assentadas em áreas de risco de inundações, restringe as possibilidades de solução disponíveis. Neste contexto, uma abordagem multidisciplinar pode ser aplicada, com a finalidade de se desenvolver novas medidas de controle atuando na paisagem urbana, através de **paisagens multifuncionais**. Assim, estruturas urbanas típicas podem incorporar funções hidrológicas e hidráulicas, como características complementares, a fim de permitir uma ação sistêmica sobre a bacia, resgatando, quando possível, os padrões de escoamento pré-urbanização. Essa abordagem pode, ainda, se enquadrar com outros importantes objetivos, como a revitalização de áreas ocupadas irregularmente. (MIGUEZ et al, 2007).

Para Miguez et al (2007), a idéia básica da utilização de **paisagens multifuncionais** é que uma área pode cumprir diferentes objetivos e funções quanto a interesses ecológicos, econômicos, culturais, históricos, sociais e estéticos. Essa técnica tem uma boa viabilidade de aplicação em países periféricos, devendo levar-se em conta aspectos particulares das comunidades e partes interessadas, no intuito de aumentar a aceitabilidade dessas obras. Miguez et al (2007) apontam dois grandes desafios para a utilização de paisagens multifuncionais no controle de inundações:

1. Convencer a comunidade local, e outros agentes de interesse, da importância dessa medida, garantindo a sua aceitação pública. Isso é muito importante, e muitas vezes ocorre que a comunidade do local de implantação da medida não costumava sofrer com inundações (normalmente quando as medidas são previstas nas partes de montante da bacia), diminuindo a aceitabilidade local desse tipo de medida.
2. Desenvolver estratégias para evitar inundações freqüentes nas estruturas de armazenamento, em eventos hidrológicos com baixa recorrência, e garantir a limpeza do local logo após eventos de chuvas intensas, para evitar a disseminação de doenças de veiculação hídrica.

Hall & Poterfield (2001, **appud** MIGUEZ, 2005) manifestaram que bacias de retenção e detenção, usadas para controle das inundações, podem ser previstas para criar ambientes saudáveis e funcionais, favorecendo a conservação de espécies de vegetais e animais, assim como adicionando aspectos estéticos que ajudam a elevar a valorização da terra. A integração de soluções de drenagem com programas de revitalização de áreas urbanas pode ser uma opção importante para a solução do controle de inundações, quer pela possibilidade de se projetar ações distribuídas sobre a bacia urbanizada, não apenas focando a rede de drenagem, mas também, pela otimização dos recursos públicos, quando dirigidos para atividades de múltiplos propósitos.

Para POMPEO (1999), a problemática ambiental apresentada hoje nas cidades evidencia a falência das soluções técnicas adotadas para os projetos de drenagem urbana, demandando uma nova abordagem sobre o tema, na qual deve-se focar o problema das cheias urbanas incorporando a dinâmica social e o planejamento multisetorial na busca de soluções. A abordagem tradicional do planejamento do sistema de drenagem urbana pode ser resumida pela ilustração apresentada na Figura 2.15.

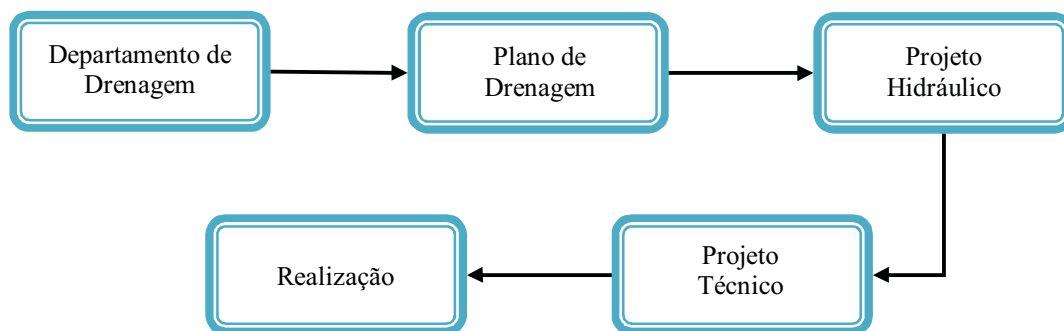


Figura 2.15 – Abordagem tradicional do Planejamento do Sistema de Drenagem Urbana (Adaptado de STAHRRE, 2005)

Os sistemas de infra-estrutura urbana são interdependentes e a não consideração dos efeitos de um sistema sobre o ambiente urbano pode reduzir a eficiência de outros sistemas ou até mesmo inviabilizar o seu funcionamento, como é o caso das relações entre os sistemas de Drenagem e Controle de Inundações e os sistemas de Água e Saneamento, Resíduos Sólidos e Uso e Ocupação do Solo. Um exemplo ordinário nos países periféricos é o comprometimento do funcionamento do sistema de drenagem pela ineficiência ou inexistência da gestão dos resíduos sólidos urbanos. Essas relações estão destacadas no diagrama apresentado na Figura 2.16.

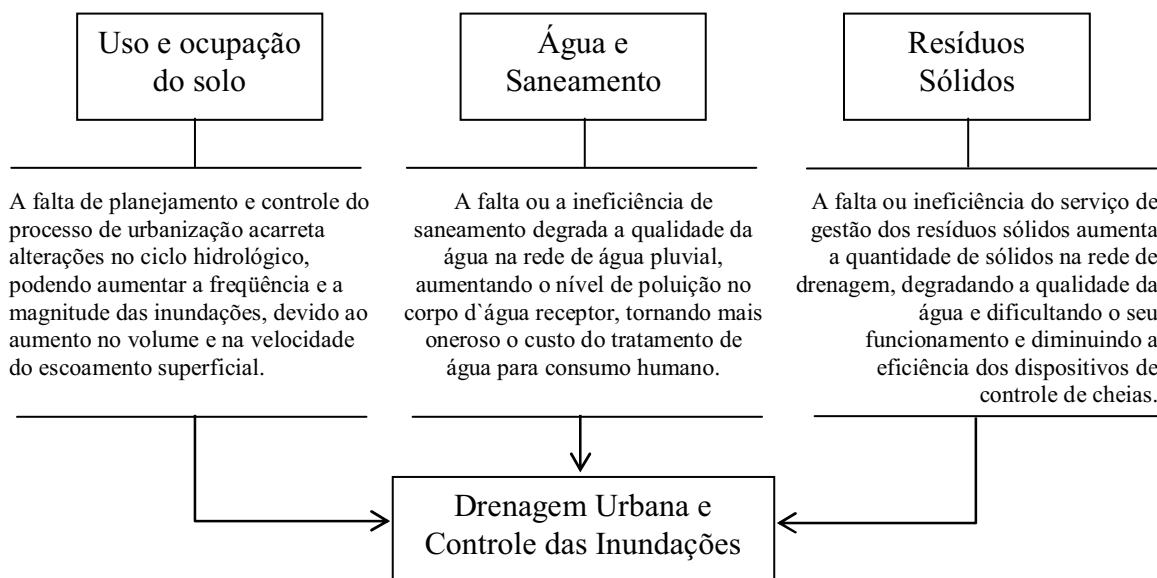


Figura 2.16 – Sistema de Drenagem Urbana e suas relações com outros sistemas urbanos (Elaborado pelo autor)

Os problemas associados aos sistemas de drenagem urbana não são exclusivamente técnicos, mas primordialmente de natureza institucional, como a falta de cooperação entre os diferentes departamentos responsáveis pela administração urbana e a comunicação entre a cidade e seus cidadãos (STAHRE, 2005). A falta de cooperação entre os departamentos pode provir de interesses e prioridades conflitantes.

Tucci (2001) apresenta uma estrutura a ser seguida pelo Plano de Águas Pluviais dividida em 6 grandes grupos:

- ✓ política de águas pluviais
- ✓ produtos
- ✓ medidas não-estruturais e estruturais
- ✓ programas
- ✓ informações

A Figura 2.17 apresenta a organização estrutural desses grupos em um Plano de Águas Pluviais.

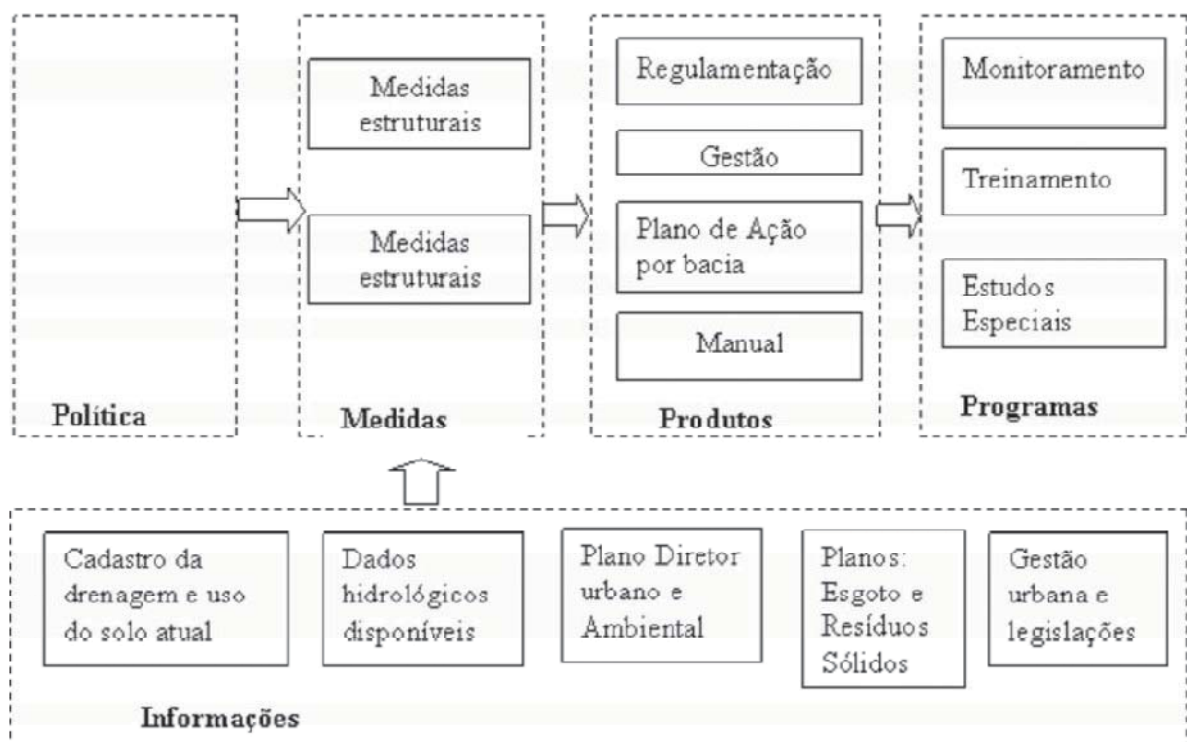


Figura 2.17 – Estrutura do Plano de Águas Pluviais (TUCCI, 2001)

Para Tucci (2005), a Política de águas pluviais deverá ser baseada nos princípios e objetivos do controle das águas pluviais; em estratégias de desenvolvimento do plano como a compatibilidade entre os Planos preparados para a cidade; e a definição de cenários de desenvolvimento urbano e riscos para as inundações.

No estudo de Stahre (2005), o Departamento de Drenagem de Malmo, na Suécia, enxerga na abordagem sustentável do sistema de drenagem um caminho ideal para atingir suas metas e objetivos com um baixo custo, se comparado com o sistema de drenagem tradicional, enquanto que o Departamento de Parques e Recreação vê nas soluções da drenagem sustentável uma boa aliada para o desenvolvimento e melhoria das condições de qualidade de vida no ambiente urbano através do aumento do valor dos parques urbanos. Como existe esse compartilhamento de interesse, os custos das estruturas, implantação e manutenção, podem ser divididos entre os dois departamentos, e mais outros que compartilharem dos benefícios da implantação desse sistema.

A não consideração da drenagem nos planos de desenvolvimento urbano pode resultar em soluções técnicas para o controle de inundações mais caras e muitas vezes inviáveis economicamente (BRAGA 1994, apud CANHOLI 2005). O sucesso da implementação de um Sistema Sustentável de Drenagem depende da cooperação entre os diferentes departamentos técnicos responsáveis pelo planejamento urbano e a participação ativa do público/população.

Stahre (2005) conclui em seu estudo que a solução dos problemas da **água pluvial** não pode mais ser encarada como um simples serviço técnico suportado apenas pelo Departamento de Drenagem, pois essas **águas** passaram a representar um importante recurso positivo, inserido no ambiente urbano, para os cidadãos. Reforça-se aqui a valorização da água na cidade como um recurso dotado de demanda, e por isso deve ser enxergado como tal, não desperdiçando seus usos potenciais.

Canholi *et al.* (2005) caracteriza a abordagem integrada do controle de inundações como um processo de vinculação da prevenção do risco de inundações ao projeto de ordenamento territorial. Dessa maneira é possível agir preventivamente para o controle de inundações, através do desenvolvimento de uma urbanização sustentável, a qual considera todos os impactos causados pelo processo de ocupação antrópica de espaços naturais, procurando mitigar esses impactos por meio de medidas compensatórias. Tucci (2007) indica que:

O desenvolvimento do espaço urbano sustentável implica em princípios básicos relacionados com o seguinte: manutenção dos caminhos naturais do escoamento, infiltrar o escoamento excedente das áreas impermeáveis, desenvolver áreas de proteção através do planejamento das bacias urbanas e as funções espaciais da infraestrutura urbana (TUCCI, 2007, p.).

Nesta linha, deve-se garantir a existência da compatibilidade entre os Planos Diretores Urbano, de Esgotamento Sanitário, de Resíduos Sólidos e de Drenagem Urbana, visando o planejamento integrado da cidade.

Miguez e Magalhães (2010) indicam que um Plano Diretor de Gerenciamento de Inundações “consiste em um conjunto de estratégias, medidas e políticas combinadas entre si, que objetivam gerenciar o risco de inundações e orientar o desenvolvimento de sistemas de drenagem”.

Para facilitar essa abordagem pelos municípios, o Ministério das Cidades elaborou o Programa de Drenagem Urbana e Controle de Erosão Marítima e Fluvial para apoiar o projeto de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis e de Manejo das Águas Pluviais. Esse programa tem como objetivo principal promover, em articulação com as políticas de desenvolvimento urbano, de uso e ocupação do solo e de gestão das respectivas bacias hidrográficas, a gestão sustentável da drenagem urbana com ações estruturais e não-estruturais dirigidas à recuperação de áreas úmidas, à prevenção, ao controle e à minimização dos impactos provocados pelas inundações urbanas e ribeirinhas.

No Manual para Apresentação de Propostas do Programa de Drenagem Urbana e Controle de Erosão Marítima e Fluvial, o Plano de Manejo de Águas Pluviais é definido como “uma ferramenta de planejamento que possibilita implantar soluções efetivas de baixo impacto que trazem ao município benefícios tangíveis e duradouros”¹². Neste mesmo documento são expostos os Princípios do Manejo Sustentável das Águas Pluviais Urbanas adotados pelo Ministério:

- ✓ Desenvolvimento urbano de baixo impacto:
 - ◆ busca de soluções mais eficazes e econômicas quando comparadas com soluções tradicionais;
 - ◆ preservação do ciclo hidrológico natural através da redução do escoamento superficial adicional gerado pela urbanização (alterações da superfície do solo decorrentes do desenvolvimento urbano).

¹² Apoio a Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis e de Manejo de Águas Pluviais. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br>>. Acessado em: 01/06/2009.

- ✓ Controle do escoamento superficial realizado o mais próximo possível do local onde a precipitação atinge o solo (controle de escoamento na fonte).
- ✓ Redução do escoamento superficial:
 - infiltração da água de chuva no subsolo;
 - aumento da evapotranspiração;
 - armazenamento temporário (com possibilidade de aproveitamento da água).

A concepção do Manejo de Águas Pluviais Urbanas apresenta atualmente, segundo Righetto et al. (2009), a “agregação de um conjunto de ações e soluções de caráter estrutural e não estrutural, envolvendo execuções de grandes e pequenas obras e de planejamento e gestão de ocupação do espaço urbano”.

Para Tucci (2005), os princípios básicos do controle do escoamento pluvial devem contemplar as seguintes considerações:

- ✓ **Bacia hidrográfica como um sistema:** o planejamento estratégico para controle do escoamento pluvial deve considerar toda a bacia, prevendo os efeitos das possíveis ações no funcionamento do sistema como um todo.
- ✓ **Medidas de controle no conjunto da bacia:** as ações e intervenções previstas no planejamento devem associar as medidas estruturais às não-estruturais, de modo a diminuir os impactos e os custos das obras, buscando soluções sustentáveis e a elevação da qualidade de vida.
- ✓ **Meios de implantação:** devem estar devidamente integrados, o Plano Diretor Urbano, a Legislação Municipal/Estadual e o Plano de Manejo das Águas Pluviais, a fim de estabelecer as linhas principais, controlar e orientar o planejamento do controle de inundações, respectivamente.
- ✓ **Horizonte de expansão:** deve ser considerado no planejamento, o zoneamento das áreas elaborado no Plano Diretor e a previsão do uso e ocupação do solo dessas áreas, em conformidade com os interesses estratégicos para o controle das inundações, garantindo os índices de adensamento e impermeabilização estabelecidos.

- ✓ **Critérios sustentáveis:** A implantação de novas edificações não deve alterar de forma significativa as condições hidrológicas naturais do local, preservando ao máximo e sempre que possível, as vazões de cheia originais pré-implantação. Os dispositivos de drenagem devem priorizar os mecanismos naturais do escoamento, como retenção e infiltração.
- ✓ **Controle permanente:** O respeito às condições estabelecidas no plano é de vital importância para o funcionamento do sistema de controle de inundações, sendo recomendado para áreas de risco desapropriadas, a imediata ocupação pública, para evitar novas invasões, e, ainda, incentivar a participação da sociedade em toda a fase do planejamento, desde a sua concepção até sua implantação e manutenção.
- ✓ **Educação:** A disseminação da informação é a mais eficiente maneira de garantir o pleno funcionamento do sistema de controle de inundações, seja pelo treinamento do corpo técnico municipal, conferindo uma melhor confecção das soluções técnicas, seja pela educação da própria população, conscientizando todos da importância das medidas previstas e da participação ao longo de todo o processo, tornando-o mais legítimo e com um maior nível de aceitabilidade.
- ✓ **Administração:** A manutenção e o controle são imprescindíveis para o correto funcionamento do sistema de drenagem, sendo sua administração de competência municipal.

O Plano de Manejo das Águas Pluviais do Município deve necessariamente atender aos princípios de Manejo Sustentável das Águas Pluviais Urbanas, e deverá buscar os seguintes objetivos (Ministério das Cidades, 2008):

- ✓ Reduzir os prejuízos decorrentes das inundações.
- ✓ Melhorar as condições de saúde da população e do meio ambiente urbano, dentro de princípios econômicos, sociais e ambientais.
- ✓ Planejar os mecanismos de gestão urbana para o manejo sustentável das águas pluviais e da rede hidrográfica do município.
- ✓ Planejar a distribuição da água pluvial no tempo e no espaço, com base na tendência de evolução da ocupação urbana.

- ✓ Ordenar a ocupação das áreas de risco de inundação através de regulamentação.
- ✓ Restituir parcialmente o ciclo hidrológico natural, reduzindo ou mitigando os impactos da urbanização.
- ✓ Formatar um programa de investimento de curto, médio e longo prazo.

Os projetos de drenagem propostos pelo plano deverão apresentar a melhor relação custo-benefício, abrangendo aspectos sociais e econômicos, além de estar integrados às diretrizes do Comitê de Bacia Hidrográfica local, se existente.

Também deverá ser contemplado pelo plano um trabalho sócio-ambiental através da elaboração de um projeto que contemple a mobilização social, a comunicação, a formação de educadores/agentes na área de saneamento ambiental e outras ações de educação ambiental, visando a busca da sustentabilidade sócio-econômica e ambiental, incluindo a participação comunitária nas fases de elaboração, implementação, avaliação e uso das obras e serviços propostos. É de grande importância a elaboração do trabalho sócio-ambiental que incentive a participação comunitária na elaboração do plano, a capacitação de técnicos orientada ao manejo das águas pluviais urbanas e o desenvolvimento de um trabalho de educação ambiental orientado para o tema das águas urbanas junto à população. Esse trabalho poderá evitar futuras violações das propostas planejadas, uma vez que a população local passa a perceber plenamente os benefícios do controle de inundações, permitindo sua aceitação e legitimação pela comunidade, fator imprescindível para a viabilidade e eficácia do plano.

As premissas a serem consideradas na elaboração do Plano de Manejo de Águas Pluviais são (Ministério das Cidades, 2008):

- ✓ Abordagem interdisciplinar no diagnóstico e na solução dos problemas de inundação.
- ✓ Plano de Águas Pluviais é um componente do plano de desenvolvimento urbano da cidade. A drenagem faz parte da infraestrutura urbana, portanto, deve ser planejada em conjunto com os outros sistemas que compõem essa infraestrutura.
- ✓ O escoamento pluvial não pode ser ampliado pela ocupação da bacia.
- ✓ O plano tem como unidade de planejamento cada bacia hidrográfica do município.

- ✓ O sistema de águas pluviais deve ser integrado ao sistema de saneamento ambiental, propondo, no plano, medidas para o controle de material sólido e a redução da carga poluidora das águas pluviais.
- ✓ O plano deve regulamentar a ocupação do território através do controle das áreas de expansão e da limitação do adensamento das áreas ocupadas.
- ✓ Essa regulamentação deve ser feita para cada bacia como um todo.
- ✓ O controle de inundações é um processo permanente, não devendo ser limitado a regulamentação, a legislação e a construção de obras de proteção. É necessário um plano de fiscalização das medidas propostas.

Para a elaboração do Plano de Manejo de Águas Pluviais, o manual do Ministério das Cidades (2008) sugere uma série de atividades:

1. Preparação das bases cartográficas.
2. Formulação de cenários.
 - ◆ Cenário atual
 - ◆ Cenário Tendencial
 - ◆ Cenários Alternativos de Planejamento
 - ◆ Cenário Proposto
3. Diagnóstico e Prognóstico das Inundações.
4. Otimização das Medidas Estruturais de Controle.
5. Anteprojeto das Medidas Estruturais de Controle.
6. Proposição de Medidas de Controle Não-Estruturais.
7. Análise benefício-custo
8. Elaboração do Programa Municipal de Manejo de Águas Pluviais (instrumento de planejamento para a implantação das medidas propostas):

- Medidas Emergenciais
- Metas e prioridades
- Integração com o PDU e Lei de Zoneamento
- Programas complementares de médio e longo prazo.
- Divulgação do plano e discussão com a comunidade.
- entre outros...

9. Elaboração do Manual de Manejo das Águas Pluviais Urbanas:

- Tem como objetivo orientar os técnicos da Prefeitura, prestadores de serviço e empreendedores que atuam no setor de drenagem e águas pluviais.

O documento intitulado **Water Budget Discussion Paper**¹³ menciona que a sustentabilidade de um manejo de águas pluviais será alcançada através da busca de um balanço ideal entre três componentes:

- ✓ As demandas sociais por serviços;
- ✓ As demandas ambientais para assegurar a qualidade ambiental de longo prazo e a vitalidade dos corpos d'água;
- ✓ As demandas econômicas para alcançar soluções com boa relação custo-eficiência, tanto no curto prazo como para longo prazo.

Este mesmo documento observa ainda, que a gestão das inundações, através do controle dos picos de cheia e considerando-se a qualidade da água, tem trazido benefícios significantes para a proteção das propriedades e para a segurança pública, assim como está minimizando os níveis de contaminantes afluentes aos rios e córregos.

Para Righetto et al. (2009), o manejo de águas pluviais urbanas se inicia pelo conhecimento da bacia ou sub-bacia urbana a ser contemplada pelo plano, através do levantamento de suas condições atuais, desde as condições naturais da rede de drenagem pré-urbanização até o

¹³ Elaborado por **Gartner Lee Limited** para **Toronto and Region Conservation (TRC)**. Disponível em: <www.sustainabletechnologies.ca/Portals/_Rainbow/Documents>. Acessado em: 19/08/2009.

histórico de desenvolvimento urbano. Em seguida, o autor indica como uma segunda etapa do manejo o estudo para diagnóstico do sistema de drenagem existente, das características de ocupação do uso do solo atuais e futuras e das diretrizes estabelecidas pelo Poder Público quanto às normas e leis reguladoras do uso e ocupação do solo e de proteção ambiental. A continuidade das ações pode seguir em duas vertentes:

A primeira trata da infraestrutura, dos elementos hidráulicos estruturais, das práticas de contenção e transporte das águas pluviais, tanto nas fontes geradoras de deflúvios superficiais, como lotes, praças e parques, quanto no sistema viário, dos sistemas de micro e macrodrenagem, dos sistemas de transposição, do carreamento e deposição de sedimentos e resíduos sólidos, etc. A segunda trata dos dispositivos legais e de administração da infraestrutura de drenagem, envolvendo a operacionalidade do sistema, a manutenção, a fiscalização e medidas de remediação em tempo real, em função de anomalias inevitáveis naturais ou geradas em função da dinâmica de ocupação do espaço urbano (RIGHETTO, 2009).

Em outras palavras, as ações do planejamento do manejo de águas pluviais seguem-se nas previsões de implantação das medidas estruturais e não estruturais.

3. Legislação Aplicada

Para a elaboração de um Plano de Águas Pluviais, faz-se necessário o conhecimento do suporte legal para as ações de planejamento de drenagem e controle de inundações. Nascimento e Baptista (2009) atentam para o fato de ainda não existir, no Brasil, “uma base regulamentar específica e direcionada ao emprego de técnicas compensatórias para o manejo das águas pluviais”. Porém, os autores ressaltam a existência de instrumentos legais que podem conduzir ao uso destas técnicas, a fim de controlar os escoamentos, reduzir a poluição difusa e o seu impacto sobre os meios receptores. Os principais instrumentos legais que dão suporte a essas ações são:

- ✓ Lei 9.433 de 1997 → Lei das Águas
- ✓ Lei 3.239 de 1999 → Política Estadual de Recursos Hídricos
- ✓ Lei Federal 10.257 de 2001 → Estatuto da Cidade
- ✓ Lei Federal 11.445 de 2007 → Lei do saneamento

Carneiro (2008) cita três dessas leis como definidoras da regulação pública dos recursos hídricos e saneamento básico no Brasil, são elas: a Lei das Águas; a Política Estadual de Recursos Hídricos; e a Lei do Saneamento. Neste capítulo, as quatro leis mencionadas serão apresentadas e discutidas na medida em que possam interferir no planejamento do controle de inundações urbanas.

3.1. Lei das Águas (9.433/97)

A Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como “Lei das Águas”, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídrico (SNGRH). De acordo com a lei, a Política de Recursos Hídricos no Brasil será baseada nos seguintes fundamentos¹⁴:

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

¹⁴ Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, Art. 1º.

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades

Essa fundamentação trouxe importantes avanços para o gerenciamento dos recursos hídricos, como o reconhecimento da água como um bem de domínio público e um recurso natural limitado e, por isso, dotado de valor econômico. Outros dois fundamentos são a instituição da bacia hidrográfica como a unidade territorial de planejamento e a necessidade de se garantir o uso múltiplo das águas.

Um dos objetivos da Lei é a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais. Neste objetivo se enquadra perfeitamente o controle de inundações urbanas, sejam elas causadas por chuvas intensas ou por deficiência no controle do uso do solo.

Dentre as diretrizes gerais de ação da PNRH, pode-se destacar como grande avanço no que tange o controle de inundações urbanas, o estabelecimento da necessidade de articulação e integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental e com a gestão do uso do solo, criando também uma articulação entre os planejamentos regional, estadual e nacional.

Os Planos de Recursos Hídricos, um dos instrumentos instituídos pela lei 9.433, são planos diretores e visam à orientação e fundamentação da PNRH. A importância deste instrumento para o controle de inundações se faz no estabelecimento dos seguintes itens a serem contemplados pelo Plano de Recursos Hídricos:

- ✓ **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos** → imprescindível no planejamento das ações necessárias para mitigação dos problemas de inundação.

- ✓ **Análise de alternativas de crescimento demográfico e de modificações dos padrões de ocupação do solo** → importante para traçar as estratégias de médio e longo prazo no controle de inundações.
- ✓ **Metas de aumento da qualidade dos recursos hídricos disponíveis** → estabelecem objetivos que delinearão as ações necessárias para a melhoria dos escoamentos pluviais e da qualidade ambiental dos rios urbanos.
- ✓ **Propostas para a criação de áreas sujeitas à restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos** → garantem a preservação de áreas estratégicas tanto para o controle de inundações, como para a preservação ambiental, contribuindo e fortalecendo a, muitas vezes deficiente, política de uso do solo municipal.

Uma análise dos fundamentos da Lei 9.433 tendo em vista a situação atual dos rios urbanos traz reflexões sobre a real implicação da lei, promulgada 13 anos atrás, na gestão dos recursos hídricos em nossas cidades. As políticas de gestão dos recursos hídricos no Brasil ainda se encontram em um estágio relativamente embrionário, apesar de mais de uma década já ter se passado de existência da Lei das Águas.

Com a Política Nacional de Recursos Hídricos instituída, diversos passos foram tomados em direção a uma real aplicação de suas diretrizes, articulando os diferentes níveis da federação, porém, a real aplicação da lei ainda não reflete em resultados perceptíveis localmente.

3.2. Política Estadual de Recursos Hídricos (3.239/99)

A Lei 3.239 de 1999 institui a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) e cria o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Os princípios da Política Estadual de Recursos Hídricos são fundados na qualificação da água como um recurso essencial à vida, finito, dotado de valor econômico, social e ecológico e de domínio público.

Dentre os objetivos da lei, destacam-se importantes para a gestão do controle de inundações¹⁵:

- ✓ promover a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos, de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais;

¹⁵ Lei 3.239, de 02 de agosto de 1999, Art. 3º

- ✓ promover a articulação entre União, Estados vizinhos, Municípios, usuários e sociedade civil organizada, visando à integração de esforços para soluções regionais de proteção, conservação e recuperação dos corpos de água;
- ✓ buscar a recuperação e preservação dos ecossistemas aquáticos e a conservação da biodiversidade dos mesmos; e
- ✓ promover a despoluição dos corpos hídricos e aquíferos.

Ao assegurar a busca para atingir tais objetivos, a PERH direciona ações para promoção da melhoria da qualidade ambiental das águas, indo de encontro às estratégias do Manejo Sustentável das Águas Pluviais, que baseia-se no balanço entre qualidade, quantidade e amenidade ambiental.

Portanto, a busca pela recuperação e preservação dos ecossistemas aquáticos é de extrema importância para a sustentabilidade de um projeto de controle de inundações, uma vez que preserva áreas naturais de inundação e as matas ciliares, amortecendo as vazões de cheia e minimizando os problemas de erosão, entre outras vantagens.

A PERH estabelece ainda, em seu artigo 4º, uma série de diretrizes em conformidade com as necessidades demandadas em plano de controle de inundações, como a gestão sistemática dos recursos hídricos sem a dissociação entre os aspectos de quantidade e de qualidade; da integração da política de recursos hídricos com as de preservação e conservação ambientais, controle ambiental e recuperação de áreas degradadas; o controle das cheias, a prevenção das inundações e a correta utilização das várzeas; o zoneamento de áreas inundáveis; a prevenção da erosão do solo em áreas urbanas e rurais, evitando o assoreamento dos corpos hídricos; a utilização adequada das faixas marginais aos rios, lagoas e lagoas; e a formação de uma consciência da necessidade de preservação dos recursos hídricos, através de ações de educação ambiental, investindo também no monitoramento das bacias hidrográficas.

No Plano Estadual de Recursos Hídricos deverão constar as metas de curto, médio e longo prazos, para atingir índices progressivos de melhoria da qualidade, racionalização do uso, proteção, recuperação e despoluição dos recursos hídricos, assim como as medidas a serem tomadas, os programas a serem desenvolvidos e os projetos a serem implantados, no intuito

de atender às metas previstas. Também deverão ser incorporadas ao Plano as diretrizes para a proteção das áreas marginais de rios, lagoas, lagunas e demais corpos de água¹⁶.

Outro instrumento criado pela PERH de grande relevância para o controle de inundações é o Programa Estadual de Conservação e Revitalização de Recursos Hídricos (PROHIDRO), visando à concretização dos objetivos pretendidos pela Política Estadual de Recursos Hídricos e mensurados pelas metas estabelecidas no Plano Estadual de Recursos Hídricos. De acordo com a lei:

O objetivo do PROHIDRO é proporcionar a revitalização, quando necessária, e a conservação, onde possível, dos recursos hídricos, como um todo, sob a ótica do ciclo hidrológico, através do manejo dos elementos dos meios físico e biótico, tendo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e trabalho¹⁷.

Esse programa possibilita a conexão do Plano de Manejo de Águas Pluviais com a legislação estadual, dando maior força às suas resoluções.

3.3. Estatuto da Cidade (10.257/01)

Apesar de não conter diretrizes específicas quanto ao controle de inundações em áreas urbanas, a Lei Federal 10.257, de 2001, responsável por **“estabelecer normas de ordem pública e interesse social que regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental”**, garantindo:

A política urbana tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, mediante (...) a garantia do direito a **idades sustentáveis**, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao **saneamento ambiental**, à **infra-estrutura urbana**, ao transporte e aos **serviços públicos**, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações.¹⁸

Ainda em seu artigo 2º, a Lei estabelece como diretrizes gerais o **planejamento do desenvolvimento das cidades** de modo a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus **impactos negativos sobre o meio ambiente** e a **ordenação e controle do uso do solo**, de forma a evitar **usos excessivos em relação à infra-estrutura urbana**, deterioração de áreas urbanizadas e a poluição e degradação ambiental, garantindo ainda a **proteção, preservação e recuperação do meio ambiente natural e construído**.

¹⁶ Lei 3.239, de 02 de agosto de 1999, Art. 9º

¹⁷ Lei 3.239, de 02 de agosto de 1999, Art. 11º, § 1º.

¹⁸ Estatuto da Cidade, Lei 10.257, de 10 de julho de 2001, Art. 2º, inciso I.

A partir dessas diretrizes já fica evidente a compatibilidade do Estatuto da Cidade com as políticas de controle de inundações, uma vez que o controle sobre o uso e a ocupação do solo terá efeito direto sobre o regime de escoamento pluvial. Assim, a busca por um desenvolvimento urbano que corrija seus impactos negativos, garantindo a proteção do meio ambiente natural e construído, evitando usos excessivos da infra-estrutura urbana, deverá certamente considerar o manejo das águas pluviais para alcançar esses objetivos.

A Lei 10.257/01 possibilita o emprego de diversos instrumentos de política urbana como meios de controle dos impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico (BATISTA et al., 2005).

Carneiro (2008) realizou uma leitura dos principais instrumentos previstos no Estatuto da Cidade destacando suas aplicações e potencialidades para articulação do controle do uso do solo em consonância com o gerenciamento dos recursos hídricos. A seguir é apresentado um resumo conciso destes instrumentos e suas implicações para o controle de inundações baseado em Carneiro (2008) e Nascimento e Baptista (2009):

- ✓ Parcelamento, edificação ou utilização compulsórios
 - ◆ Obrigatoriedade de parcelar, edificar ou utilizar o solo urbano, induzindo o adensamento de áreas já dotadas de infra-estrutura e evitando a pressão sobre as áreas ambientalmente frágeis, como áreas com riscos de inundações.

- ✓ Imposto predial e territorial urbano progressivo no tempo
 - ◆ Induzir, por estímulo econômico, a utilização do solo urbano, a fim de coibir a não utilização ou a subutilização da propriedade, sob pena de pagamento do IPTU progressivo no tempo, tendendo a diminuir a pressão por novas áreas, assim como o instrumento anterior.

- ✓ Desapropriação com pagamento em títulos da dívida pública
 - ◆ Incide sobre as propriedades não cumpridoras da utilização compulsória após decorridos cinco anos de aplicação do IPTU progressivo. Esse instrumento viabiliza o cumprimento da função social do espaço urbano, evitando a subutilização de terras. A desapropriação permite ao poder público prever áreas para realocação de famílias moradoras de áreas de risco ou a criação de áreas

voltadas para a minimização de riscos de inundações, por meio da instalação de parques urbanos inundáveis, reservatórios de detenção ou áreas que aumentem a infiltração das águas.

✓ Direito de preempção

- Confere ao poder público municipal preferência para a compra de imóvel urbano, permitindo a aquisição de áreas para realocação de famílias em áreas de risco ou para minimização de riscos de inundações, através da instalação de estruturas de controle, como bacias de detenção e retenção, dispositivos de infiltração, entre outras. Será de maior interesse quando essas estruturas forem combinadas à criação de áreas verdes e espaços públicos para atividades de lazer.

✓ Outorga onerosa do direito de construir

- Consiste na autorização pelo Poder Público para se exercer o direito de construir com coeficientes superiores aos previamente estabelecidos, mediante contrapartida a ser prestada pelo beneficiário. Esse instrumento permite uma flexibilização das taxas de ocupação em áreas preferenciais para a ocupação, diminuindo a pressão sobre outras áreas mais sensíveis aos riscos de inundações.

✓ Transferência do direito de construir

- Para propriedades em que incidam restrições ao uso do solo, esse instrumento permite ao proprietário do imóvel transferir o direito de construir para outro local, evitando, assim, a desvalorização de imóveis com áreas de preservação. Esse instrumento permite a um proprietário de áreas de interesse para o controle de inundações, como áreas alagadiças e faixas marginais, transferir o direito de construir sobre essas áreas para outros locais, retirando do proprietário a perda econômica devido à restrição de uso de sua propriedade.

✓ Operações urbanas consorciadas

- Conjunto de intervenções e medidas, coordenadas pelo poder público municipal, com a finalidade de preservação, recuperação ou transformação de áreas urbanas contando com a participação dos proprietários, moradores, usuários permanentes e investidores privados. Permite ao poder público traçar estratégias de recuperação

ambiental e controle de inundações, viabilizando novas fontes de recursos para aplicação na mesma área em que foi negociada a operação.

- ✓ Estudo de impacto de vizinhança
 - ◆ Avalia os efeitos positivos e negativos da implantação de novas atividades ou empreendimentos na qualidade de vida da população residente na área e em suas proximidades. Esse instrumento possibilita a previsão de contrapartidas para mitigação dos impactos sobre o ciclo hidrológico, como a exigência de medidas compensatórias dos efeitos negativos da impermeabilização de superfícies.

- ✓ Zonas Especiais de Interesse Social
 - ◆ A instituição de zonas especiais de interesse social tem como consequência a redução das pressões urbanas sobre áreas de risco, as quais tendem a ser invadidas e ocupadas irregularmente, uma vez que são criadas políticas de habitação voltadas para inclusão urbana da população de baixa renda. Essas áreas também podem reduzir possíveis impactos do adensamento no ciclo hidrológico, exigindo padrões de construção sustentáveis e previsão de medidas compensatórias para o controle de inundações, além de trazer para a legalidade famílias alocadas em áreas irregulares e de risco, possibilitando um maior controle do uso do solo pelo município.

3.4. Lei do Saneamento (11.445/07)

A Lei 11.445 de 2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento e para a política federal de saneamento, definindo como princípios fundamentais dos serviços públicos de saneamento: a universalização do acesso e a integralidade dos serviços, de forma adequada à saúde pública e à proteção do meio ambiente; **a disponibilidade de serviços de drenagem urbana e de manejo de águas pluviais adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado**; a articulação com as políticas de desenvolvimento urbano e regional de habitação e proteção ambiental; a integração das infra-estruturas e serviços com a gestão eficiente de recursos hídricos; e outros¹⁹.

¹⁹ Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, Art. 2º.

A lei abrange, dentro do setor de saneamento, os serviços de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e manejo de águas pluviais urbanas, definindo este último como o “conjunto de atividades, infra-estruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas”.

Essa abordagem mais completa sobre todos os sistemas que compõem o setor de saneamento garante um melhor e mais eficiente planejamento do setor, elevando a importância da visão sistêmica das redes de infra-estrutura urbana. Assim, todas as parcelas possuem o mesmo peso e devem ser pensadas conjuntamente, com soluções que levem suas inter-relações em consideração.

Com isso, a drenagem urbana deixa de ser relegada como um simples sistema coadjuvante no saneamento e passa a configurar importante papel na busca por qualidade de vida em áreas urbanas por meio do plano de manejo de águas pluviais.

No Art. 9 desta lei, fica definido como responsabilidade do titular dos serviços públicos formular a política pública de saneamento através da elaboração dos planos de saneamento.

Fica estabelecido também, que o plano de saneamento deverá observar no mínimo:

- ✓ Diagnóstico da situação.
- ✓ Objetivos e metas de curto, médio e longo prazos.
- ✓ Programas, projetos e ações necessárias para atingir os objetivos e as metas.
- ✓ Ações para emergências e contingências.
- ✓ Mecanismos para avaliação da eficiência e eficácia das ações programadas.

3.5. Experiência Municipal Brasileira

Alguns municípios no Brasil já possuem legislação aplicada à regulação do processo de urbanização a fim de mitigar seus impactos sobre o controle de inundações, como, por exemplo:

- ✓ Belo Horizonte – Lei 7.166 / 1996 estabelece padrões e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo em áreas urbanas. A lei prevê a construção de reservatórios em lote e caixas de drenagem, com o intuito de promover um atraso no lançamento das águas precipitadas, através da retenção de 30 litros de água pluvial para cada metro quadrado de área impermeabilizada excedendo os limites estabelecidos por lei.
- ✓ São Paulo – Lei 13.276 / 2002 torna obrigatória a construção de reservatórios de lote para coletar as águas precipitadas sobre os telhados e pavimentos em lotes com área impermeabilizada acima de 500 m², tanto para futuros empreendimentos como os já existentes.
- ✓ Porto Alegre – Lei do Plano Diretor Urbano e Ambiental aprovado em 2002 contempla aspectos associados à definição de uma vazão de descarga a ser mantida após a urbanização de áreas da cidade, através do amortecimento das vazões pluviais, em função da área impermeabilizada e da implantação de medidas de controle na fonte.
- ✓ Rio de Janeiro – Lei 23.940 / 2004 é similar à lei de São Paulo, mas prevê a instalação de reservatórios de amortecimento apenas para futuros empreendimentos e, ainda, torna obrigatório o aproveitamento da água pluvial.

4. Medidas de Controle para o Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais da Bacia do rio Pilar/Calombé

Considerando a importância da gestão urbana integrada para alcançar uma melhor eficiência nos projetos de drenagem e controle de inundações, é proposto, neste trabalho, um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais para o controle de inundações no município de Duque de Caxias, aplicado na bacia do rio Pilar/Calombé, que será detalhado mais adiante. O Plano de Manejo das Águas Pluviais (PMAP), que em muitos casos ainda é denominado como Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU), deve ter como objetivo “tratar a drenagem como parte da infra-estrutura urbana, buscando um desenvolvimento harmônico entre a ocupação do espaço pela população e as redes de drenagem” (ALLASIA et al., 2003). Um pouco mais abrangente, Marques (2006) caracteriza o PDDrU como:

...um instrumento de gestão ambiental urbana, que, integrado ao Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e aos interesses majoritários da sociedade busca, essencialmente, planejar a distribuição da água no tempo e no espaço, com base na tendência de ocupação urbana, contribuindo com o bem estar social e preservação ambiental. (MARQUES, 2006)

Baseado em Tucci (1995, 1997), projetos de Controle de Inundações devem apresentar como princípios básicos os seguintes elementos:

- ✓ Estabelecer o controle da bacia hidrográfica urbana e não de pontos isolados;
- ✓ Os cenários de análise devem contemplar o desenvolvimento futuro da bacia;
- ✓ Evitar que a ampliação da inundação devido à urbanização seja transferida para jusante;
- ✓ O controle das áreas ribeirinhas deve priorizar o uso de medidas não estruturais;
- ✓ O controle deve ser estabelecido através do Plano de Manejo de Águas Pluviais²⁰ e administrado pelo município com o apoio técnico dos Estados.

Para a bacia hidrográfica em estudo, as medidas foram divididas de acordo com o tempo de implantação em curto, médio e longo prazos. Assim, as medidas de controle de inundações do Plano de Manejo de Águas Pluviais da bacia do rio Pilar/Calombé são apresentadas nos próximos itens.

²⁰ Originalmente “Plano Diretor de Drenagem Urbana”

4.1. Medidas de Curto Prazo (Emergenciais e Corretivas)

As medidas de curto prazo visam corrigir ou mitigar problemas estruturais na rede de macrodrenagem, com o intuito de permitir um funcionamento correto do sistema de drenagem natural da bacia. Assim, nesta etapa, busca-se intervir pontualmente nos trechos que apresentam extravasamento da calha principal do rio por insuficiência hidráulica da seção transversal do canal através de medidas estruturais. Essa insuficiência é causada por estrangulamentos devido a aterros clandestinos, obras de arte mal dimensionadas (pontes e travessias), acúmulo de resíduos sólidos urbanos (lixo, resíduos de construção, etc.) ou pelo assoreamento do rio.

Portanto, como medidas emergenciais são indicadas:

- ✓ Limpeza e desassoreamento de toda a extensão dos rios integrantes da macrodrenagem.
- ✓ Remoção de singularidades da calha dos rios (travessias subdimensionadas e aterros).
- ✓ Conformação da seção transversal dos rios (seção trapezoidal em solo).

4.2. Medidas de Médio Prazo

Nesta fase são previstas diversas ações de cunho não estrutural, como:

- ✓ Cadastro da rede de drenagem.
 - ◆ O cadastro tem como objetivo fornecer dados para o diagnóstico da atual situação da rede de drenagem e o conhecimento dos problemas existentes, através de uma modelagem mais precisa e assim, permitir o estabelecimento de estratégias de investimento e a análise de futuros projetos na bacia.
- ✓ Zoneamento de inundações.
 - ◆ A partir dos resultados da modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia são confeccionados mapas com manchas de inundações para eventos hidrológicos com diferentes riscos associados, i.e., tempos de recorrência de 10, 20, 50 anos. Esses mapas permitem a delimitação das áreas de acordo com o risco de inundação a que estão sujeitas e, com isso, hierarquizar os possíveis usos dessas áreas. Serão consideradas áreas de proteção permanente as faixas marginais com largura

mínima prevista no Código Florestal, devendo ser preservadas como zona de passagem de cheias.

- ✓ **Elaboração do Manual de Drenagem Urbana**
 - ◆ O objetivo do Manual de Drenagem Urbana é fornecer aos projetistas uma orientação sobre as restrições e métodos a serem empregados no dimensionamento da drenagem, devendo apresentar a **Concepção e os princípios do plano**, a **Regulamentação por distritos de drenagem** e os **Critérios de projeto**.

Com o diagnóstico da rede de drenagem e os cenários de desenvolvimento urbano definidos, deve-se elaborar os projetos básicos de intervenções estruturais de maior porte, como os reservatórios de detenção em praças e os parques fluviais inundáveis. De acordo com a sensibilidade do local às inundações e da capacidade de resposta da estrutura de controle no sistema pode ser feita uma hierarquização dos investimentos.

Nesta fase também deve ser iniciado o programa de reflorestamento da bacia, priorizando áreas de encostas sujeitas a pressão urbana.

4.3. Medidas de Longo Prazo

As medidas de longo prazo visam garantir uma proteção contínua aos riscos de inundações, através de regulamentação e controle das ações previstas no Plano. Para isso deverão ser elaborados o plano de ações e o sistema de supervisão e controle que contará com o programa de monitoramento da bacia. O controle deve ser permanente para que seja garantido o funcionamento esperado do conjunto de medidas previsto para controle das inundações.

No plano de ações da bacia serão definidos a gestão da implementação do plano, envolvendo a definição das entidades que complementam as ações previstas; o mecanismo de financiamento proposto para as ações do plano e recuperação de custos; o desenvolvimento seqüenciamento de ações no tempo e espaço relacionadas com o plano.

As medidas estruturais não contempladas em médio prazo deverão ser gradativamente implantadas à medida que o desenvolvimento da urbanização se processa, tendo como objetivo o cenário de ocupação futura com controle sobre o uso e ocupação do solo. O controle sobre o uso do solo deverá constar do Plano Diretor Urbano do município,

respeitando os limites de impermeabilização impostos pelo Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais.

Para os lotes que apresentarem taxas de impermeabilização acima do limite estabelecido pelo plano para a zona em que se localizam, será exigida a implantação de medidas compensatórias de controle de inundações aplicadas na fonte, de forma a garantir vazões máximas compatíveis com um lote dentro dos limites de impermeabilização. As medidas poderão ser reservatórios de lote, com ou sem aproveitamento das águas pluviais, tetos verdes e dispositivos individuais de retenção, retenção ou infiltração.

Futuros empreendimentos poderão construir acima dos limites de impermeabilização respectivos à zona de ocupação em que serão implantados, desde que sejam previstos no projeto as medidas de controle compensatórias pertinentes, como, por exemplo, reservatórios de lote para lotes individuais ou bacias de retenção de maior porte para loteamentos em conjunto, capazes de amortecer as vazões geradas por todos os lotes antes que seja descarregada no sistema de drenagem.

O cálculo do volume de armazenamento em lotes e loteamentos, necessário para garantir uma vazão pós-implantação da ocupação compatível com as vazões de um lote ou loteamento com taxas de impermeabilização máximas permitidas pelo plano, poderá ser calculado de acordo com metodologia proposta por Tucci (2000).

O volume poderá ser calculado pela seguinte equação:

$$V = (Q_d - Q_a) \cdot t \quad (1)$$

Onde:

- ✓ V é o volume de retenção;
- ✓ Q_d é a vazão de pico calculada para a área ocupada com taxa de impermeabilização **superada**;
- ✓ Q_a é a vazão de pico calculada para a área ocupada com taxa de impermeabilização **permitida**;
- ✓ t é o tempo da duração da chuva que produz o maior volume

O cálculo das vazões **permitida** e **superada** poderá ser realizado pelo método racional, através da seguinte equação:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

Onde **C** é o coeficiente de escoamento superficial; **I** é intensidade da precipitação; e **A** é a área total de drenagem. O coeficiente de escoamento superficial será função das parcelas de áreas permeáveis e impermeáveis. O passo-a-passo para cálculo do volume utilizando essa metodologia pode ser encontrado em Tucci (2000).

Deverão ser previstas em projetos de loteamentos, em conformidade com o Zoneamento Urbano, áreas destinadas à implantação de estruturas de controle de inundações, e.g., bacias de retenção/retenção associadas a usos urbanos, como praças e parques. As áreas a serem reservadas corresponderão a 5% da área do loteamento, sendo parte da área a ser doada para o município, de acordo com a Lei de Parcelamento do Solo Urbano (Lei Federal 6.766/79). A soma total das áreas reservadas para utilização de retenção dos escoamentos pluviais deverá ser, no mínimo, igual a 2% de toda a área superficial da bacia.

A regulamentação da drenagem urbana e das áreas ribeirinhas deverá ter legislação integrada ao Plano Diretor, objetivando o controle da drenagem urbana para os locais a serem desenvolvidos, tanto em nível de novos loteamentos como na densificação, que envolve a aprovação de obras em áreas já loteadas de acordo com os limites estabelecidos.

Um programa de Educação Ambiental deverá ser formatado, no intuito de se sensibilizar a população para os problemas ambientais ligados à drenagem urbana e ao controle de inundações. Dentro deste programa também deverá ser considerado o treinamento dos técnicos municipais e projetistas envolvidos na área de drenagem urbana, objetivando a formação de um corpo técnico capaz de responder às novas demandas no campo da Engenharia Urbana e do Manejo Sustentável de Águas Pluviais.

Essa medida tem como principais objetivos a aceitação e legitimação pública das medidas de controle adotadas, a melhoria técnica dos projetos de controle, reduzindo o número de falhas das estruturas por mau dimensionamento e a capacitação de funcionários públicos para uma melhor fiscalização e controle das ações sobre o espaço urbano.

4.4. Sistema de Modelagem Matemática

Um importante ponto a ser considerado, na modelagem de inundações urbanas, é que toda a bacia deve ser representada como um sistema, a fim de se abranger a variabilidade temporal e espacial do fenômeno. Esse tipo de abordagem permite a simulação de ações integradas sobre a bacia, juntando intervenções tradicionais de canalização com medidas distribuídas, que visam a infiltração e a detenção dos escoamentos pluviais (MIGUEZ, 2009).

Bacias urbanas tendem a apresentar um grande potencial para produção de grandes áreas inundáveis. Quando a água sai do sistema de drenagem, os caminhos do fluxo dependem dos padrões da urbanização e da topografia local, podendo diferir bastante do fluxo na rede de drenagem. Assim, as calçadas podem agir como vertedores dos rios, as águas extravasadas passam a escoar sobre as ruas como em canais, e o armazenamento de água na própria rua, nas edificações, nos parques e estacionamentos fazem com que essas áreas atuem como reservatórios, mesmo que de uma maneira indesejável. Para representação da natureza dos escoamentos em casos de inundações urbanas, faz-se necessário a aplicação de um modelo matemático distribuído, que seja capaz de representar o comportamento da água no meio urbano de acordo com os padrões descritos acima. Assim, a utilização do modelo de células proposto por Miguez (2001) mostra-se como uma ferramenta valiosa para projetos e pesquisas das inundações urbanas.

Por isso, para a análise quantitativa das inundações urbanas tratadas nesta dissertação, optou-se pela utilização do Modelo de Células de Escoamento para Bacias Urbanas – MODCEL, desenvolvido na COPPE/UFRJ (MIGUEZ, 2001). Esse modelo permite a avaliação espacial do comportamento hidrológico e hidrodinâmico, o efeito das intervenções propostas para controle das inundações e permite a análise das variações nesse comportamento devido às mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo. A partir dos resultados calculados pelo modelo, é possível a realizar a delimitação das manchas de inundação provenientes da resposta do sistema de macrodrenagem a um evento hidrológico pré-estabelecido.

O estudo de caso proposto para consubstanciar a discussão parte dos estudos para revisão do **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí – Ênfase: Controle de Inundações** finalizado em agosto de 1996 (Projeto Iguaçu). Essa revisão foi denominada **Plano Diretor de Recursos Hídricos, Controle de Inundações e Recuperação Ambiental da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí** iniciado pela COPPE/UFRJ em 2008.

A partir deste estudo e da revisão bibliográfica foram discutidos diferentes cenários de simulação para permitir a análise dos efeitos das técnicas convencionais e sustentáveis nos padrões das inundações, assim como a combinação dessas técnicas em um cenário com o manejo sustentável de águas pluviais implantado junto às intervenções estruturais necessárias para o controle das enchentes. Espera-se com isso, mostrar que há uma necessidade de articulação entre as políticas públicas para ordenamento do uso e ocupação do solo e o plano de drenagem urbana para uma melhor eficiência dos gastos públicos nas intervenções de combate às inundações.

Os cenários de simulação estão definidos dentro de três grandes grupos, tomados como condições de aplicação do modelo, sendo:

- ✓ CONDIÇÃO 0 → Situação atual da bacia, sem projetos de macrodrenagem (capacidade atual do sistema de drenagem)
- ✓ CONDIÇÃO 1 → Projeto de macrodrenagem convencional implantado
- ✓ CONDIÇÃO 2 → Projeto de macrodrenagem sustentável com uso de medidas distribuídas implantado

A análise comparativa entre as diferentes concepções para projetos de combate às inundações sugeridas neste estudo será realizada através do estudo da sustentabilidade de cada projeto frente às suas demandas por investimentos e a capacidade de resposta em diferentes cenários de urbanização futura. Na **Figura 4.1** é apresentado um diagrama com a metodologia utilizada para a análise dos projetos de combate às enchentes propostos.

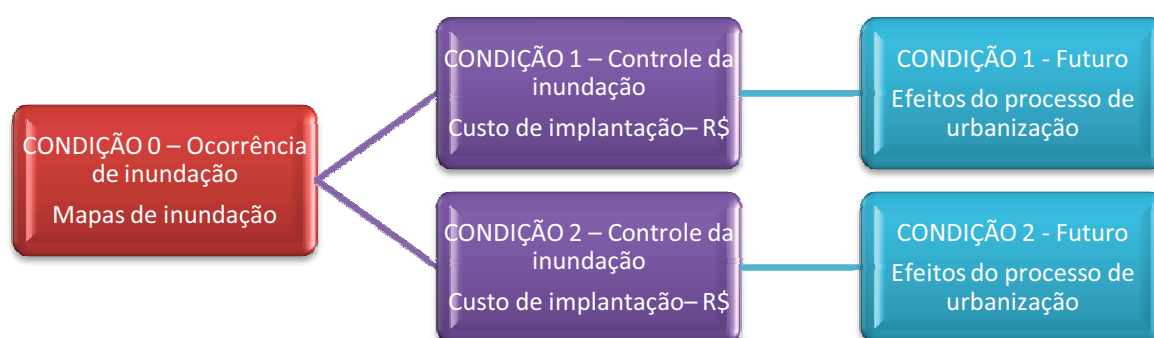


Figura 4.1 – Diagrama metodológico para análise dos projetos de controle de inundações

As etapas metodológicas adotam a seguinte lógica:

1. Avaliação da capacidade da drenagem existente.
2. Identificação dos locais críticos.
3. Definição das alternativas para controle (convencional X alternativa).
4. Estimativa de custo para implantação das alternativas.
5. Análise dos efeitos de diferentes cenários de urbanização sobre os projetos.
6. Comparação entre as alternativas.

4.4.1. Base de Dados

Os dados necessários ao estudo foram obtidos em parte do próprio Projeto Iguaçu e complementados com novos dados mais atuais, originados nas seguintes fontes:

- ✓ levantamentos aerofotogramétricos digitais de 1996/97 da Fundação CIDE nas escalas 1:2.000 e 1:10.000;
- ✓ levantamentos topobatimétricos realizados pela COPPETEC para confecção dos projetos de intervenções estruturais de macrodrenagem;
- ✓ fotografias dos locais passíveis de inundações e entrevistas com moradores da região realizadas em visitas in loco;
- ✓ imagens do satélite ASTER;
- ✓ imagens de satélite do software Google Earth.

4.4.2. Modelo de Células de Escoamento para Bacias Urbanas - MODCEL

Para a modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica de interesse será utilizado o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) ²¹, capaz de simular diferentes cenários hidrológicos e hidráulicos.

²¹ MODCEL - Modelo de Células de Escoamento para Cálculo de Cheias Urbanas em Planícies de Inundação – (MIGUEZ, 2001; MASCARENHAS e MIGUEZ, 2002; MASCARENHAS et al 2005)

O MODCEL pode ser descrito como:

um modelo de células urbanas, que integra processos hidrológicos, observado em cada célula, a um modelo hidrodinâmico em loop, em uma representação espacial que interliga fluxo superficial, em canais e em galerias subterrâneas. Por exemplo, ruas podem agir como canais, calçadas como vertedores, edificações, estacionamentos e quarteirões podem funcionar como reservatórios de acumulação. (MIGUEZ, 2009)

A seguir apresenta-se uma descrição sucinta da ferramenta baseada em Miguez (2001). Informações mais detalhadas podem ser encontradas em: Mascarenhas e Miguez (1994); Mascarenhas e Miguez (1998); Miguez e Mascarenhas (1999); Mascarenhas *et al.* (2000); Miguez (2003); Mascarenhas e Miguez (2002); COPPETEC (2003); Mascarenhas *et al.* (2005).

O MODCEL é aplicado para modelagem hidrodinâmica de bacias sujeitas a enchentes. Esse modelo parte do princípio que a bacia pode ser representada por compartimentos interligados, formando uma rede bidimensional. Esses compartimentos são chamados de células de escoamento; assim, a bacia é subdividida em diferentes células interligadas 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 unidimensionais, *id est*, equações de vertedor, de orifício, de Saint-Venant, e outras.

A representação da natureza pode ser feita através de células isoladas ou formando um conjunto, a fim de representar a complexidade dos possíveis caminhos das águas em uma inundação. Um conjunto resumido de tipos de células pode eventualmente já fornecer grande capacidade de representação, ao se pensar em suas possíveis associações. Porém, a definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, pode fazer grande diferença na tentativa de reproduzir a multiplicidade dos padrões de escoamento de um cenário urbano. Segundo Miguez (2001), as hipóteses de aplicação do modelo de células em bacias urbanas são:

1. A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento.
2. Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula é diretamente relacionado com o nível d'água no centro da célula.

3. Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior.
4. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas como, por exemplo, a Equação Dinâmica de Saint-Venant.
5. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
6. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
7. O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria.

O modelo de células de escoamento possui o seguinte conjunto tipo de células pré-definido:

- ✓ **de rio, ou canal**, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta;
- ✓ **de galeria**, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- ✓ **de planície**, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas;
- ✓ **de reservatório**, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluyente.

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:

$$A_{s_i} \frac{dz_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (3)$$

Onde:

$Q \rightarrow$ vazão entre as células i e k , vizinhas entre si;

$Z \rightarrow$ cota do nível d'água no centro da célula i ;

$A \rightarrow$ área superficial do espelho d'água na célula i ;

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

$t \rightarrow$ 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 (1), 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 são definidas pelo modelador 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-Bueiros
- ✓ 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 topográficas, aerofotogrametrias, imagens de satélite e visitas de campo, entre outras fontes de informações disponíveis. Com isso, faz-se a divisão da bacia em células de acordo com o padrão urbano e topográfico 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 4.2 são apresentadas as etapas da modelagem hipotética de uma área, desde a topografia até a divisão por grupos.

A esta etapa segue-se a confecção dos arquivos de entrada necessários, que compreendem os dados e parâmetros de cada célula da divisão, suas ligações e as condições de contorno necessárias para a modelagem, assim como a chuva de projeto ou um evento medido.

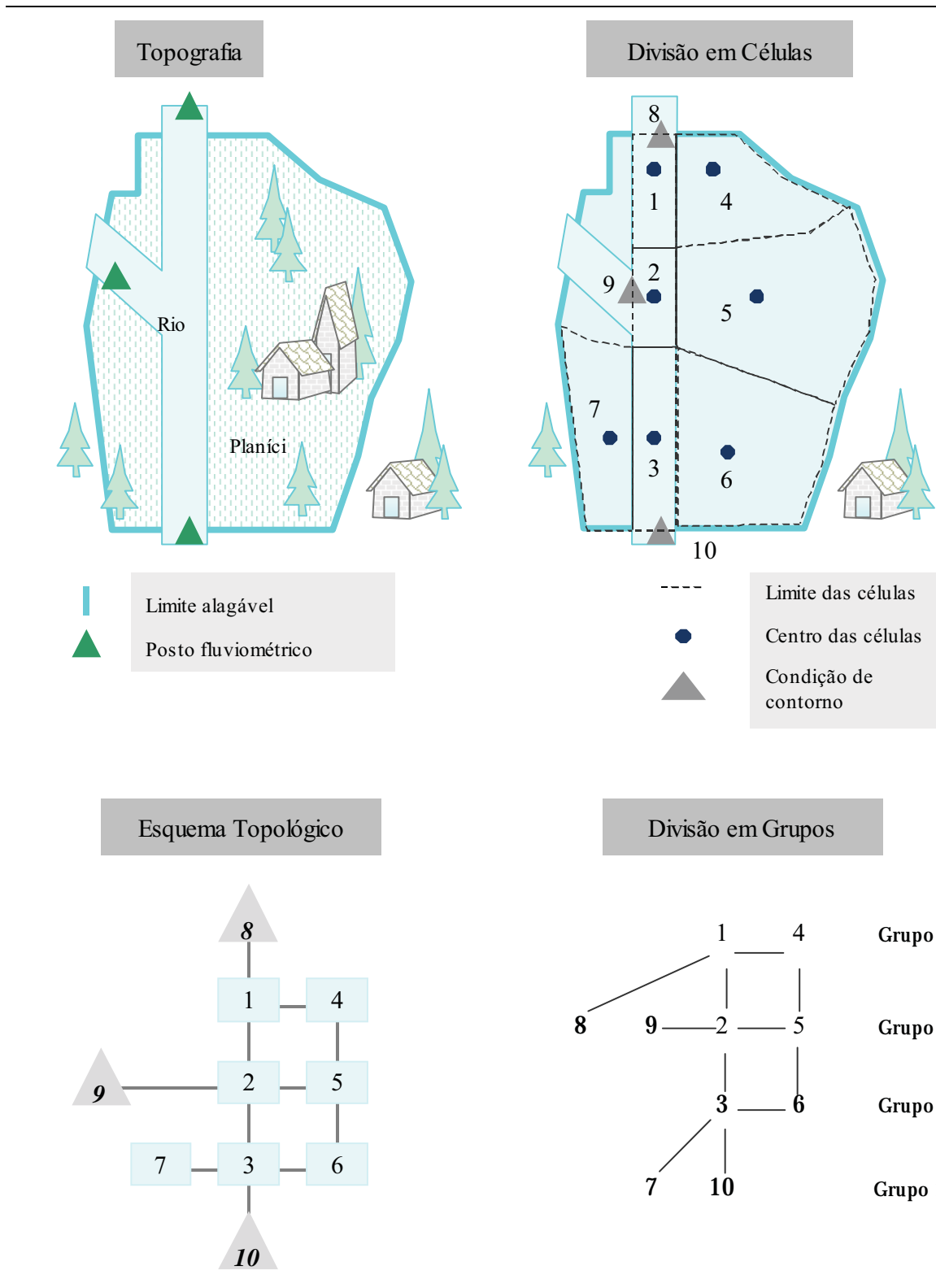


Figura 4.2 – Etapas de modelagem de uma região hipotética

5. Estudo de Caso – Bacia Hidrográfica do Rio Pilar / Calombé

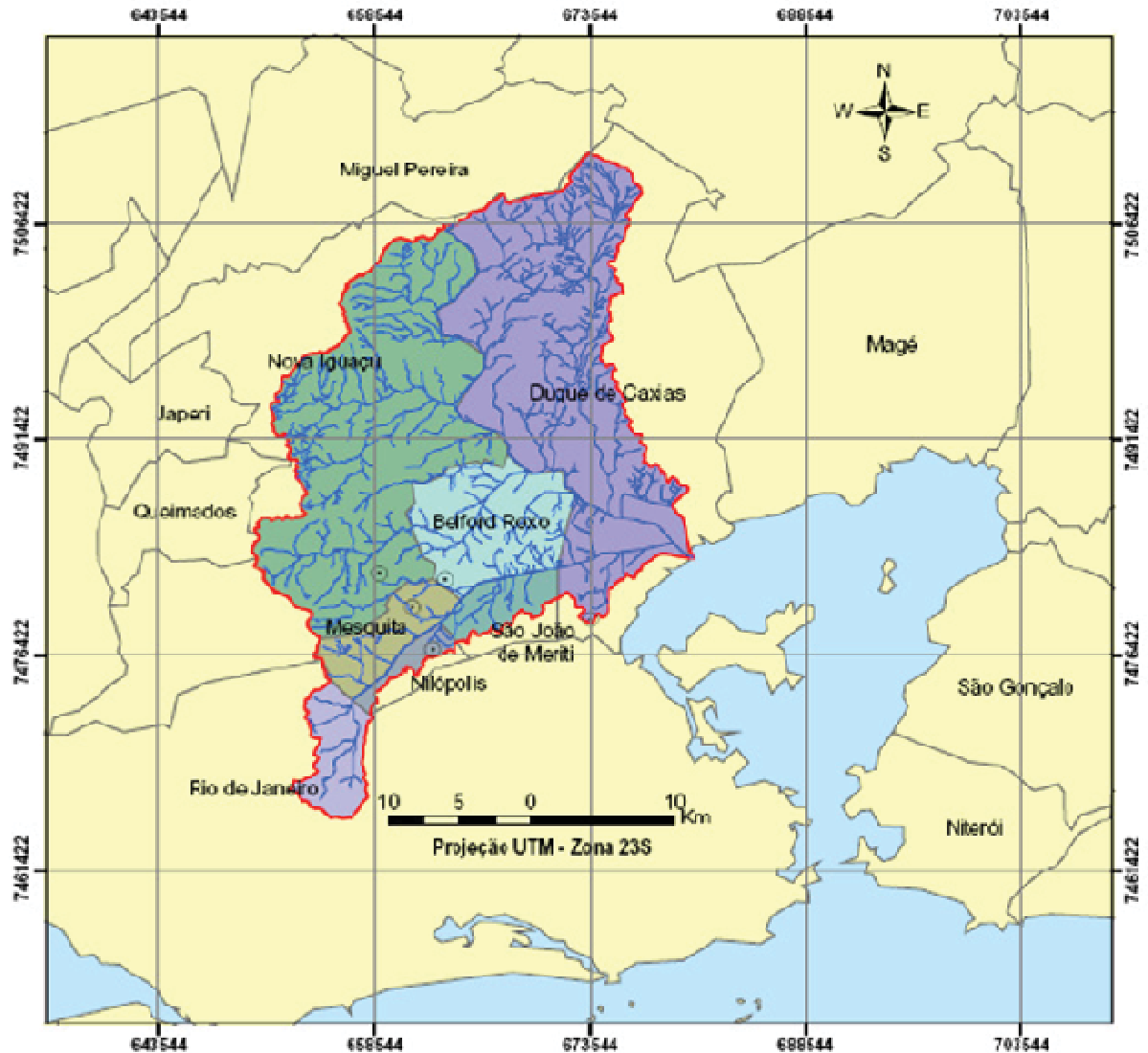
O município de Duque de Caxias está localizado na Baixada Fluminense, região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), que, além daquele, abrange também, os municípios de Magé, São João de Meriti, Belford Roxo, Nilópolis, Mesquita, Nova Iguaçu e os municípios de Queimados, Japeri, Paracambi, Seropédica e Itaguaí, sendo esses últimos localizados na bacia de Sepetiba.

Uma importante bacia hidrográfica está situada na Baixada Fluminense, a bacia do rio Iguaçu-Sarapuí. Esta bacia atinge 7 municípios, sendo 6 da Baixada Fluminense, que abrange parcelas de Duque de Caxias, São João de Meriti, Nilópolis e Nova Iguaçu, além da totalidade dos municípios de Belford Roxo e Mesquita e, ainda, uma parte da cidade do Rio de Janeiro, como ilustra a Figura 5.1.












O município de Duque de Caxias abrange a segunda maior parcela da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí, ocupando uma área de 27.359 ha, o que representa mais de 37% da área total da bacia, 72.683 ha. As parcelas da área de cada município inseridas na bacia do rio Iguaçu-Sarapuí estão apresentadas na Tabela 5.1.

A bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé é afluente do rio Iguaçu pela sua margem esquerda, em seu trecho final, aproximadamente 800 metros a montante da rodovia Washington Luiz (BR-040). Localiza-se no centro do território municipal de Duque de Caxias, a oeste da estrada BR-040, nas coordenadas 675000E e 7488000S. Na Figura 5.2 é possível observar a localização da bacia em estudo em relação à bacia hidrográfica do rio Iguaçu-Sarapuí.

Bacia Hidrográfica dos Rios Iguaçu - Sarapuí



MUNICÍPIO NA BACIA

	Belford Roxo		Sede Municipal na Bacia
	Duque de Caxias		Rios
	Mesquita		Estado do Rio de Janeiro
	Nilópolis		Limite da Bacia
	Nova Iguaçu		
	Rio de Janeiro		
	São João de Meriti		

FONTE:

Malha Municipal do Estado do Rio de Janeiro - IBGE, 2001
 Sistema de Informação de Recursos Hídricos, Bacia do Rio Iguaçu.
 Versão 1.0 - Laboratório de Hidrologia COPPE/UFRJ

Figura 5.1 – Bacia Hidrográfica do rio Iguaçu-Sarapuí (CARNEIRO, 2008).

Tabela 5.1 – Municípios da bacia hidrográfica do rio Iguaçu-Sarapuí (CARNEIRO, 2008)

Municípios	Área total (ha) ¹	Área na bacia (ha) ²	(%) *
Belford Roxo	7.350	7.328	10,08
Duque de Caxias	46.570	27.359	37,64
Nilópolis	1.920	1.042	1,43
Mesquita ³	3.477	3.477	4,78
Nova Iguaçu	53.183	27.894	38,38
Rio de Janeiro	126.420	3.290	4,53
São João de Meriti	3.490	2.293	3,16
Total	242.410	72.683	100,00

Fontes: (1) IBGE e (2) Projeto Iguaçu (3) Atualizado por Carneiro (2008).
 (*) percentual de cada município em relação à área da bacia

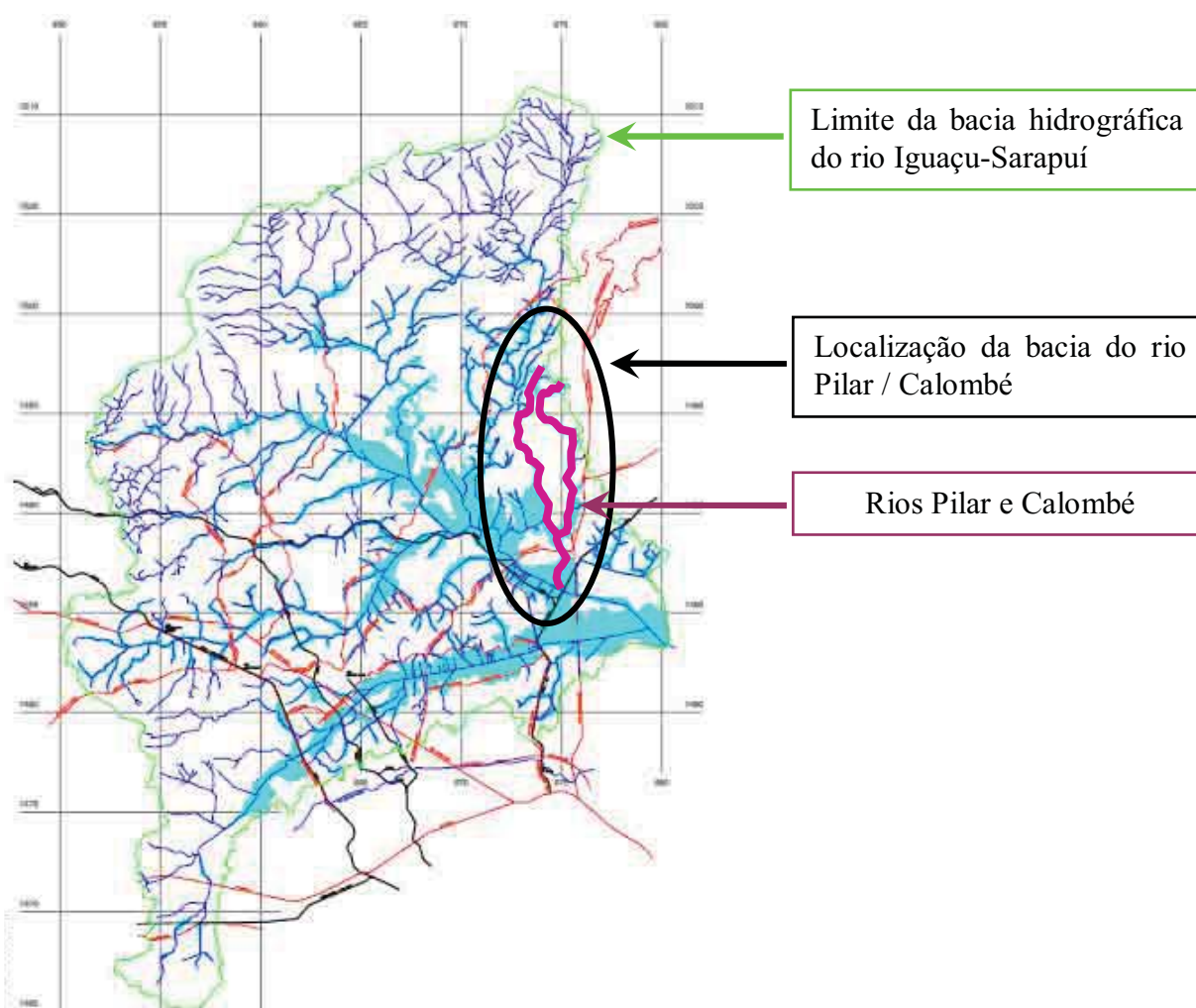


Figura 5.2 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pilar / Calombé dentro da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí (LABHID, 1996).

5.1. Caracterização da Bacia do Rio Pilar / Calombé

Neste estudo, estamos considerando a bacia hidrográfica do rio Pilar / Calombé com exutório logo a jusante da confluência dos rios Pilar e Calombé, uma vez que, a partir desta seção, o rio encontra-se confinado entre diques em ambas as margens, até desaguar no rio Iguaçu. A área drenada, considerada para o estudo, possui um total de 25,8 km², o que representa 81% da bacia total, com exutório no rio Iguaçu. A bacia em estudo é responsável por drenar cerca de 5,5% da área total do município de Duque de Caxias. Apesar de apresentar uma declividade bem suave, possui um desnível máximo de 110 metros.

A bacia possui dois importantes rios, o rio Pilar, com aproximadamente 11,3 km, responsável por drenar uma bacia com área superficial de 10,8 km², e o rio Calombé, com extensão aproximada de 9,3 km, drenando uma área com cerca de 15,0 km². Ambos drenam as águas no sentido Norte-Sul, unindo-se em uma seção 2,9 km ao norte da margem esquerda do rio Iguaçu.

O levantamento da situação atual do uso e ocupação do solo foi realizado a partir de imagens de satélite do sensor ASTER (**Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer**), a bordo do satélite Terra lançado em 1999. A metodologia utilizada foi baseada na construção do mapa de uso e ocupação do solo realizada por Carneiro (2008).

Porém, a área de estudo mais reduzida permitiu simplificar as classes definidas por Carneiro (2008), 12 no total, tornando o processo de modelagem mais rápido. Para isso, neste estudo, foram definidas 3 classes para ocupação urbana e mais 3 classes representativas da cobertura vegetal em áreas não ocupadas, totalizando 6 classes de uso e ocupação do solo. Essas classes estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Classificação do uso e ocupação do solo

Ocupação Urbana	Denso
	Médio
	Rarefeito
Cobertura Vegetal	Capoeira
	Campo antrópico
	Solo exposto

A partir dessa classificação e das imagens de satélite disponíveis foi construído um mapa de uso e ocupação do solo, permitindo uma análise espacial da concentração urbana da bacia.

Pela observação do mapa, apresentado na Figura 5.3, pode-se visualizar a forte concentração da densidade urbana na região leste da bacia, onde está localizado o complexo da REDUC (Refinaria de Duque de Caxias) e diversas outras indústrias.

No mapa de uso do solo também fica possível enxergar o nível de modificação antrópica na região, uma vez que não há vestígios significativos de vegetação natural na bacia. Toda a cobertura vegetal foi modificada, seja para uso como pastos ou loteamentos. Essa interferência traz profundos impactos para o controle de inundações, como discutido na revisão bibliográfica deste trabalho.

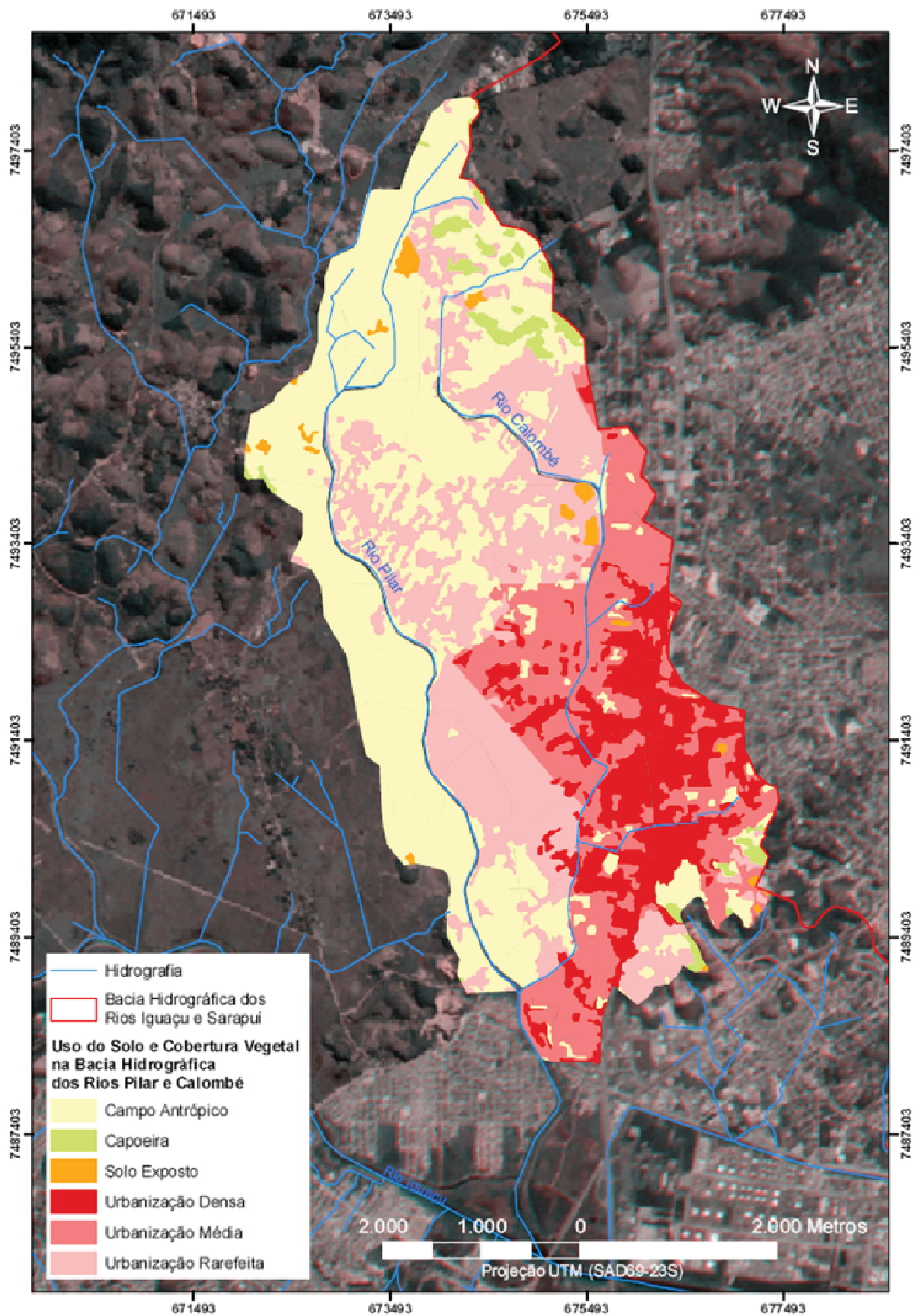


Figura 5.3 – Mapa de classificação do uso e ocupação do solo

5.2. Plano Diretor Urbanístico do Município de Duque de Caxias-RJ

O Plano Diretor Urbanístico (PDU) do município de Duque de Caxias, aprovado em 2006, define em seu artigo 3º que o plano deve “promover o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade e o uso socialmente justo e ecologicamente equilibrado do território, de forma a assegurar aos habitantes condições de bem estar e segurança”.

Em áreas sujeitas à ocorrência de eventos de inundações, um plano de drenagem e controle de inundações será imprescindível para alcançar os princípios fundamentais expostos em seu artigo 3º transcrito acima. Nessas áreas, a falta de investimentos em drenagem coloca a população em risco, aumenta a degradação dos corpos hídricos e desvaloriza espaços urbanos públicos e privados, evitando assim, o desenvolvimento de suas funções sociais.

Com isso, é evidenciada a grande importância da previsão de diretrizes para o setor de drenagem urbana e controle de inundações no Plano Diretor Urbano, assim como para outros setores, de acordo com o enunciado no artigo 4º do PDU de Duque de Caxias: “As políticas setoriais municipais serão executadas de forma integrada e complementar e obedecerão aos objetivos estratégicos e de planejamento físico-territorial do Plano Diretor”.

O inciso II do artigo 5º que define os objetivos gerais da lei, menciona a promoção da “(...) relação harmônica entre o meio ambiente natural e construído, o acesso a infra-estrutura social e urbana, a ordenação do parcelamento, a ocupação e uso do solo e a preservação do patrimônio ambiental (...)” como um desses objetivos. Aqui pode-se considerar o investimento em projetos de controle de inundações e de drenagem como dentro dos objetivos gerais da lei, uma vez que o controle de inundações será indispensável para a harmonização entre o meio ambiente natural e construído, e a rede de drenagem faz parte da infra-estrutura urbana.

No caso do município de Duque de Caxias, o PDU não dedica uma seção especial ao tema, estando este diluído pelo texto, sendo o tema Recursos Hídricos mencionado inicialmente no inciso VII do artigo 6º como um objetivo estratégico, com o seguinte texto:

Preservar e recuperar os ecossistemas naturais do Município, com a finalidade de promover padrões ambientais satisfatórios e sustentáveis, tendo em vista, no que couber, uma gestão ambiental compartilhada com os municípios vizinhos, em especial referida aos recursos hídricos.

No capítulo reservado à Política Ambiental, encontram-se diversas diretrizes em consonância com os interesses para o controle de inundações, sendo qualquer estratégia em direção à preservação dos ambientes naturais um grande ganho para o restabelecimento do ciclo hidrológico, garantindo assim, uma melhoria nos sistemas de drenagem, seja pela diminuição dos escoamentos superficiais, pelo aumento da infiltração ou pelo restabelecimento da mata ciliar dos corpos fluviais.

O artigo 7º estabelece diretrizes de vital importância para o sistema de drenagem, sendo destacadas os seguintes incisos:

I. Promover a eficiência de ações de defesa, preservação, fiscalização, recuperação e monitoramento do meio ambiente municipal, provendo recursos para sua implementação;

III. Integrar as estratégias e instrumentos de preservação e proteção dos recursos naturais ao ordenamento territorial e às estratégias do Plano Diretor;

IV. Articular gestões entre entes públicos e privados para recuperação dos passivos ambientais do Município, em especial aqueles que afetam os manguezais marginais à Baía de Guanabara e ao Rio Estrela, (...) a degradação dos recursos hídricos e respectivas orlas fluvial e marítima, o desmatamento de encostas e mata ciliar, a degradação de cotas de morros, a escarificação, desertificação e salinização de solos, (...);

V. Implantar Programa Municipal de **Arborização Urbana**, (...);

VI. Promover as condições ambientais das áreas acima da cota 50, restringindo a sua ocupação, fomentando o reflorestamento com leguminosas e gramíneas e a conservação de matas remanescentes;

VII. Estimular a criação de Unidades de Conservação Ambiental (UCA), (...);

VIII. Inserir a **Educação Ambiental** (...);

XII. **Desenvolver de forma integrada** com os órgãos municipais competentes de obras e infra-estrutura, de habitação e de ordenamento e controle urbano, **Programa de Ação Municipal para Recuperação de Recursos Hídricos**, contemplando adequado remanejamento de população ribeirinha em situação de risco, recuperação de mata ciliar e tratamento de efluentes;

Os trechos destacados em **itálico** nos incisos acima são diretamente relacionados à melhoria no controle de inundações, como já exposto. As iniciativas de preservação ambiental, por meio de recuperação de áreas degradadas, replantio de árvores, renaturalização de encostas e restrição de ocupação em cotas altas, trazem muitos benefícios ao balanço hídrico da região, uma vez que favorece os processos de infiltração, aumenta a evapotranspiração e dificulta processos erosivos, retardando e diminuindo o escoamento superficial que chega à rede de drenagem. Outro ponto a favor mencionado aqui é a preocupação com o “adequado remanejamento de população ribeirinha em situação de risco, recuperação de mata ciliar e tratamento de efluentes”, como parte de um programa para recuperação dos Recursos Hídricos, pois essa iniciativa melhora as condições de escoamento na calha principal dos rios, diminui o lançamento de resíduos sólidos nas águas e dificulta a erosão das margens.

O artigo 8º define como áreas de proteção permanente as faixas marginais dos cursos d’água em toda a sua extensão, com largura variável de acordo com suas dimensões. Os valores dessas larguras seguem a legislação federal.

Porém, como destacado por Carneiro (2008), existe aqui uma contradição, uma vez que no parágrafo único deste artigo, é considerada a previsão de vias urbanas marginais aos rios, as quais estariam instaladas dentro de áreas de proteção permanente, que é ainda reforçada no Capítulo V, dedicado à Política de Transportes, indicando a “abertura e urbanização de vias ao longo e em ambas as margens de rios e canais (...)” como uma ação no intuito de promover o desenvolvimento do sistema viário municipal.

Neste ponto, Tucci (2007) classifica a “integração urbana através da avenida de fundo de vale associada à canalização dos rios urbanos” como uma medida ambientalmente desastrosa, uma vez que a implantação dessas vias suprime a vegetação ciliar e restringe o escoamento do rio, além de violar a legislação eliminando as faixas marginais de proteção permanente.

Ainda neste capítulo sobre Meio Ambiente, no artigo 11 é definida uma área especial para fins ambientais, a ser prevista no plano de macrozoneamento. No texto da lei, essas áreas são definidas como:

Art. 11. Zonas Especiais de Interesse Ambiental – ZEIAs são instrumento fundamental de gestão territorial da política ambiental municipal, devendo ser implementadas ações necessárias ao seu manejo ambiental, à sua consolidação e conservação, conforme dispostas no Capítulo de Macro-Zoneamento e Anexos desta Lei;

No artigo 16, sobre a Política de Habitação, é novamente mencionada a necessidade do remanejamento de habitações em área de risco, definindo como áreas de risco as faixas marginais de proteção de águas superficiais e áreas que ofereçam riscos à segurança individual e coletiva, mencionando as áreas sujeitas a alagamentos e inundações.

A abordagem mais completa sobre o sistema de drenagem urbana, feita pelo PDU de Duque de Caxias, está no Capítulo IV, sobre a Política de Obras e de Infra-estrutura Urbana, sendo ainda muito tímida. Além de estabelecer a necessidade de articulação entre os setores de infraestrutura e também com o setor de planejamento territorial, institui em seu artigo 21, a busca pelas seguintes ações:

- ✓ Promover soluções naturais de drenagem urbana, ampliando as condições de infiltração das águas pluviais no solo;
- ✓ Recadastrar a rede de drenagem, para apoio ao planejamento e à manutenção das instalações existentes;
- ✓ Elaborar e Implementar o Plano Diretor de Macrodrenagem Urbana Municipal, integrado ao Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara (não faz nenhuma menção ao Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Iguaçu-Sarapuí);
- ✓ Promover o planejamento, o desenvolvimento e a manutenção da rede de micro-drenagem urbana, de forma integrada às diretrizes do Plano Diretor de Macrodrenagem referido na alínea anterior.
- ✓ Promover a proteção de canais e valões de drenagem pluvial que atravessam áreas urbanas consolidadas e de expansão urbana, através de sua urbanização, em especial o Caboclos, Calombé e Capivari, dispondo-os no eixo central de novas avenidas com ciclovia.

Carneiro (2008) realizou uma leitura crítica de todos os Planos Diretores dos municípios que compõem a bacia hidrográfica dos rios Iguaçu-Sarapuí, no intuito de avaliar o grau de adequação desses planos ao controle de inundações urbanas. Após uma discussão acerca das diretrizes dos planos separadamente, o autor sistematiza a análise por meio da definição de atributos que permitiram uma comparação entre os planos. Foram definidos 11 atributos no total e para cada atributo foi dada uma nota de acordo com o critério de satisfação encontrado

no plano. A Tabela 5.3 apresenta esses atributos e o peso considerado para composição da nota. O peso segue uma escala de 1 a 5, proporcional a importância para o controle de inundações urbanas.

Tabela 5.3 – Atributos do Plano Diretor Urbano (CARNEIRO, 2008)

Atributos	Peso
Definição de metas e prazos	3
Auto-aplicabilidade	2
Controle do processo de expansão urbana	4
Adensamento dos vazios urbanos	1
Zoneamento do território	4
Abordagem sistêmica dos fenômenos físicos e ambientais	3
Identificação de riscos de inundação	5
Medidas voltadas para o controle de inundações	5
Regularização fundiária e legalização do uso do solo	3
Regulamentação dos instrumentos previstos no Estatuto da Cidade	4
Cooperação regional e intermunicipal	4

As notas definidas por Carneiro (2008) seguiram o critério de atendimento a cada atributo, segundo uma escala de três qualidades: **Ausente**, **Parcial** ou **Integral**. Para cada qualidade foram definidas notas variando de 0 a 2, como apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Notas definidas de acordo com o atendimento de cada atributo

Atributos	Ausente	0
	Parcial	0,5; 1 ou 1,5
	Integral	2

A composição da nota final é obtida pela multiplicação da nota de cada atributo pelo seu respectivo peso, e posteriormente somam-se as notas de todos os atributos, dividindo o valor final pela pontuação máxima total, 76 pontos. Assim, a nota final de cada plano diretor terá um valor entre 0 e 1, facilitando a comparação. Quanto maior o valor, ou seja, quanto mais próximo de 1, mais adequado ao controle de inundações estará o Plano Diretor Urbano.

Carneiro (2008) não encontrou um resultado positivo para o controle de inundações urbanas na Baixada Fluminense, uma vez que apenas 3 municípios alcançaram uma pontuação acima de 0,5, indicando a necessidade de adequação desses planos à realidade da bacia, que sofre cronicamente com problemas de inundações.

No caso do município de Duque de Caxias, essa constatação é ainda mais alarmante, pois seu Plano Diretor ocupa a última posição no ranking elaborado naquele estudo, totalizando uma pontuação igual a 0,32. Esse quadro adverte para a necessidade urgente da adoção de políticas apontadas para a busca de ações e estratégias voltadas para o planejamento do controle das inundações.

As notas atribuídas ao Plano Diretor do município de Duque de Caxias mostram uma deficiência muito grande no que tange assuntos importantes para o controle de inundações, como pode-se observar na Tabela 5.5. Pontos de grande sensibilidade quanto aos processos de inundações, como o controle da expansão urbana e a identificação de áreas de risco, receberam nota nula (valor igual a 0) na avaliação.

Tabela 5.5 – Pontuação do Plano Diretor de Duque de Caxias (CARNEIRO, 2008)

Atributos	Nota
Definição de metas e prazos	0
Auto-aplicabilidade	3
Controle do processo de expansão urbana	0
Adensamento dos vazios urbanos	2
Zoneamento do território	6
Abordagem sistêmica dos fenômenos físicos e ambientais	1,5
Identificação de riscos de inundação	0
Controle ambiental voltado para o controle de inundações	2,5
Regularização fundiária e legalização do uso do solo	1,5
Regulamentação dos instrumentos previstos no Estatuto da Cidade	6
Cooperação regional e intermunicipal	2
Pontuação	0,32

De acordo com a sua análise, Carneiro (2008) aponta algumas necessidades e fragilidades encontradas nos planos:

- ✓ “(...) ausência de planejamento em bases regionais (...)”;
- ✓ “(...) diretrizes contidas nos planos são ainda muito genéricas e não revelam interações com o planejamento de setores estratégicos para o controle e gerenciamento de inundações (...)”;
- ✓ Necessidade de “(...) melhoramento técnico da gestão municipal capacitando-a a agir com mais eficiência e rigor no cumprimento das normas de ordenamento do uso do solo”;
- ✓ “(...) necessidade da criação de estruturas cooperativas, não apenas entre os vários municípios de uma mesma área metropolitana, mas também entre estes municípios e o Estado”.

Na Figura 5.4 está apresentada a superposição do zoneamento urbano do município com a bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé. Pela análise do zoneamento fica possível prever algumas conseqüências negativas para o controle das inundações na bacia. Uma delas é a total falta de previsão de áreas de várzea para extravasamento natural dos rios, reservando as áreas mais baixas para instalações industriais, que tendem a fazer uso de altas taxas de impermeabilização em sua propriedade. A área prevista para adensamento industrial (Zona Especial de Negócios - ZEN) é justamente a área com maior vulnerabilidade às inundações, possuindo cotas muito baixas.

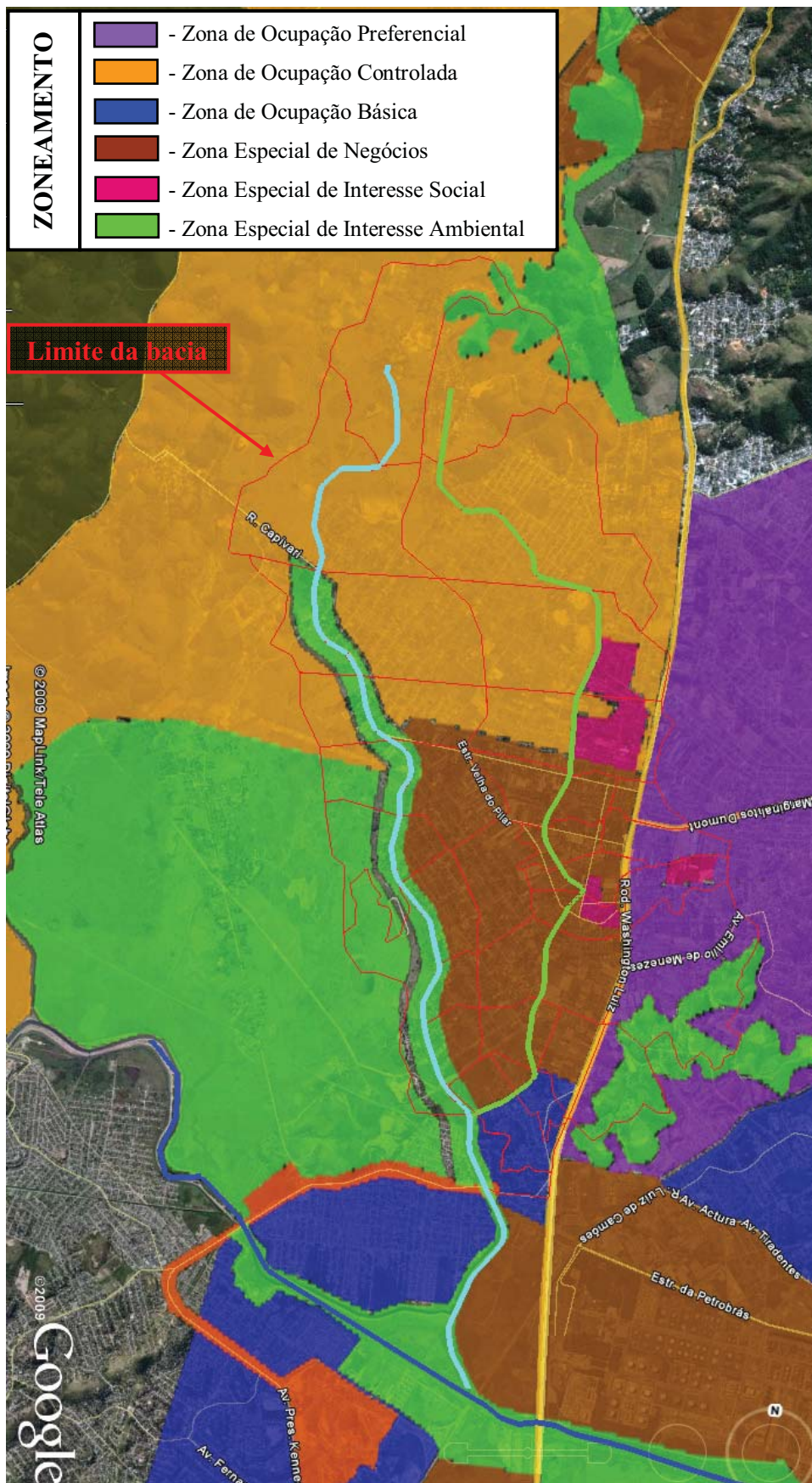


Figura 5.4 – Interferência do Zoneamento Urbano do Município de Duque de Caxias sobre a bacia do rio Pilar/Calombé

5.3. Aplicação do Modelo Hidrodinâmico

Neste item são descritos os passos necessários para realização da modelagem hidrodinâmica da bacia com uso do Modelo de Células de Escoamento.

5.3.1. Levantamento de Dados

As informações básicas necessárias para a modelagem matemática da bacia são os dados topográficos, hidrológicos e de uso e ocupação do solo. As principais fontes de informação para levantamento desses dados foram:

- ✓ levantamentos aerofotogramétricos digitais de 1996/97 da Fundação CIDE nas escalas 1:2.000 e 1:10.000;
- ✓ levantamentos topobatimétricos realizados pela COPPE para confecção dos projetos de intervenções estruturais de macrodrenagem;
- ✓ visitas **in loco**;
- ✓ imagens do satélite **Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer** – ASTER;
- ✓ imagens de satélite do **software Google Earth**.

5.3.2. Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos foram realizados no intuito de se construir chuvas de projeto para os diversos cenários definidos neste trabalho. Para isso, foram utilizados como referência, estudos pregressos realizados para essa região, esses estudos foram:

- ✓ LABHID (1995) – “**Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguçu/Sarapuí**”. Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente, COPPE/UFRJ
- ✓ Luiz Paulo Canedo de Magalhães (2007) – “**Estudo Hidrodinâmico do Rio Calombé para a Avaliação de Manchas de Inundação**”. AQUAMODELO Consultoria e Engenharia LTDA.

Para a obtenção das chuvas de projeto foi utilizado o estudo de chuvas intensas para as bacias dos rios Iguaçu e Sarapuí, realizado pelo laboratório de Hidrologia da COPPE / UFRJ, “**Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí**”, em novembro de 1994.

Foram utilizados neste estudo os postos pluviográficos de Nova Iguaçu e de Xerém, e os postos pluviométricos de Bangu e de São Bento. Estes postos foram escolhidos por representarem as características das chuvas intensas na região e por possuírem histórico adequado para o estabelecimento das equações de chuvas intensas. A influência que cada posto exerce sobre a bacia do rio Pilar / Calombé, estabelecida para a bacia do rio Pilar no estudo hidrológico do Projeto Iguaçu, está apresentada na Tabela 5.6. A localização destes postos é apresentada na Figura 5.5.

Tabela 5.6 – Coeficientes de ponderação dos postos utilizados no estudo

Bacia	Área (km²)	Pesos (%)			
		São Bento	Nova Iguaçu	Xerém	Bangu
Rio Pilar	27.18	0.582	0.134	0.240	0.044

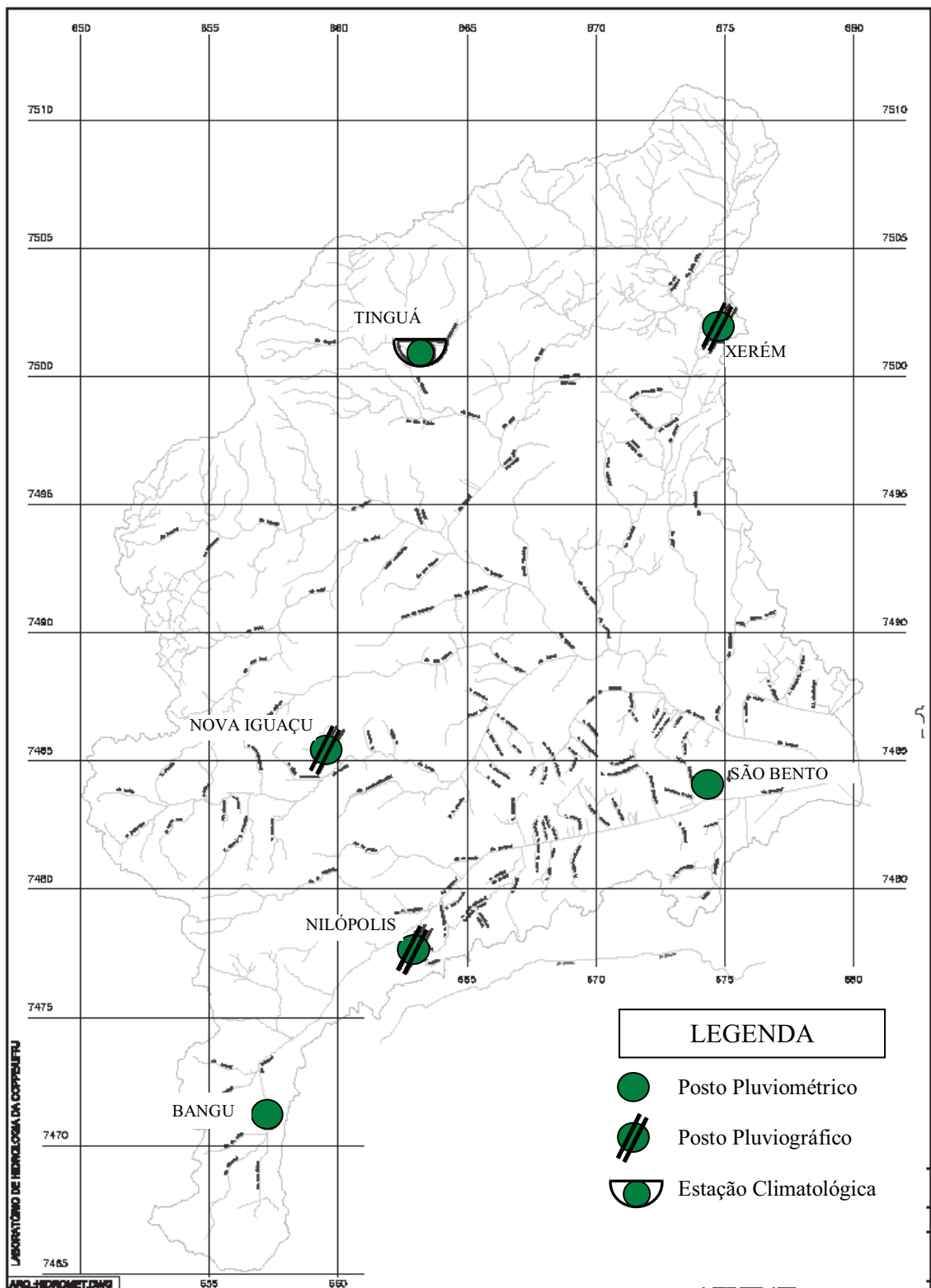


Figura 5.5 – Localização dos postos pluviográficos e pluviométricos utilizados para o estudo hidrológico (LABHID, 1996)

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam relações precipitação-duração-frequência para as chuvas intensas de Bangu e de São Bento para tempos de duração de 1 h a 1 dia e tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Duração (horas)	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
1	64,2	73,0	80,6	93,4	101,7
2	78,5	90,5	101,3	117,6	128,8
3	86,9	100,7	113,3	131,7	144,6
4	92,9	107,9	121,9	141,7	155,8
5	97,5	113,6	128,5	149,5	164,5
6	101,3	118,1	134,0	155,8	171,6
7	104,5	122,0	138,5	161,2	177,6
8	107,2	125,4	142,5	165,9	182,8
9	109,7	128,4	146,0	170,0	187,4
10	111,8	131,0	149,2	173,6	191,5
11	113,8	133,4	152,0	176,9	195,2
12	115,6	135,6	154,6	180,0	198,6
13	117,3	137,6	157,0	182,8	201,7
14	118,8	139,5	159,2	185,3	204,6
15	120,2	141,2	161,2	187,7	207,3
24 horas	129,9	153,1	175,3	204,0	225,6
1 dia	118,09	139,14	159,34	185,48	205,07

Figura 5.6 - Estação pluviométrica de Bangu (LABHID, 1996)

Duração (horas)	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
1	65,7	74,4	81,9	94,7	102,9
2	80,4	92,2	102,9	119,2	130,3
3	89,0	102,6	115,2	133,5	146,3
4	95,1	110,0	123,9	143,6	157,6
5	99,8	115,7	130,6	151,5	166,4
6	103,6	120,4	136,1	157,9	173,6
7	106,9	124,4	140,8	163,4	179,7
8	109,7	127,8	144,8	168,1	185,0
9	112,2	130,8	148,4	172,2	189,6
10	114,5	133,5	151,6	175,9	193,8
11	116,5	136,0	154,5	179,3	197,5
12	118,3	138,2	157,1	182,4	200,9
13	120,0	140,3	159,5	185,2	204,1
14	121,6	142,2	161,8	187,8	207,0
15	123,1	144,0	163,8	190,3	209,8
24 horas	132,9	156,0	178,1	206,8	228,2
1 dia	120,86	141,83	161,93	187,96	207,47

Figura 5.7 - Estação pluviométrica de São Bento (LABHID, 1996)

As equações de chuvas intensas de Nova Iguaçu e de Xerém foram estabelecidas associando-se a intensidade da chuva à sua duração, para cada tempo de recorrência. Desta forma, foram ajustadas equações do tipo:

$$i = \frac{A}{(t + t_0)^b} \quad (4)$$

Onde:

i – intensidade, em mm/h;

t – duração da precipitação, em min;

A , t_0 e b – parâmetros ajustados para cada tempo de recorrência.

A Figura 5.8 e a Figura 5.9 apresentam os parâmetros das equações de chuvas intensas de Nova Iguaçu e de Xerém para os tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Parâmetros	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
A	1257	1348	1422	1521	1605
b	0,7633	0,7544	0,7488	0,7347	0,7299
t_0	6	6	6	6	6

Figura 5.8 – Parâmetros da equação de chuvas intensas para a estação de Nova Iguaçu (LABHID, 1996)

Parâmetros	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
A	1059	1047	1043	1058	1078
b	0,6754	0,6464	0,6232	0,6006	0,5873
t_0	14	14	14	14	14

Figura 5.9 – Parâmetros da equação de chuvas intensas para a estação de Xerém (LABHID, 1996)

A partir desses parâmetros foram calculadas chuvas para diferentes tempos de recorrência, com duração igual ao tempo de concentração da bacia do Pilar/Calombé ($t_c = 2,50$ h). A chuva de projeto assume como hipótese uma distribuição constante no tempo e uniforme no espaço. Na Tabela 5.7 estão apresentados os valores absolutos da lâmina de chuva em milímetros precipitada em cada evento, com tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Tabela 5.7 – Chuvas de projeto para a bacia do rio Pilar/Calombé com 2,5 h de duração

Tempo de Recorrência (anos)	5	10	20	50	100
Precipitação máxima (mm)	82.4	94.5	105.5	121.6	132.8

5.3.3. Modelagem Topográfica, Hidráulica e Topológica

Neste estudo, são utilizadas células de escoamento para discretização espacial da bacia hidrográfica. A partir desta escolha, são seguidos três passos para montagem do modelo matemático: **modelagem topográfica; hidráulica; e topológica.**

A **modelagem topográfica** representa a disposição do terreno quanto às suas variações espaciais, verticais e horizontais. Para esta etapa são necessários levantamentos topográficos em campo ou aerofotogrametrias. Com isso, é montado o mapa topográfico da região, com curvas de nível e cotas em diversos pontos. Neste caso, foram utilizados levantamentos aerofotogramétricos realizados pela Fundação CIDE e, ainda, levantamentos topobatimétricos complementares realizados pela COPPE para o Projeto Iguaçu.

Com essas informações, a bacia foi subdividida em células de escoamento, de forma a permitir a construção de uma rede de células ligadas entre si que possa representar os diversos caminhos do escoamento superficial. Para a **modelagem hidráulica**, estas células são analisadas no intuito de se definirem leis hidráulicas representativas das comunicações com suas células vizinhas, capazes de simular os padrões de escoamento que ocorrem entre células.

Para aplicação do modelo matemático, é construído então, um esquema topológico, que integra a rede de células, a fim de configurar todas as interações entre as células e suas posições relativas, assim como as condições de contorno necessárias ao processo de modelagem. Essa etapa é definida como **modelagem topológica.**

Desta etapa, resultaram 101 células de superfície, sendo 34 células representando os rios e mais 67 células representando as planícies e as encostas. Essa divisão pode ser observada na Figura 5.10, e o esquema topológico construído para o modelo está apresentado na Figura 5.11.

A Figura 5.12 apresenta uma imagem de satélite retirada do **software Google Earth**, na qual foi sobreposta a divisão de células aplicada à bacia. Nessa imagem fica possível observar os diferentes tipos de uso e cobertura do solo da região, que apresenta uma forte concentração da urbanização nas margens da rodovia Washington Luiz (BR-040), apresentando extensas áreas com ocupação ainda incipiente na parte oeste da bacia, nas áreas que drenam para o rio Pilar.

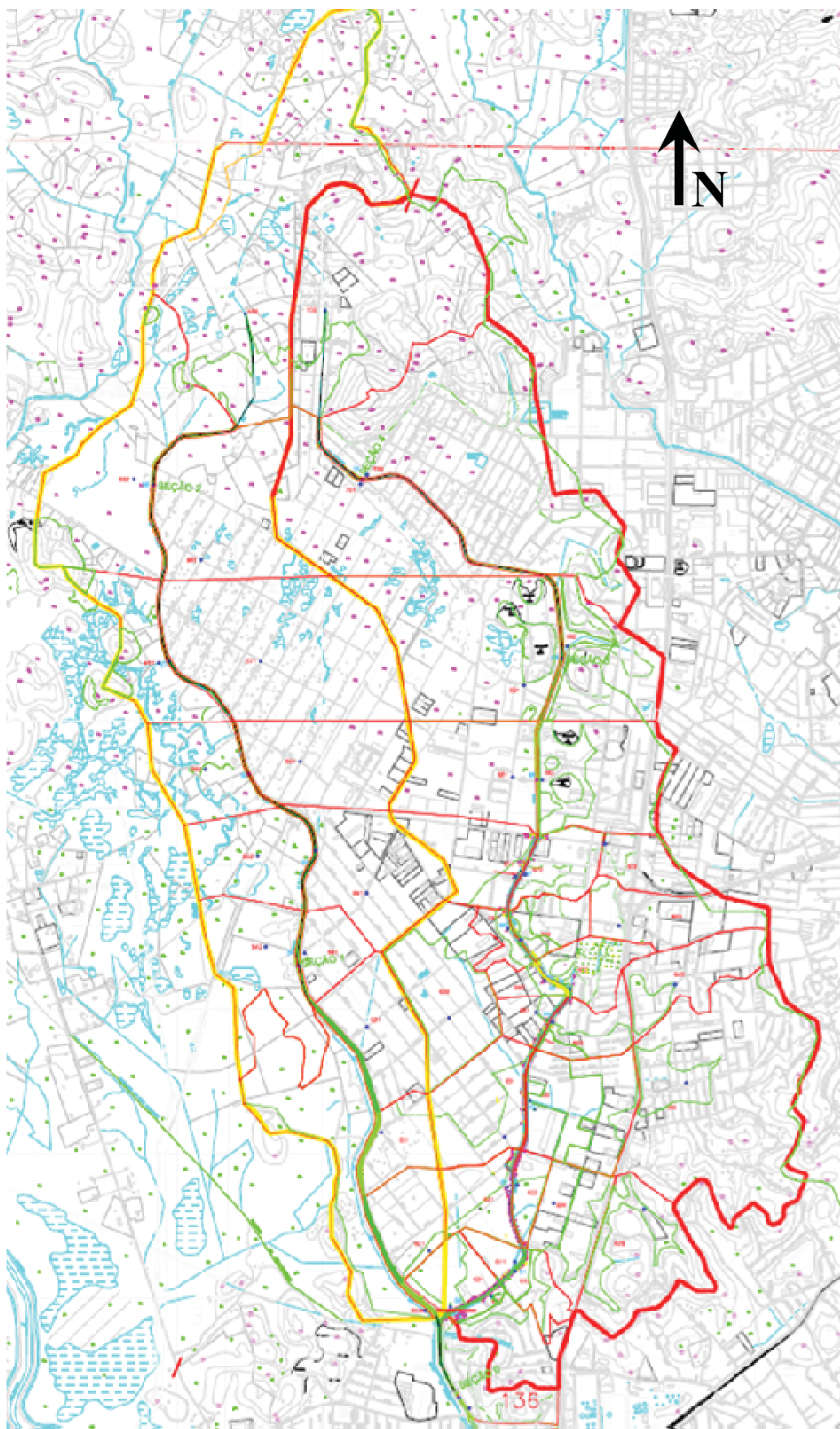


Figura 5.10 – Divisão da bacia do rio Pilar/Calombé em células de escoamento de acordo com a topografia e o traçado da urbanização na região

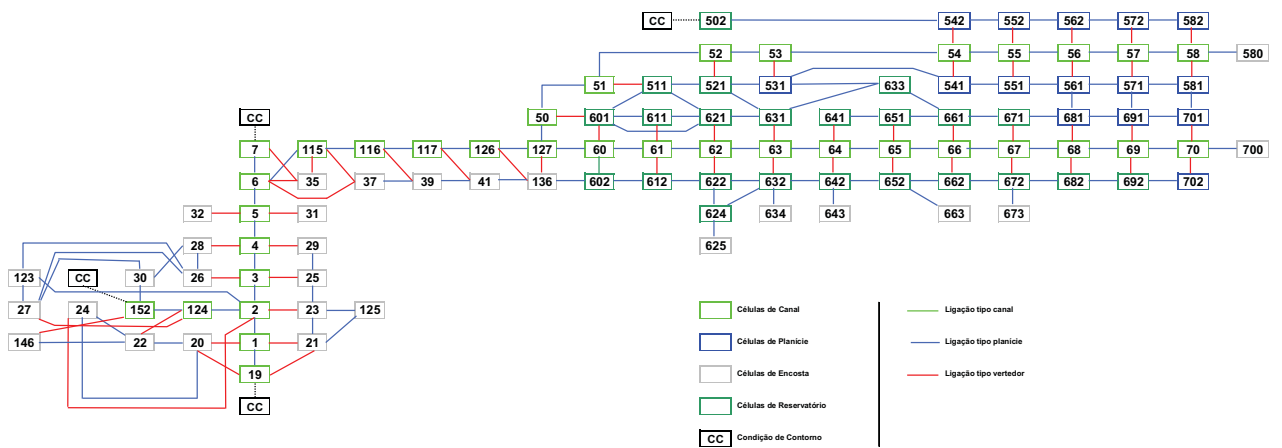


Figura 5.11 – Esquema topológico da divisão de células

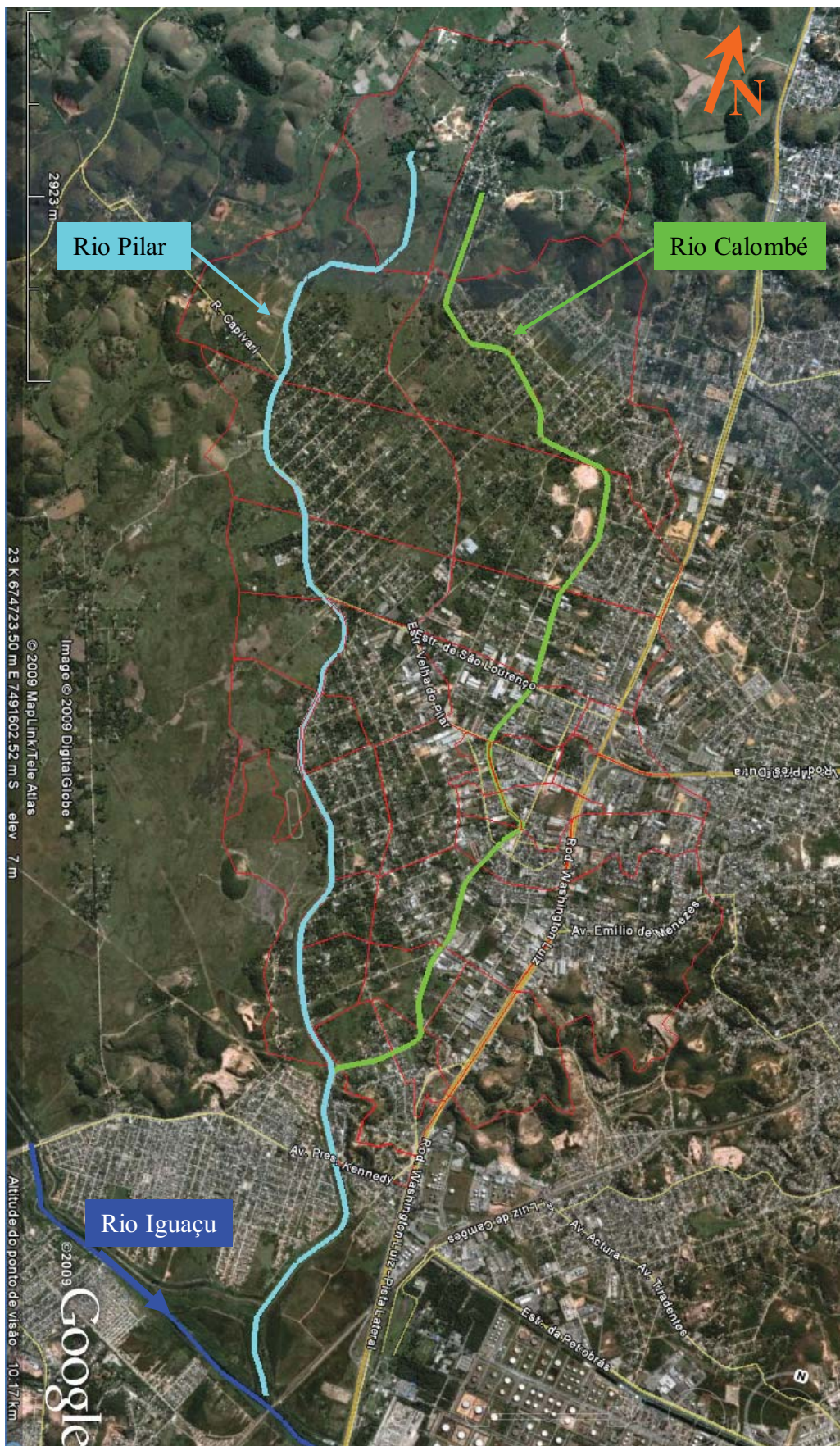


Figura 5.12 – Células de superfície sobrepostas a imagem de satélite (Google Earth)

5.3.4. Entrada de Dados

Para a entrada de dados no modelo matemático são construídos diversos arquivos contendo todas as informações necessárias para a modelagem. Essa etapa é extremamente trabalhosa e demanda grande tempo e atenção para sua construção.

Os arquivos necessários para a modelagem são:

1. **Arquivo de condições iniciais** → apresenta os dados iniciais necessários para a simulação, como o intervalo de tempo de simulação e suas subdivisões, o número de células, as características da urbanização, o esquema topológico das células, suas cotas de terreno e de nível d'água inicial e também as células em que se deseja obter os resultados de nível d'água e vazão.
2. **Arquivo de base de dados** → define as informações das células retiradas da discretização topográfica e hidráulica da bacia hidrográfica. Apresenta todos os parâmetros de cada célula, como tipo de célula, área em planta e coeficiente de escoamento superficial, e define suas ligações com as vizinhas, tipo de ligação e coeficientes necessários para cada tipo.
3. **Arquivos de condições de contorno** → podem ser introduzidas de três maneiras distintas: **1** - nível d'água em função do tempo $[Z(t)]$; **2** - vazão em função do tempo $[Q(t)]$; **3** - relação entre vazão e nível d'água $[Q(Z)]$. Podem ser introduzidas em diversos locais para uma mesma bacia, permitindo a simulação de condições de contorno de jusante, como curva de maré (**1**), vazões de base, vazões efluentes de reservatórios ou vazões de trechos mais a montante da bacia, não representados por células, (**2**) e inserção de curvas-chave para qualquer ponto da bacia (**3**).
4. **Arquivo de precipitações** → as chuvas utilizadas no modelo podem ser definidas através de precipitações medidas ou de projeto para determinados tempos de recorrência, de acordo com escolha do modelador. A entrada de dados se dá pela criação de um arquivo com os valores de lâmina de água precipitada para cada intervalo de tempo da simulação em cada linha. Esse arquivo estará associado a cada célula da discretização, possibilitando a distribuição espacial da chuva através da criação de diversos arquivos de precipitação para células em regiões distintas.

As condições de contorno utilizadas na modelagem do estudo de caso referem-se à variação do nível d'água na foz do rio Iguaçu, na baía de Guanabara, que representa a curva de maré, e às vazões de cheia dos rios Iguaçu e Sarapuí nas seções limites da área modelada. O local de entrada e o tipo dessas condições de contorno estão destacados na Figura 5.13.

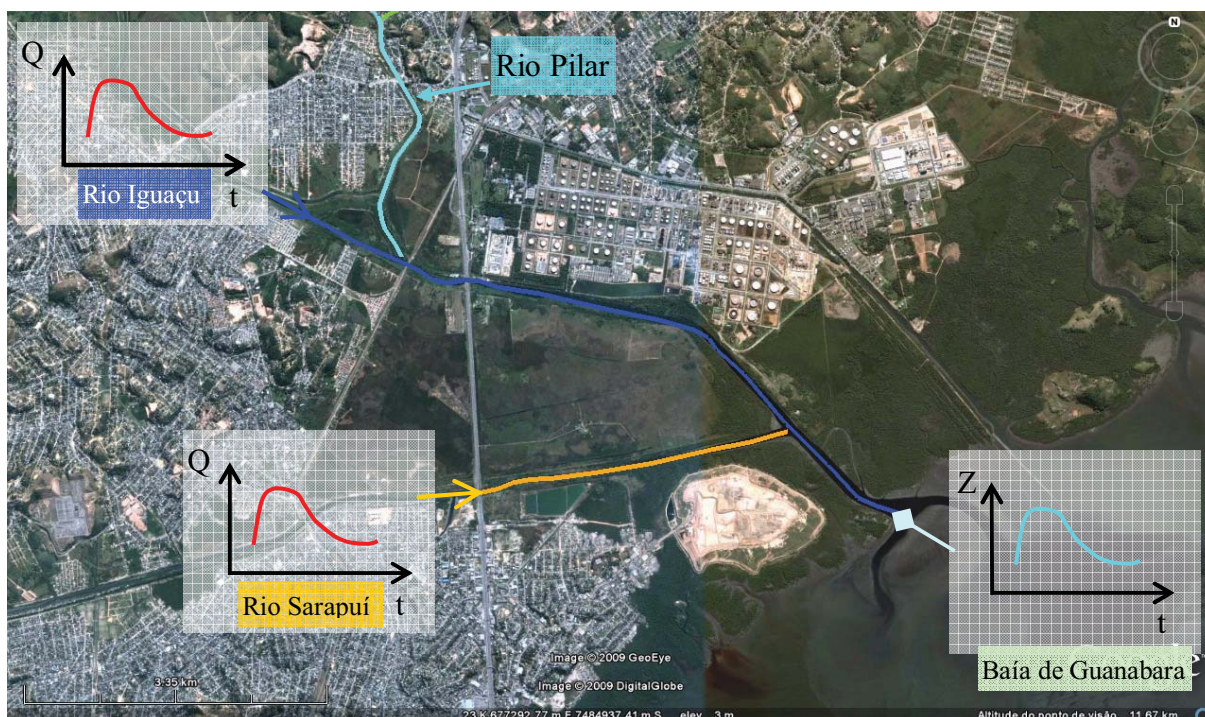


Figura 5.13 – Trechos dos rios Iguaçu e Sarapuí modelados e suas condições de contorno

A curva de maré, apresentada na Figura 5.14, foi construída com base no estudo realizado pela COPPETEC para a modelagem hidrodinâmica do rio Sarapuí, na revisão do Projeto Iguaçu (COPPETEC, 2009).

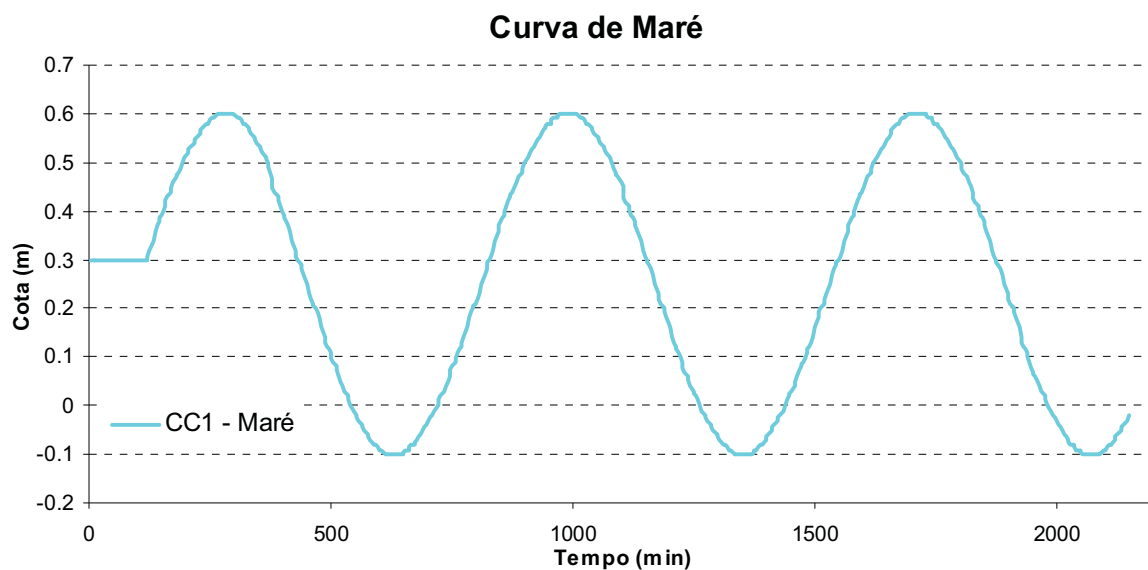


Figura 5.14 – Variação do nível d'água na baía de Guanabara devido à maré

Os hidrogramas de cheia dos rios Iguazu e Sarapuí foram retiradas neste mesmo estudo (COPPETEC, 2009), para um evento de cheia de tempo de recorrência de 20 anos. Os hidrogramas desses rios para entrada no modelo hidrodinâmico podem ser vistos na Figura 5.15 e na Figura 5.16.

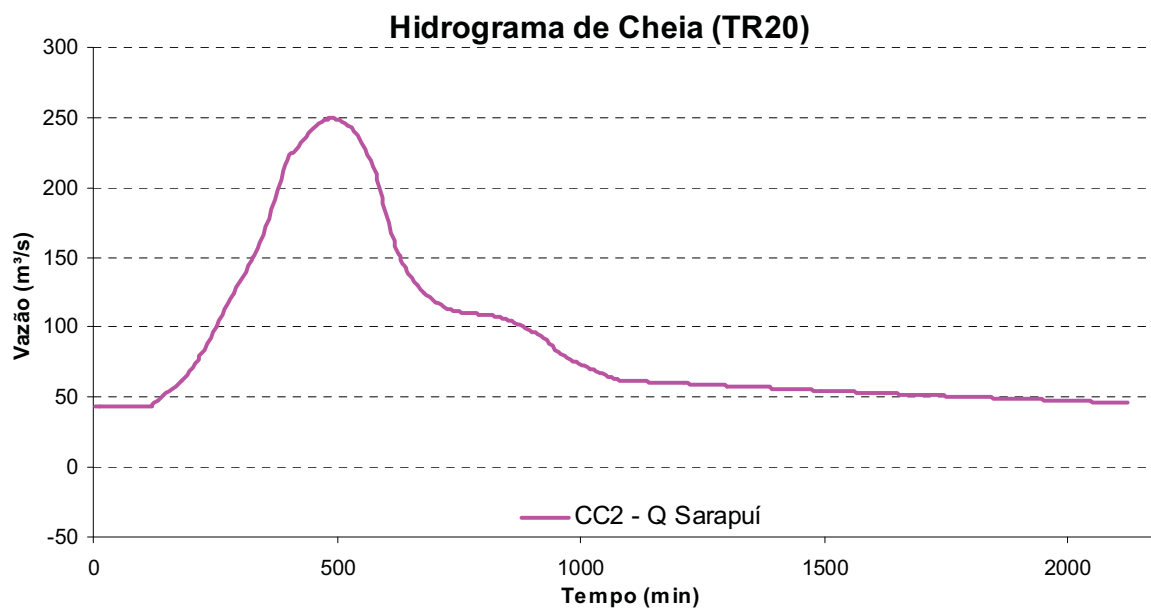


Figura 5.15 – Hidrograma do rio Sarapuí para entrada no modelo hidrodinâmico

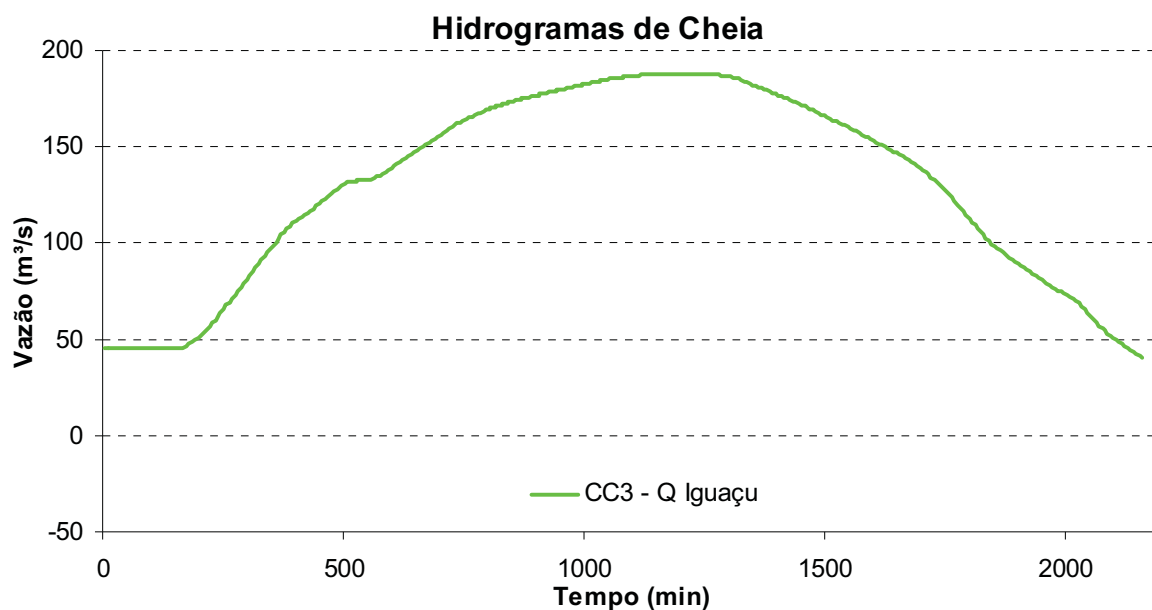


Figura 5.16 – Hidrograma do rio Iguaçu para entrada no modelo hidrodinâmico

5.3.5. Processo de Calibração

O processo de calibração e validação do modelo busca reproduzir eventos medidos, de modo a ajustar o comportamento do modelo às particularidades da bacia em estudo e verificar a validade do ajuste feito na representação de um outro evento.

No Brasil são raros dados hidrológicos medidos de forma sistemática, e esta é a situação encontrada na Baixada Fluminense. Por isso, a calibração do modelo foi feita com base nos estudos hidrodinâmicos encontradas no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí (Relatório IG-RE-009-R1), a fim de reproduzir resultados aproximados ao desse estudo.

O gráfico da Figura 5.17 apresenta o perfil de nível d'água no trecho final do rio Iguaçu resultante da modelagem da bacia do rio Pilar/Calombé em comparação com o perfil apresentado no estudo do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí. Neste gráfico é possível avaliar o resultado como satisfatório.

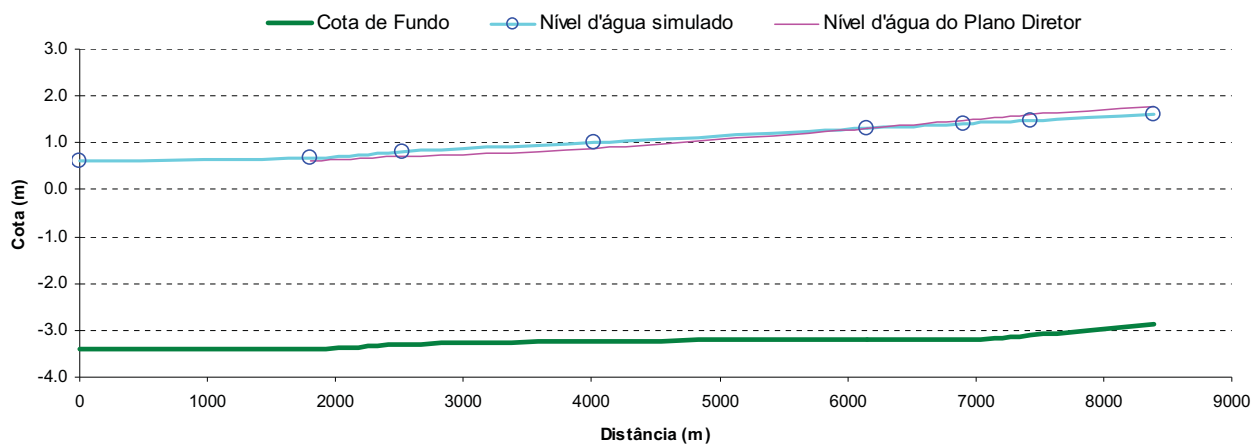


Figura 5.17 – Nível d'água do trecho final do rio Iguaçu a partir da foz na Baía de Guanabara

5.3.6. Diagnóstico da capacidade atual do sistema de macrodrenagem

Nesta etapa são simulados diversos eventos de precipitação com diferentes tempos de recorrência no intuito de se avaliar a capacidade de resposta do sistema de macrodrenagem aos eventos pré-estabelecidos.

A finalidade deste diagnóstico é construir manchas de inundação para cada um desses eventos a fim de se levantar os prejuízos potenciais causados pelas inundações na bacia.

A simulação das condições atuais foi realizada com base nos levantamentos de campo e aerofotogrametrias disponíveis para o estudo, assim como visitas a campo e observação de imagens de satélite, que permitiram a classificação atual do uso e ocupação do solo, de acordo com a metodologia apresentada no item 5.1 na página nº 86.

Os valores dos coeficientes de escoamento adotados neste estudo foram definidos com base nos valores utilizados pela Prefeitura de São Paulo apresentados na Tabela 5.8 (WILKEN, 1978).

Tabela 5.8 - Valores de *runoff* adotados pela Prefeitura de São Paulo (Wilken, 1978)

Zonas	Runoff
Edificação muito densa: Partes centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 – 0,95
Edificação não muito densa: Partes adjacentes ao centro, de menos densidades de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 – 0,70
Edificação com poucas superfícies livres: Partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas.	0,50 – 0,60
Edificação com muitas superfícies livres: Partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,25 – 0,50
Subúrbios com alguma edificação: Partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção.	0,10 – 0,25
Matas, parques e campos de esportes: Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação.	0,05 – 0,20

A partir dessa classificação, e considerando-se as características de uso e ocupação do solo locais, observadas nas imagens de satélite, foi elaborada uma nova divisão de classes para definição dos coeficientes de escoamento superficial das células. O nível de ocupação

observado nas imagens disponíveis e em visitas ao local permitiu a constatação de poucas áreas com densidade muito alta, sendo as áreas mais densas localizadas na parte oriental da bacia, entre o rio Calombé e a rodovia Washington Luiz (BR-040), onde encontram-se instalações industriais. Assim, a ocupação urbana e a cobertura vegetal foram divididas em três classes de densidade cada uma, como exposto na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Coeficientes de escoamento adotados em função do uso do solo

Tipo	Classe	<i>Runoff</i>
Ocupação Urbana	Denso	0,70
	Médio	0,60
	Rarefeito	0,50
Cobertura Vegetal	Capoeira	0,20
	Campo antrópico	0,30
	Solo exposto	0,40

A Tabela 5.10 e a Tabela 5.11 mostram os valores atuais para o coeficiente de escoamento (**runoff**) definido para cada célula da bacia do rio Pilar/Calombé, de acordo com a distribuição de tipos de cobertura e uso do solo, levantados pela classificação por imagens de satélite.

Tabela 5.10 – Valores do coeficiente de escoamento (runoff) para cada célula resultante da discretização da bacia (Parte 1)

Célula	Densidade de Ocupação			Cobertura Vegetal			runoff Total
	Urb_Rarefeito	Urb_Medio	Urb_Denso	Capoeira	Campo Antr.	Solo exposto	
	0.50	0.60	0.70	0.20	0.30	0.40	
502	0.074	0.000	0.000	0.002	0.915	0.008	0.316
511	0.062	0.000	0.000	0.000	0.938	0.000	0.312
521	0.348	0.000	0.000	0.000	0.652	0.000	0.370
531	0.914	0.000	0.000	0.000	0.086	0.000	0.483
541	0.943	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.489
542	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.300
551	0.479	0.271	0.166	0.000	0.084	0.000	0.543
552	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.300
561	0.653	0.022	0.000	0.000	0.325	0.000	0.437
562	0.071	0.000	0.000	0.000	0.929	0.000	0.314
571	0.464	0.000	0.000	0.000	0.536	0.000	0.393
572	0.020	0.000	0.000	0.015	0.965	0.000	0.303
580	0.067	0.000	0.000	0.014	0.883	0.036	0.316
581	0.248	0.000	0.000	0.000	0.752	0.000	0.350
582	0.008	0.000	0.000	0.011	0.945	0.037	0.304
601	0.256	0.000	0.000	0.000	0.743	0.000	0.351
602	0.000	0.803	0.169	0.000	0.028	0.000	0.608
611	0.589	0.007	0.151	0.000	0.253	0.000	0.480
612	0.000	0.738	0.262	0.000	0.000	0.000	0.626
621	0.343	0.012	0.004	0.000	0.640	0.000	0.374
622	0.000	0.471	0.270	0.000	0.259	0.000	0.549
624	0.000	0.632	0.342	0.000	0.026	0.000	0.626

Tabela 5.11 – Valores do coeficiente de escoamento (runoff) para cada célula resultante da discretização da bacia (Parte 2)

Célula	Densidade de Ocupação			Cobertura Vegetal			runoff total
	Urb_Rarefeito	Urb_Medio	Urb_Denso	Capoeira	Campo Antr.	Solo exposto	
	0.50	0.60	0.70	0.20	0.30	0.40	
625	0.574	0.024	0.182	0.082	0.134	0.005	0.487
631	0.637	0.005	0.163	0.000	0.196	0.000	0.494
632	0.000	0.337	0.591	0.000	0.073	0.000	0.637
633	0.692	0.204	0.105	0.000	0.000	0.000	0.541
634	0.040	0.360	0.352	0.044	0.193	0.010	0.553
641	0.076	0.657	0.267	0.000	0.000	0.000	0.619
642	0.000	0.150	0.850	0.000	0.000	0.000	0.685
643	0.000	0.162	0.812	0.000	0.000	0.026	0.676
651	0.000	0.748	0.252	0.000	0.000	0.000	0.625
652	0.000	0.349	0.651	0.000	0.000	0.000	0.665
661	0.000	0.549	0.451	0.000	0.000	0.000	0.645
662	0.000	0.281	0.683	0.000	0.036	0.000	0.657
663	0.000	0.262	0.738	0.000	0.000	0.000	0.674
671	0.000	0.733	0.218	0.000	0.049	0.000	0.607
672	0.000	0.488	0.442	0.000	0.070	0.000	0.623
673	0.000	0.210	0.764	0.000	0.025	0.000	0.669
681	0.050	0.744	0.092	0.000	0.115	0.000	0.570
682	0.000	0.457	0.491	0.000	0.033	0.019	0.635
691	0.652	0.044	0.000	0.000	0.231	0.074	0.451
692	0.000	0.879	0.055	0.000	0.066	0.000	0.586
700	0.255	0.000	0.000	0.131	0.600	0.015	0.339
701	0.212	0.000	0.000	0.000	0.786	0.002	0.343
702	0.467	0.167	0.014	0.073	0.279	0.000	0.442

5.3.7. Cenários de Projeto Simulados

Para a simulação dos cenários de projeto, foram consideradas duas condições com diferentes concepções, a primeira, representando uma solução convencional e outra, representando uma solução com medidas alternativas. Para cada condição foram simulados eventos hidrológicos com diferentes tempos de recorrência (TR10, TR20 e TR50), totalizando 6 cenários de projeto, como ilustrado pelo diagrama apresentado na Figura 5.18.

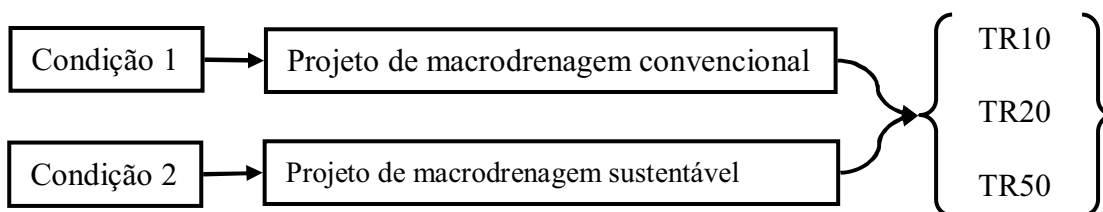


Figura 5.18 – Cenários de projeto simulados

Neste capítulo serão apresentadas as duas condições de projeto, escolhidas para comparação neste estudo, descrevendo as intervenções propostas para cada uma e a estratégia de modelação utilizada. **Os projetos propostos foram elaborados para uma cheia decorrente de uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos.**

CONDIÇÃO 1 – SOLUÇÃO CONVENCIONAL DE CANALIZAÇÃO

Neste cenário, as intervenções de controle das inundações constituem-se simplesmente em adequar o leito do rio às vazões de cheia através de limpeza, dragagem e canalização em concreto da calha principal dos rios Pilar e Calombé, complementado pela implantação de avenidas canais em ambas as margens dos rios.

Esse panorama caracteriza bem a concepção tradicionalmente adotada nos projetos de controle de inundações, com ações localizadas e preferência pelas intervenções que resultem na aceleração dos escoamentos. A avenida canal, construída nas margens dos rios, também chamadas de vias de fundo de vale, são construídas como uma opção para o controle das ocupações irregulares nas margens dos rios.

Para simulação dos efeitos da implantação deste projeto na bacia, foram alteradas apenas as células de canal, representativas dos rios Pilas e Calombé, por meio da modificação da largura

de suas ligações e do coeficiente de **runoff**, a fim de se representar a seção transversal canalizada.

O projeto de canalização buscou intervir localmente nos pontos mais críticos quanto ao extravasamento de água da calha principal dos rios. Nos trechos urbanos, a alternativa considerou a utilização de concreto nas paredes do canal, representando uma prática muito adotada em rios urbanos no Brasil. O mapa apresentado na Figura 5.19 mostra o traçado do projeto de canalização proposto. Os trechos projetados de cada rio e suas características são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Características do projeto de canalização dos rios Pilar e Calombé

RIO PILAR				
	Trecho		Largura da Seção (m)	Extensão (m)
P1*	Jusante:	Foz no rio Iguazu	25.00	2950.0
	Montante:	Confluência com rio Calombé		
P2**	Jusante:	Confluência com rio Calombé	14.00	1590.0
	Montante:	Avenida Feliciano Castilho		
P3**	Jusante:	Avenida Feliciano Castilho	10.87	2442.0
	Montante:	Estrada de São Lourenço		
P4**	Jusante:	Estrada de São Lourenço	8.65	3398.0
	Montante:	Estrada Velha do Pilar		
RIO CALOMBÉ				
	Trecho		Largura da Seção (m)	Extensão (m)
C1**	Jusante:	Confluência com rio Pilar	17.50	745.0
	Montante:	Altura da rua Pará		
C2**	Jusante:	Altura da rua Pará	14.00	2210.0
	Montante:	Rua Projetada 27		
C3**	Jusante:	Rua Projetada 27	12.00	410.0
	Montante:	Rua Venâncio Veloso		
C4**	Jusante:	Rua Venâncio Veloso	10.00	4597.0
	Montante:	Rua Serra Talhada		

* Seção trapezoidal em terra

** Seção retangular em concreto

Para realizar uma estimativa orçamentária da implantação deste projeto na bacia do rio Pilar/Calombé foram utilizados os preços da tabela EMOP do mês de setembro de 2009 para o cálculo dos custos da canalização dos rios.

A implantação da avenida canal foi estimada com base em um projeto realizado para o Programa de Saneamento Ambiental e Desenvolvimento Econômico e Social de Duque de

Caxias – PROSADUQUE (OUERJ, 2003), sendo os valores corrigidos para setembro de 2009. Esse projeto previa a construção de uma avenida canal nas duas margens do rio Calombé, em um trecho de 4 km, a partir da confluência com o rio Pilar para montante.

A partir dos custos estimados para o projeto PROSADUQUE, foi calculado o custo unitário por quilômetro de avenida construída para, em seguida, multiplicar esse valor pela extensão dos rios Pilar e Calombé, considerada no projeto convencional de canalização, totalizando cerca de 15.675 metros de avenida canal. O cálculo resumido da estimativa de custos é apresentado na Tabela 5.13.

O custo final da canalização mais a construção de avenidas canais em ambas as margens dos rios, em uma extensão total de 15,6 km, foi estimado em **R\$ 50.953.188,86**.

Tabela 5.13 – Custos de implementação do Projeto 1 (Base: EMOP/Setembro de 2009)

ITEM	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UNID	QUANT.	Preços Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
2		SERVIÇOS ESPECÍFICOS - MACRODRENAGEM				
	03.036.210-0	Escavação em leito de rio, em material mole, até 4,50m de profundidade, utilização Clam-Shell.	m³	62.911	7,17	451.074,34
	04.010.045-0	Carga e descarga mecânica utilizando caminhão basculante	m³	62.911	0,58	36.488,58
	04.005.126-0	Transporte de qualquer natureza com velocidade média de 15km/h em caminhão basculante com capacidade útil de 8t.	t x km	1.132.404	1,21	1.370.209,09
	11.003.003-1	Concreto para peças armadas inclusive material, confecção e transporte horizontal e vertical.	m³	15.675	267,90	4.199.332,50
	11.009.013-0	Barra de aço CA-50b, com saliência, diâmetro de 6,3 mm, destinada a armadura de concreto armado.	kg	1.724.250	4,33	7.466.002,50
	11.011.029-0	Corte, dobragem, montagem e colocação de ferragem na forma, aço CA-50b ou CA-50a, em barra redonda com Ø de 6,3mm.	kg	1.724.250	2,08	3.586.440,00
	11.004.020-1	Forma de madeira para moldagem de peças de concreto armado	m²	62.700	23,72	1.487.244,00
						18.596.791,02
TOTAL GERAL PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO						18.596.791,02
Custo da Avenida Canal Projeto PROSADUQUE (4 km) =						8.256.816,04
Custo da Avenida Canal por km =						2.064.204,01
Custo da Avenida Canal para os rios Pilar e Calombé (15,68 km) =						32.356.397,8
Total Geral considerando custos de implantação de avenida canal mais canalização						50.953.188,86

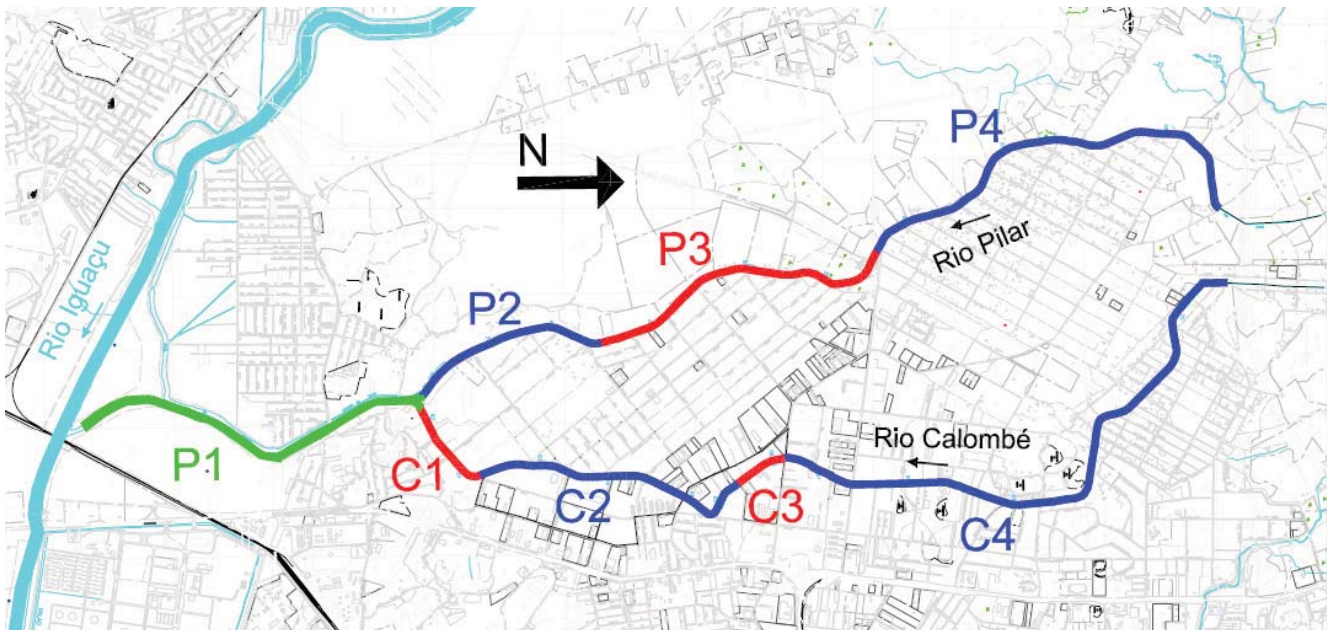


Figura 5.19 – Planta de localização dos trechos de projetos dos rios Pilar e Calombé (ver Tabela 5.12).

CONDIÇÃO 2 – SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL COM MEDIDAS DISTRIBUIDAS NA BACIA

O projeto desenvolvido para esta condição foi baseado nos conceitos de manejo sustentável das águas pluviais apresentados e discutidos na revisão bibliográfica, seguindo o Plano de Águas Pluviais elaborado para a bacia do rio Pilar/Calombé, o qual foi proposto no Capítulo 4 deste trabalho.

As medidas de intervenção previstas para o controle de inundações na bacia foram:

- ✓ limpeza, desassoreamento e implantação de seção trapezoidal em solo natural nos rios Pilar e Calombé;
- ✓ implantação de reservatórios em praças urbanas;
- ✓ renaturalização de áreas de alagamento naturais da bacia (várzeas) e implantação de Parque Fluvial inundável ao longo da margem direita do rio Pilar e em alguns trechos do rio Calombé; e
- ✓ recomposição da cobertura vegetal em áreas estratégicas da bacia, como encostas e cotas altas.

Primeiramente, foi simulado o cenário com a implantação de seção de projeto nos rios Pilar e Calombé, analisando seus efeitos sobre o quadro atual de inundações na bacia. A partir deste cenário, as outras medidas de intervenção foram simuladas separadamente no intuito de se analisar a eficiência de cada técnica no controle e na mitigação das inundações. Após essas simulações, todas as intervenções foram consideradas em um mesmo cenário, correspondente ao projeto de controle de inundações com medidas distribuídas na bacia (Condição 2). O resultado das simulações será apresentado no **item 6.4.9**.

A limpeza, o desassoreamento e a implantação da seção de projeto foram considerados em toda a extensão dos rios Pilar e Calombé. Na Tabela 5.14 é apresentada a seção-tipo para cada trecho. A divisão dos trechos dos rios considerada é a mesma utilizada para o projeto de canalização proposto para a Condição 1 (Figura 5.19). Para este cenário, as seções hidráulicas dos trechos utilizadas na entrada de dados do modelo de células são numericamente iguais ao projeto de canalização, sendo neste caso, representativas da largura média da seção

trapezoidal. Assim, a diferença na modelagem se dá pela variação do coeficiente de rugosidade ($n = \text{manning}$), que para seção em solo foi considerado com um valor $n = 0,048$.

Tabela 5.14 – Características do projeto de dragagem dos rios Pilar e Calombé

RIO PILAR				
	Trecho		Seção * (m)	Extensão (m)
P1	Jusante:	Foz no rio Iguazu	25.00	2950.0
	Montante:	Confluência com rio Calombé		
P2	Jusante:	Confluência com rio Calombé	14.00	1590.0
	Montante:	Avenida Feliciano Castilho		
P3	Jusante:	Avenida Feliciano Castilho	10.87	2442.0
	Montante:	Estrada de São Lourenço		
P4	Jusante:	Estrada de São Lourenço	8.65	3398.0
	Montante:	Estrada Velha do Pilar		

RIO CALOMBÉ				
	Trecho		Seção * (m)	Extensão (m)
C1	Jusante:	Confluência com rio Pilar	17.50	745.0
	Montante:	Altura da rua Pará		
C2	Jusante:	Altura da rua Pará	14.00	2210.0
	Montante:	Rua Projetada 27		
C3	Jusante:	Rua Projetada 27	12.00	410.0
	Montante:	Rua Venâncio Veloso		
C4	Jusante:	Rua Venâncio Veloso	10.00	4597.0
	Montante:	Rua Serra Talhada		

* Largura média (Seção Trapezoidal)

Uma outra medida considerada foi a implantação de reservatórios de retenção em praças e parques públicos, através da adequação da área para receber e reservar as águas pluviais precipitadas sobre uma determinada área da bacia, trazendo para o projeto o conceito de **Paisagens Multifuncionais**, apresentado na Revisão Bibliográfica deste trabalho. Um esquema do funcionamento desta estrutura pode ser visto na Figura 5.20 apresentada a seguir.

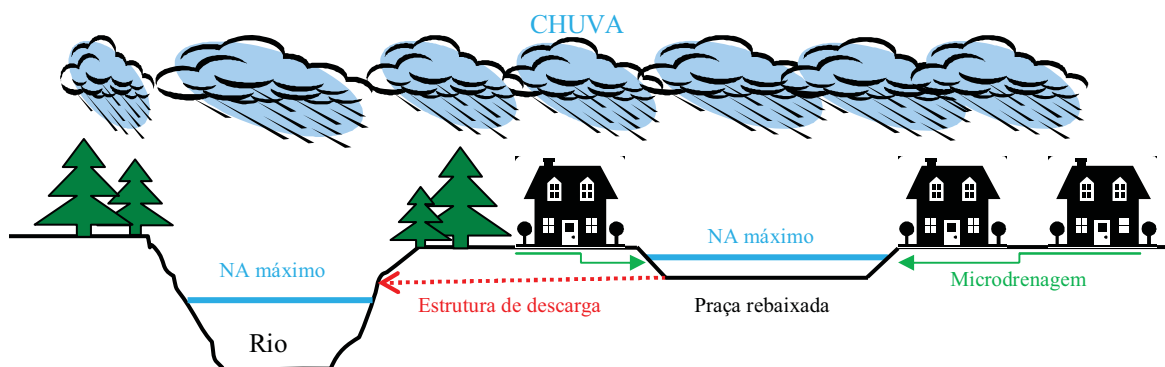


Figura 5.20 – Esquema de funcionamento do reservatório de retenção em praça (Elaborado pelo autor)

O Glossário de Drenagem Urbana Sustentável do Ministério das Cidades apresenta uma definição para a utilização de bacias de retenção em praças e parques, nomeando a estrutura de “Parque isolado associado a reservatório de amortecimento de cheias”. A definição do Glossário é a seguinte:

Trata-se de um parque situado em posição estratégica na bacia hidrográfica que tem como finalidade (...) amortecer as vazões de cheia reduzindo, assim, a necessidade de ampliar a capacidade do sistema de drenagem à jusante. (...) os parques isolados possuem múltiplas funções: ampliação da área verde, aproveitamento de áreas passíveis de invasão, recarga do aquífero subterrâneo, área de contemplação e lazer para a população.²²

A Lei Federal número 6.766 / 79, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano, diz que:

As áreas destinadas a sistemas de circulação, a implantação de equipamento urbano e comunitário, bem como a espaços livres de uso público, serão proporcionais à densidade de ocupação prevista pelo plano diretor ou aprovada por lei municipal para a zona em que se situem.²³

A legislação do município de Duque de Caxias não estabelece nenhum número para definição dessas áreas. Porém, a Lei 6.766 / 79, em seu texto original, definia que “a percentagem de áreas públicas (...) não poderá ser inferior a 35% (trinta e cinco por cento) da gleba”.

Assim, foi considerado o valor de 35% para áreas destinadas a sistemas de circulação, implantação de equipamento urbano e comunitário e espaços livres de uso público, sendo:

- ✓ 10% → sistema viário
- ✓ 5% → obras públicas
- ✓ 20% → áreas livres de uso público

Dos 20% de área destinada ao uso público, consideramos a metade prevista para implantação de praças e parques, resultando em 10% da área total do loteamento. Mais uma vez, desses 10%, a metade – 5% – foi tomada como viável para implantação de dispositivos de controle de inundações.

Para a escolha dos locais a serem instaladas as estruturas de retenção de águas pluviais, foram consideradas as áreas com cotas de terreno altas suficientes para permitir um rebaixamento do fundo sem que a estrutura de saída das águas fosse afogada pela cheia dos rios Pilar e

²² Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/>>. Acesso em: 01/06/2009.

²³ Lei Federal nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, Artigo 4º, Inciso I.

Calombé. As áreas propícias para a instalação das estruturas localizam-se a montante da Estrada São Lourenço, representadas pelas células 561, 562, 571, 572, 581 e 582 na bacia do Pilar e pelas células 681, 682, 691, 692, 700, 701 e 702 na bacia do Calombé. A Figura 5.21 apresenta uma imagem de satélite do aplicativo **Google Earth** sobreposta pela divisão da bacia em células e com as áreas consideradas para implantação dos reservatórios destacadas.

A representação do funcionamento dessas estruturas no Modelo de Células foi feita de acordo com a área das células em que estavam as áreas previstas para implantação das praças inundáveis. Nestas células, a cota de terreno de uma parcela de 5% da área foi rebaixada em 0,50 metro, para permitir a detenção das águas de chuva.

Para essa estratégia, o tipo dessas células foi modificado para **tipo 3** (reservatório), que tem como característica a inserção de uma **curva cota x área** em seus dados de entrada. A **curva cota x área** foi feita de modo a se representar o armazenamento das águas precipitadas sobre a célula. Também foi necessária a modificação da ligação da célula com o rio, que originalmente era do tipo **vertedor**, passando para o tipo **reservatório**. Essa modificação permite que a célula descarregue a água precipitada sobre sua área de duas formas: por um orifício em seu fundo, representando a estrutura de descarga do reservatório; e por um vertedor, representando o vertimento da planície decorrente do escoamento superficial. Dessa maneira foi possível simular o efeito de amortecimento de reservatórios de detenção, que nesses casos seriam instalados em praças e parques públicos.

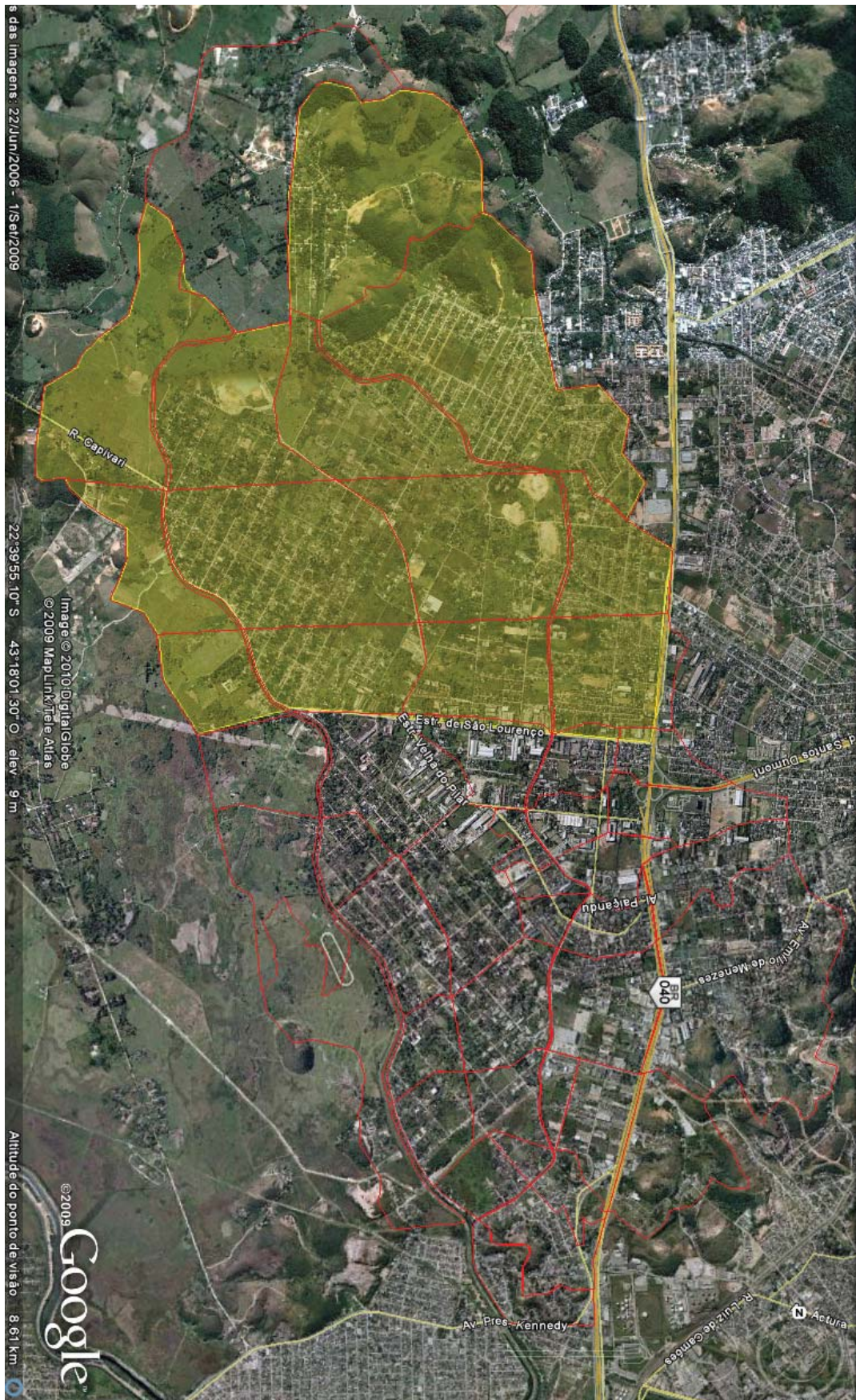


Figura 5.21 – Região considerada para implantação de reservatórios em praças
(área destacada em amarelo)

Não necessariamente devem ser construídas apenas uma estrutura para cada área representada pela célula, mas podem ser previstas diversas estruturas funcionando conjuntamente, que somadas possuam o mesmo volume para armazenagem aqui considerado. A consideração de uma área reservando toda a água precipitada sobre a célula é feita apenas como uma simplificação para a simulação do cenário com o Modelo de Células na escala de interesse. Simulações mais precisas necessitam de um maior grau de detalhamento, não sendo objetivo desta pesquisa.

A área total utilizada para implantação de reservatórios de amortecimento representa uma parcela de 2,23% da área total da bacia do rio Pilar/Calombé, como apresentado na Tabela 5.15. Esse valor se aproxima muito da área requerida para amortecimento em bacias de detenção, da ordem de 2,0% da área total da bacia considerada, segundo o **Urban Drainage and Flood Control District (2008)**.

Tabela 5.15 – Parcela da bacia considerada para armazenamento de águas pluviais

Área total da bacia (A_{total})	26.664.135 m ²
Área total utilizada para armazenamento (A_{arm})	594.484 m ²
Parcela utilizada para amortecimento (A_{arm}/A_{total})	2,23%

Apesar de medidas de armazenamento possuírem um impacto significativo sobre as vazões geradas na planície urbana, para se chegar a amortecimentos capazes de adequar as vazões de cheia nos rios seriam necessários grandes espaços, geralmente não disponíveis em bacias muito urbanizadas. Além disso, os rios urbanos apresentam uma configuração totalmente modificada de seu estado natural, substituindo os meandros por trecho retificados, a calha secundária por vias de circulação e ocupações irregulares e as planícies de inundação por bairros inteiros. Essa situação agrava em muito os problemas de inundações urbanas, diminuindo a capacidade de armazenamento em calha dos rios, aumentando a erosão e a quantidade de água drenada para o corpo fluvial. Por isso, também é de extrema importância a preservação das áreas marginais aos rios, como é assegurado pelo próprio Código Florestal²⁴, que considera como área de preservação permanente a faixa marginal situada ao longo dos rios e de qualquer curso d'água.

Neste projeto foi considerada a revitalização das várzeas, que são áreas marginais aos rios com alta frequência de inundações. Desta forma, foi prevista a recomposição de uma calha

²⁴ Lei Federal 4.771, de 15 de setembro de 1965, Artigo 2º.

secundária ao longo de toda a extensão dos rios Pilar e Calombé, aumentando a capacidade de armazenamento em calha desses rios e assegurando a preservação da mata ciliar, como mostrado no esquema da Figura 5.22. Também foi prevista a recuperação de áreas de alagamento naturais da bacia, em sua parte mais baixa, assegurando um importante meio de amortecimento dos escoamentos fluviais. A Figura 5.23 apresenta a localização dessas áreas.

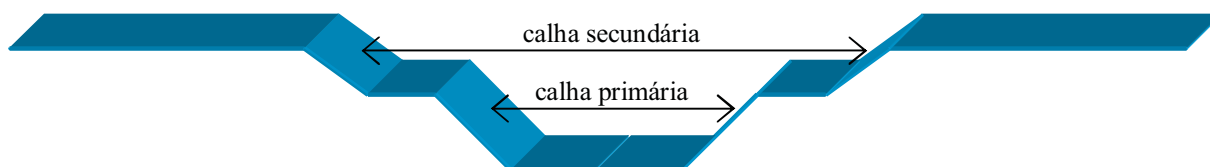


Figura 5.22 – Esquema de um corte transversal do rio com calha dupla

A preservação dessas áreas é de extrema importância para o funcionamento do sistema de macrodrenagem, permitindo que o excesso de água que chega aos rios inunde essas regiões aliviando outros trechos dos rios em que a água deva permanecer confinada em sua calha. Para assegurar a preservação dessas áreas, uma boa medida é a previsão de usos públicos como parques, áreas de lazer e de prática de esportes, evitando que haja a invasão e ocupação da região de interesse ao controle de inundações e ainda garantindo o uso social do espaço urbano.

As definições do Glossário de Drenagem Urbana Sustentável do Ministério das Cidades para os parques fluviais (ou lineares, como é descrito no Glossário) e para restauração de áreas úmidas (várzeas) são transcritas a seguir.

✓ Parque Linear Ribeirinho:

Parque implantado em uma faixa ao longo de um rio, córrego ou canal. Tem múltiplas funções, sendo a principal delas, proteger a zona ribeirinha contra ocupações irregulares que possam vir a confinar o corpo de água e reduzir a largura da área destinada à inundação. Dentre as outras funções que um parque linear pode ter, destacam-se: restauração de várzeas, proteção das margens contra erosão, recomposição da vegetação ciliar, redução da velocidade de escoamento com a redução dos picos de cheias, redução da poluição difusa, área de lazer e incremento da área verde. (Ministério das Cidades)

✓ Restauração de áreas úmidas (várzeas):

São obras que visam recompor as áreas de inundação natural de rios e córregos. Podem ser associadas aos parques lineares e se aplicam geralmente às áreas ribeirinhas alteradas ainda não densamente ocupadas. A restauração de áreas úmidas é importante para restabelecer as áreas naturais de inundação com efeitos positivos na redução das inundações a jusante, na redução das cargas poluidoras de fontes difusas e à restauração do ecossistema ribeirinho. (Ministério das Cidades)

Visto isso, o conjunto de medidas a fim de restaurar e preservar as áreas de alagamento natural da bacia do rio Pilar/Calombé são:

1. realocação de moradias nas margens dos rios e nas áreas destinadas a inundação;
2. abertura de uma faixa de 10 metros de largura em cada margem dos rios Pilar e Calombé para restauração da calha secundária, em uma cota que possibilite o extravasamento de águas durante a cheia dos rios;
3. implantação de parques fluviais inundáveis em 5 trechos do rio Calombé e na área baixa entre os rios Pilar e Calombé, a montante da sua confluência;
4. implantação de um parque fluvial inundável ao longo da margem direita do rio Pilar, no trecho compreendido entre a confluência com o rio Calombé e a rua do Capivari. Esse parque será composto por duas faixas, uma primeira mais próxima ao rio Pilar, com 20 metros de largura em uma cota que permita sua inundação em cheias do rio; e uma segunda não inundável, com largura de 30 metros, para receber equipamentos urbanos e pista de corrida/ciclovía, a fim de delimitar a área do parque.

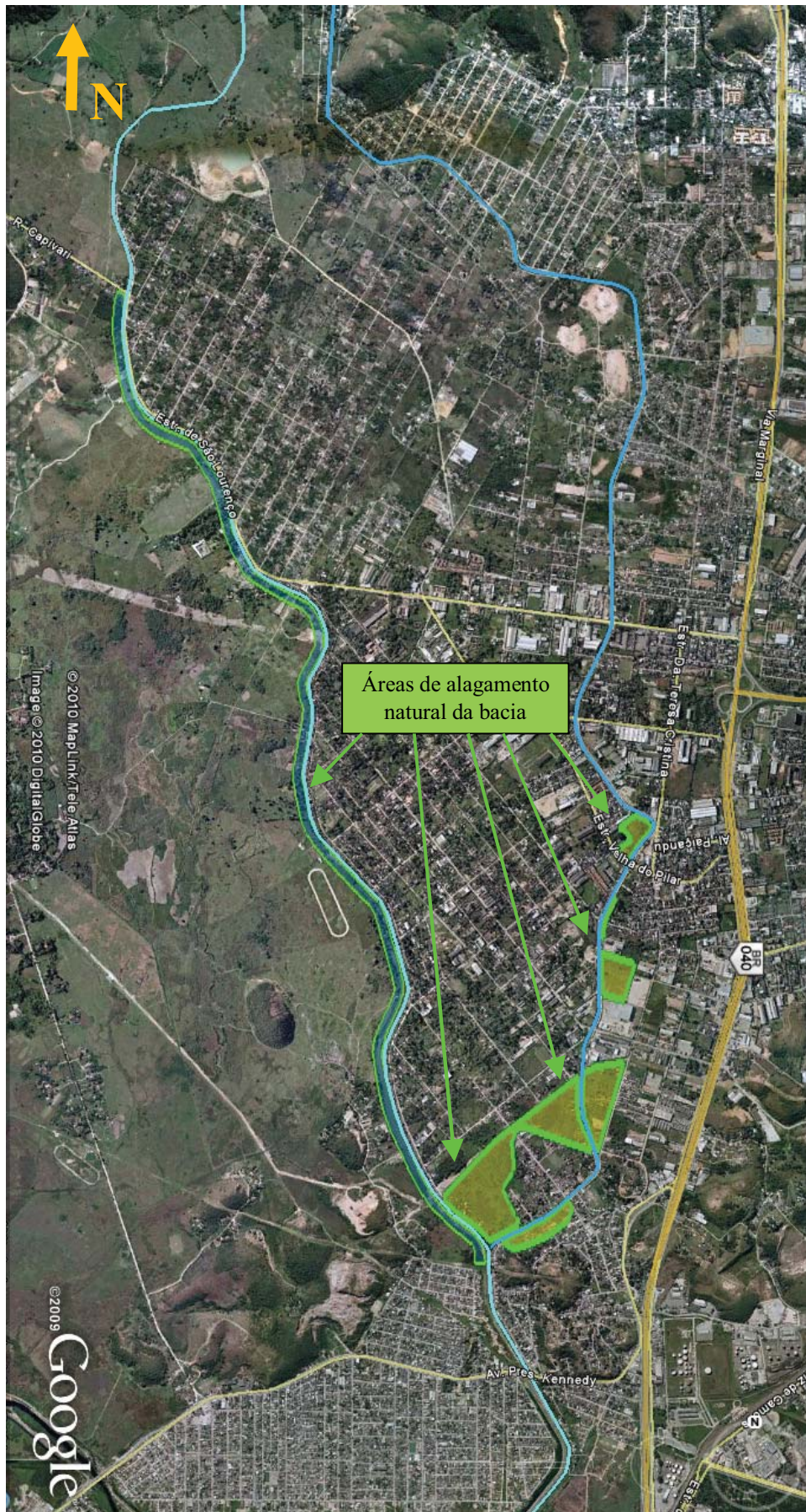


Figura 5.23 – Destaque das áreas a serem recuperadas e preservadas para extravasamentos dos rios Pilar e Calombé (Google Earth)

Para a representação dessas medidas no modelo de células a fim de simular os seus efeitos no controle de inundações, foram modificadas as células de canal referentes aos rios Pilar e Calombé e as células de planície localizadas nas áreas reservadas para inundação.

No rio Calombé as células de canal (tipo 0) foram alteradas para células de reservatório (tipo 3) a fim de se entrar com uma curva cota x área que representasse a seção em calha dupla. Para o rio Pilar, foi realizada a mesma modificação, com a diferença de que foram adicionados à curva cota x área outros pontos para representar o Parque Fluvial do Pilar, nas células de canal compreendidas no trecho de implantação do parque. Para uma melhor visualização dessa representação, estão apresentadas duas seções transversais na Figura 5.24, uma para cada rio, e a sua representação a partir de uma curva cota x área no modelo de células. Na Figura 5.25 é apresentado esquematicamente um trecho do rio Pilar em perspectiva, a fim de se possibilitar a visualização das diferentes cotas que compõem o sistema de alagamento do rio. Durante as estações secas, o rio ocupa a calha primária, em eventos de cheias mais freqüentes, as águas ocuparão as várzeas de inundação, e, para controle das inundações decorrentes de eventos hidrológicos menos freqüentes (10 e 20 anos), as águas do rio extravasarão para o Parque Inundável do Pilar, que terá um efeito amortecedor nas vazões rio abaixo.

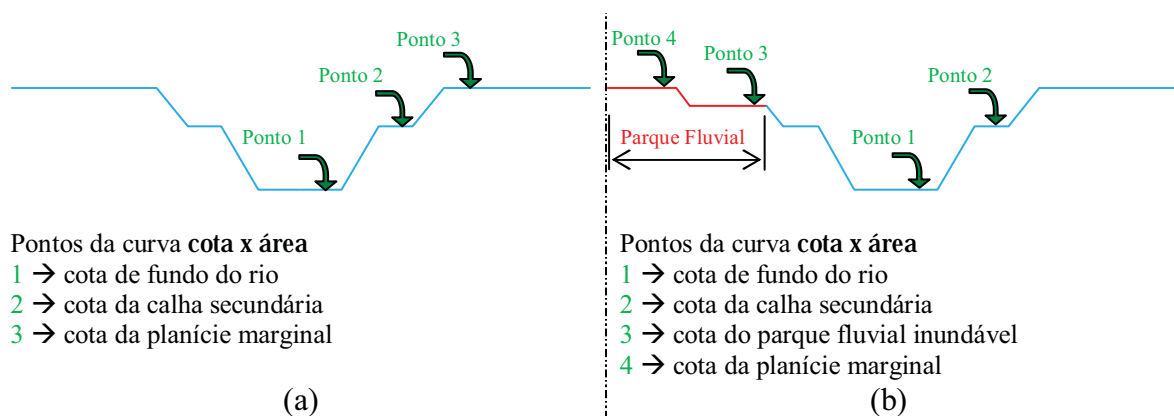


Figura 5.24 – Representação dos rios (a) Calombé e Pilar (b) considerando a restauração da calha secundária e implantação do Parque Fluvial do Pilar

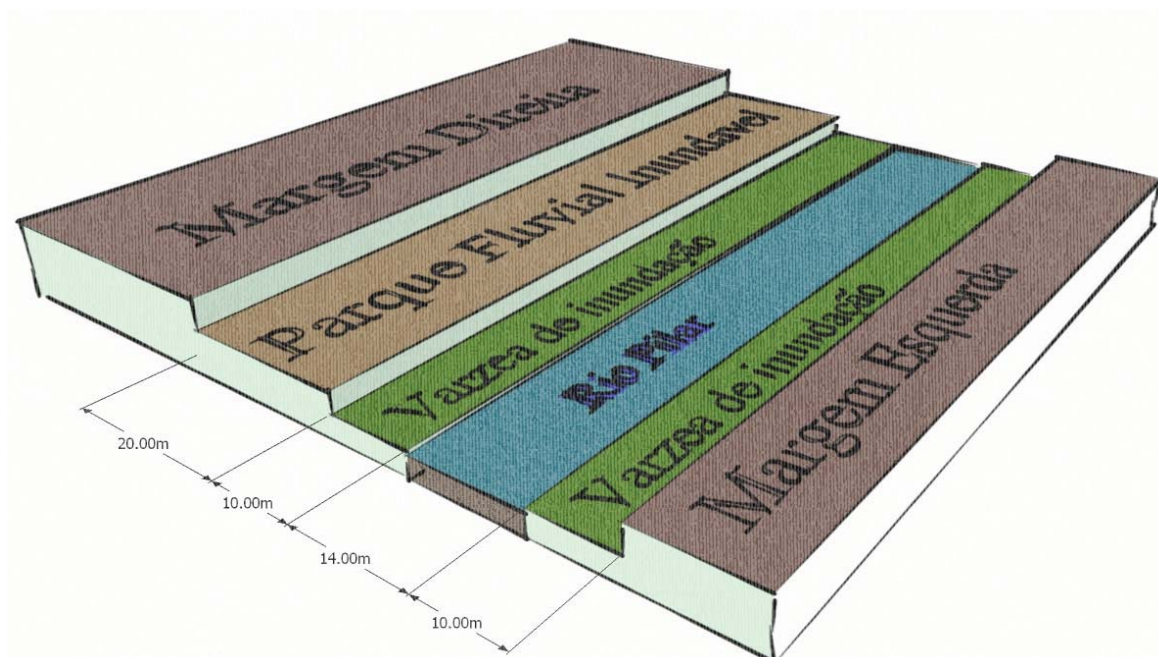


Figura 5.25 – Trecho do rio Pilar com várzeas de inundação e Parque Fluvial Inundável

Uma outra medida considerada foi a recomposição da cobertura vegetal em áreas estratégicas, a fim de se agir sobre a geração de escoamentos na fonte. Na bacia do rio Pilar/Calombé não existem muitas áreas de encostas, e das existentes, uma grande parte apresenta-se totalmente ocupada. Pela análise de imagens de satélite foram escolhidas algumas áreas para receber o reflorestamento. Essas áreas podem ser vistas na imagem de satélite do **software Google Earth** apresentada na Figura 5.26.

Para a simulação desta medida, foi feita uma alteração manual no mapa de uso do solo, modificando as áreas destinadas a receber o reflorestamento para o tipo capoeira, que neste estudo corresponde a um coeficiente de escoamento igual a 0,20, compatível com os valores utilizados pela Prefeitura de São Paulo (Tabela 5.8) para cobertura do solo com áreas verdes.

A partir deste novo mapa, foram corrigidas as parcelas de tipo de cobertura do solo para cada célula afetada pela medida. As células correspondentes às áreas com restabelecimento da cobertura vegetal são: 580, 625, 634, 700, e 702. A modificação dos coeficientes de escoamento dessas células pode ser observada na seqüência de tabelas seguintes. A Tabela 5.16 apresenta os coeficientes originais do mapeamento do uso do solo, a Tabela 5.17 apresenta os coeficientes já modificados e na Tabela 5.18 estão os percentuais de variação para cada célula.



Figura 5.26 – Localização das áreas consideradas para recomposição da cobertura vegetal (destacadas em verde)

Tabela 5.16 - Valores originais do coeficiente de escoamento (runoff) para as células a serem reflorestadas

Célula	Densidade de Ocupação			Cobertura Vegetal			runoff Total
	Urb_Rarefeito 0,50	Urb_Medio 0,60	Urb_Denso 0,70	Capoeira 0,20	Campo Antr. 0,30	Solo exposto 0,40	
580	0,067	0,000	0,000	0,014	0,883	0,036	0,316
625	0,574	0,024	0,182	0,082	0,134	0,005	0,487
634	0,040	0,360	0,352	0,044	0,193	0,010	0,553
700	0,255	0,000	0,000	0,131	0,600	0,015	0,339
702	0,467	0,167	0,014	0,073	0,279	0,000	0,442

Tabela 5.17- Valores modificados do coeficiente de escoamento (runoff) para as células a serem reflorestadas

Célula	Densidade de Ocupação			Cobertura Vegetal			runoff Total
	Urb_Rarefeito 0,50	Urb_Medio 0,60	Urb_Denso 0,70	Capoeira 0,20	Campo Antr. 0,30	Solo exposto 0,40	
580	0,047	0,000	0,000	0,077	0,840	0,036	0,305
625	0,000	0,139	0,021	0,669	0,036	0,135	0,297
634	0,000	0,000	0,339	0,661	0,000	0,000	0,370
700	0,174	0,000	0,000	0,529	0,296	0,002	0,282
702	0,449	0,167	0,014	0,222	0,148	0,000	0,423

Tabela 5.18- Variação do coeficiente de escoamento (runoff) para as células reflorestadas

Célula	runoff Total original	runoff Total modificado	Variação (%)
580	0,316	0,305	-3,48%
625	0,487	0,297	-39,01%
634	0,553	0,370	-33,09%
700	0,339	0,282	-16,81%
702	0,442	0,423	-4,30%

A estimativa orçamentária para previsão dos custos relativos ao movimento de terra necessário à implantação do projeto com medidas distribuídas na bacia foi calculada com base na tabela EMOP, com preços relativos ao mês de setembro de 2009, resultando em um valor de R\$ 24.152.073,10.

O movimento de terra necessário refere-se à dragagem e implantação da seção de projeto nos rios Pilar e Calombé, assim como às escavações necessárias para a construção dos reservatórios em praças e áreas públicas e para implantação dos parques fluviais.

Para considerar os custos envolvidos no uso de reservatórios em praças e parques fluviais, foi feito uma estimativa dos preços relativos à urbanização das áreas sujeitas a inundações controladas. O custo desta urbanização foi baseado em projetos de parques fluviais inundáveis realizados pelo Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente da COPPE/UFRJ para elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos, Controle de Inundações e Recuperação Ambiental da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí²⁵. A urbanização dessas áreas resultou em um custo de R\$ 26.422.269,32.

Os custos relativos aos trabalhos de reflorestamento das áreas estratégicas foram estimados com base em um estudo para o reflorestamento da bacia do rio Joana, realizado por COPPETEC (2003). Atualizando os custos levantados neste estudo para setembro de 2009, estimou-se a necessidade de R\$ 9.215,00 por ha de área plantada. Para a bacia do rio Pilar/Calombé foram previstos 2.946.229 m² de recomposição da cobertura vegetal, resultando em um custo estimado R\$ 2.714.861,78. O cálculo desses valores pode ser visto na Tabela 5.19, apresentada a seguir.

Assim, para a implantação das medidas de controle distribuídas na bacia estima-se que seja necessário um investimento total de **R\$ 53.289.204,20**.

²⁵ Disponível em: <<http://www.hidro.ufrj.br/novoiguacu/>>. Acessado em: 27/02/2009.

Tabela 5.19 – Custos de implementação do Projeto 2 (Base: EMOP/Setembro de 2009)

ITEM	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UNID	QUANT.	Preços Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
2		SERVIÇOS ESPECÍFICOS - MACRODRENAGEM				
	03.036.210-0	Escavação em leito de rio, em material mole, até 4,50m de profundidade , utilização Clam-Shell.	m³	485.960	7,17	3.484.333,86
	04.010.045-0	Carga e descarga mecânica utilizando caminhão basculante	m³	485.960	0,58	281.856,85
	04.005.126-0	Transporte de qualquer natureza com velocidade média de 15km/h em caminhão basculante com capacidade útil de 8t.	t x km	8.747.282	1,21	10.584.210,79
						14.350.401,50
2		SERVIÇOS ESPECÍFICOS - MOVIMENTO DE TERRA - PRAÇAS				
	03.025.005-0	Escavação mecânica , com trator de lâmina, em material de 1ª categoria, com transporte entre 50 e 100 metros.	m³	349.311	5,70	1.991.073,70
	04.010.045-0	Carga e descarga mecânica utilizando caminhão basculante	m³	349.311	0,58	202.600,48
	04.005.126-0	Transporte de qualquer natureza com velocidade média de 15km/h em caminhão basculante com capacidade útil de 8t.	t x km	6.287.601	1,21	7.607.997,41
						9.801.671,60
TOTAL PARCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO						24.152.073,10
				(R\$ / m²)		
Custo de Urbanização dos parques implantados em praças (594.484 m²)				29,01		17.245.980,84
Custo de Urbanização do parque fluvial do Pilar (135.424 m²)				29,01		3.928.669,58
Custo de Urbanização dos parques fluviais do Calombé (180.890 m²)				29,01		5.247.618,90
Custo de reflorestamento das áreas estratégicas (2.946.229 m²)				0,92		2.714.861,78
Total Geral para implantação do Projeto 2 (Sustentável)						53.289.204,20

5.3.8. Cenários Futuros

A urbanização na Baixada Fluminense ocorreu historicamente e de forma generalizada sem planejamento e controle. Essa situação desenhou o padrão de ocupação dos municípios da Baixada, que apresentam, geralmente, áreas urbanas com altos índices de impermeabilização e degradação, sem valor urbanístico e ambiental. Essas áreas tem muitas vezes como característica a falta ou ineficiência de infra-estrutura urbana, não oferecendo à população adequados serviços de transporte e saneamento.

A bacia hidrográfica em estudo apresenta uma situação de intensa modificação antrópica, com a ocupação mais densa concentrada nas áreas mais próximas à Rodovia Washington Luiz, na parte Leste da bacia. Porém, a maior parte da cobertura vegetal foi suprimida ou alterada, tornando quase que inexistente a presença de matas.

Para simular os cenários futuros representativos do desenvolvimento urbano na bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé foram consideradas três possibilidades de crescimento:

1. Adensamento urbano de saturação

Neste cenário, o critério aplicado para se obter um índice de urbanização representativo da completa falta de planejamento e controle sobre o uso e ocupação do solo na bacia foi estabelecer o nível de ocupação mais denso encontrado na classificação por imagens de satélite, apresentada no item 6.4.3, e, a partir desta área, considerar toda a bacia com mesmo nível de ocupação.

Isso foi feito generalizando-se o **coeficiente de runoff (c)** encontrado para a célula com maior densidade de urbanização para todas as células de planície da bacia do rio Pilar/Calombé. A célula utilizada para representar essa situação foi a de número 642, com um valor para o **coeficiente de runoff** $c = 0,685$. A imagem de satélite da área desta célula pode ser vista na Figura 5.27.

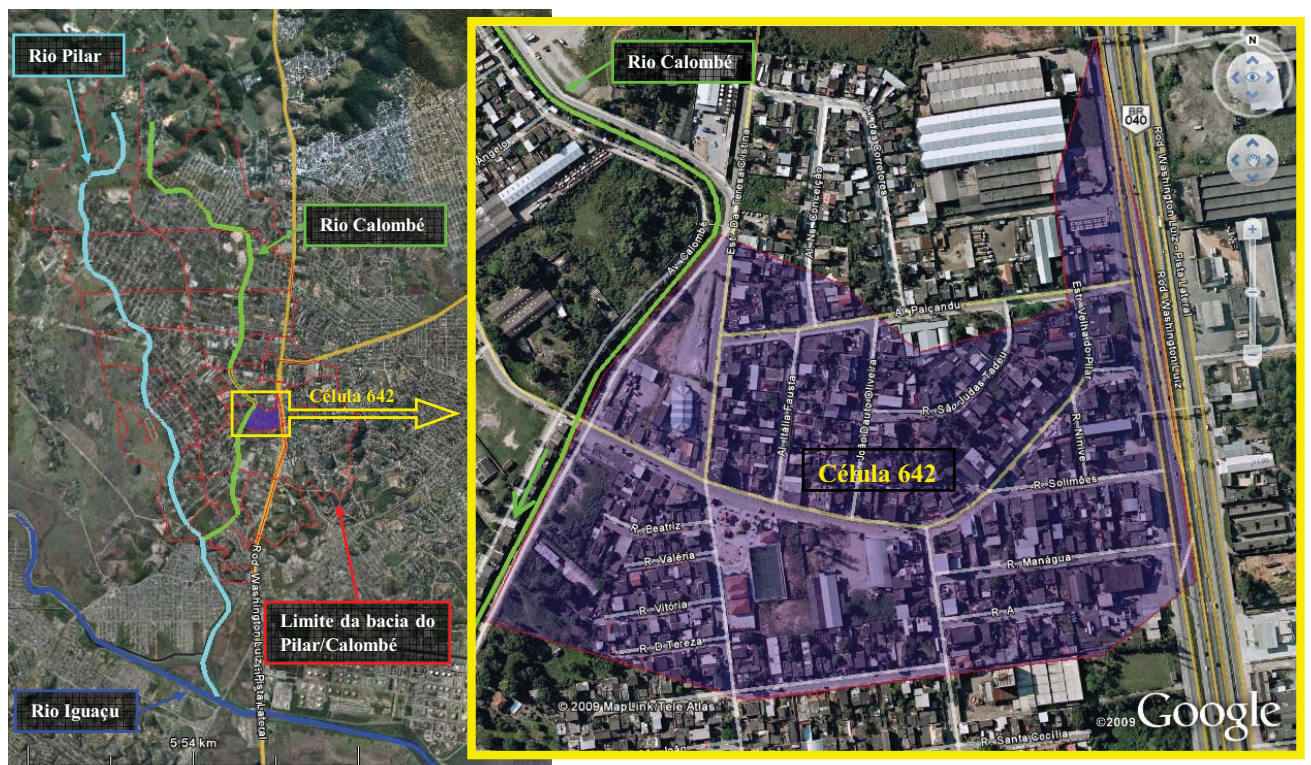


Figura 5.27 – Nível de urbanização de saturação considerado para simulação do cenário futuro (Célula 642 no detalhe)

2. Adensamento urbano segundo Plano Diretor Urbanístico (PDU)

O controle do uso e ocupação do solo previsto no Plano Diretor de Duque de Caxias é feito de acordo com o coeficiente de aproveitamento máximo (relação entre a área edificada e a área do lote ou gleba), definido para cada tipo de ocupação estabelecido no Zoneamento Urbano.

O PDU não prevê qualquer controle sobre as construções no que diz respeito à impermeabilização de superfícies, dificultando o controle sobre os impactos no ciclo hidrológico, uma vez que uma edificação limitada apenas em área de construção continua livre para impermeabilizar qualquer área que disponha. Assim, para simular um cenário futuro representativo de um desenvolvimento urbano de acordo com as previsões do PDU, foram feitas relações entre o coeficiente de aproveitamento e o coeficiente de escoamento superficial (**runoff**), que apesar de subjetivas, são coerentes com o nível de ocupação observado. Esses coeficientes estão apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Coeficientes de escoamento superficial baseados no coeficiente de aproveitamento de acordo com o Plano Diretor e o Zoneamento Municipal

ZONAS	Coeficiente de Aproveitamento Máximo*	Coeficiente de Escoamento Superficial (runoff)
Zona de Ocupação Controlada	2.4	0,5
Zona de Ocupação Básica	3.6	0,6
Zona de Ocupação Preferencial	4.8	0,7
Zonas Especiais de Negócios Industriais	4.8	0,7

* Plano Diretor Urbanístico de Duque de Caxias, RJ – Anexo IX

3. Desenvolvimento urbano controlado (sustentável)

Visto a importância das conseqüências do processo de impermeabilização decorrente do crescimento urbano no aumento dos problemas de inundações, é sugerido como parte de um projeto de controle de inundações um limite sobre o uso do solo no que diz respeito às taxas de impermeabilização de novo loteamento. Para isso, foram criados valores máximos para o percentual de impermeabilização em lotes de acordo com tipo de ocupação previsto no Zoneamento Urbano de Duque de Caxias.

Os limites estabelecidos para cada zona de ocupação estão apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Percentual da área dos lotes passível de impermeabilização

Taxas máximas de impermeabilização		
Zonas	Ocupação Controlada (ZOC)	40%
	Ocupação Básica (ZOB)	50%
	Ocupação Preferencial (ZOP)	60%
	Especial de Negócios (ZEN)	70%

A partir desses valores foram calculados os coeficientes de escoamento para cada área de ocupação da bacia prevista no Zoneamento Urbano. Para este cálculo foram considerados para áreas permeáveis e impermeáveis os valores de coeficiente de escoamento de 0,2 e 0,9 como referência, respectivamente. A Tabela 5.22 mostra a metodologia de cálculo do coeficiente de escoamento para as zonas de ocupação. O cálculo considerou a composição dos loteamentos como sendo garantida a destinação de 35% da área para usos públicos.

Tabela 5.22 – Metodologia para cálculo do coeficiente de escoamento para as zonas de ocupação na bacia do rio Pilar/Calombé

Coeficiente de escoamento		Cálculo do coeficiente de escoamento (runoff)				
Área permeável	0,2	Área				
Área impermeável	0,9	permeável	impermeável	runoff		
Composição dos Loteamentos		Circulação viária	0%	100%	0,900	
Circulação viária	10%	Obras Públicas	50%	50%	0,550	
Obras Públicas	5%	Parques e áreas livres	90%	10%	0,270	
Parques e áreas livres	20%	Lotes	ZOC	60%	40%	0,480
Lotes	65%		ZOB	50%	50%	0,550
Taxas máximas de impermeabilização (Ti)			ZOP	40%	60%	0,620
Zonas	Ti		ZEN	30%	70%	0,690
Ocupação Controlada (ZOC)	0,4	Coeficiente de escoamento (runoff) por Zona				
Ocupação Básica (ZOB)	0,5	Zonas	runoff			
Ocupação Preferencial (ZOP)	0,6	Ocupação Controlada (ZOC)	0,484			
Especial de Negócios (ZEN)	0,7	Ocupação Básica (ZOB)	0,529			
		Ocupação Preferencial (ZOP)	0,575			
		Especial de Negócios (ZEN)	0,690			

Com os novos coeficientes de escoamento calculados, para realizar a simulação deste cenário foi necessário apenas substituir esses valores no arquivo de entrada de dados do modelo de células.

6. Resultados da Modelagem

No intuito de se tornar mais ágil a leitura dos resultados, é apresentado um item sintetizando todos os cenários simulados, para, em seguida, apresentar os resultados obtidos no processo de modelagem separadamente para cada cenário.

Após a exposição e discussão dos resultados parciais, será apresentada uma comparação entre os cenários a partir de cada resultado, no intuito de possibilitar uma confrontação dos efeitos ocorridos na bacia em resposta aos projetos propostos.

6.1. Resumo dos Cenários Simulados

Neste item é apresentado um resumo das simulações realizadas para modelagem da bacia do rio Pilar/Calombé. Foram cruzados diversos cenários considerando a condição de projeto, o uso e ocupação do solo e a frequência do evento hidrológico (tempo de recorrência). Na Tabela 6.1 estão expostos os cenários de simulação.

Tabela 6.1 – Cenários considerados para simulação hidrodinâmica da bacia em estudo

Condição	Uso e Ocupação do Solo	Evento Hidrológico
0 Diagnóstico da capacidade atual da macrodrenagem	- Atual	- TR10
1 Projeto Convencional de canalização	- Atual - Adensamento urbano de saturação	- TR20
2 Projeto Sustentável com medidas distribuídas	- Adensamento urbano segundo PDU - Desenvolvimento urbano controlado	- TR50

O processo de modelagem consistiu em primeiramente analisar o estado atual da rede de macrodrenagem e avaliar sua capacidade hidráulica frente aos eventos hidrológicos com tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos, permitindo, assim, o diagnóstico das condições atuais de inundações na bacia (**Condição 0** - Diagnóstico da capacidade atual da macrodrenagem).

A partir deste diagnóstico, foram projetados, separadamente, dois conjuntos de intervenções capazes de adequar o sistema de macrodrenagem da bacia para conduzir a cheia decorrente da chuva com recorrência de 20 anos, considerando o estado atual de uso e ocupação do solo. Esses conjuntos de intervenções foram nomeados de acordo com sua concepção original, sendo um primeiro baseado na ação direta sobre a calha dos rios, aumentando suas

capacidades de condução hidráulica por meio da canalização de seus leitos (**Condição 1 - Projeto Convencional de Canalização**) e, um segundo, buscando agir de forma distribuída sobre toda a bacia, através de medidas compensatórias de controle sobre as águas pluviais (**Condição 2 - Projeto Sustentável com medidas distribuídas na bacia**).

Com os conjuntos de intervenções projetadas e garantindo a proteção prevista para o evento com recorrência de 20 anos, partiu-se para a análise das conseqüências de um evento de maior magnitude sobre essas intervenções (evento com recorrência de 50 anos).

Para simular condições urbanas futuras da bacia, foram considerados três possíveis cenários de desenvolvimento, de forma a permitir uma avaliação das conseqüências da urbanização sobre os projetos de controle de inundações propostos. Esses cenários procuram simular as características do crescimento urbano na bacia através dos seguintes processos de adensamento: **de saturação; segundo o Plano Diretor Urbanístico de Duque de Caxias; e controlado.**

6.2. Resultados da Simulação

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelo processo de modelagem, iniciando-se pelo diagnóstico das condições atuais da macrodrenagem da bacia em estudo para, em seguida, apresentar os resultados alcançados pela simulação dos cenários de projeto propostos e as conseqüências do adensamento urbano futuro. Nesta etapa serão discutidos os efeitos da implantação das intervenções propostas por cada projeto na rede de macrodrenagem.

6.2.1. Diagnóstico da Capacidade Atual do Sistema de Macrodrenagem

A simulação das condições atuais da bacia hidrográfica do rio Pilar/Calombé considerando as características de uso e ocupação do solo, a topografia e a batimetria dos rios Pilar e Calombé existentes resultaram em uma série de informações de níveis d'água e vazões que permitem a construção de mapas de inundações da bacia para diferentes cenários hidrológicos (tempos de recorrência).

Pela análise dos mapas de inundação, apresentados na Figura 6.1, na Figura 6.2 e na Figura 6.3, fica nítida a gravidade dos problemas para todos os eventos de chuva simulados, principalmente nas áreas mais baixas da bacia, próximas à confluência dos rios Pilar e Calombé, apresentando regiões com alagamentos superiores a 1,0 metro de profundidade. Na

região mais a montante do rio Calombé ocorre um extravasamento da calha principal do rio para todos os eventos de precipitação, inundando as planícies vizinhas. Isso ocorre em consequência de um estrangulamento na seção transversal do rio no trecho logo a jusante desse extravasamento.

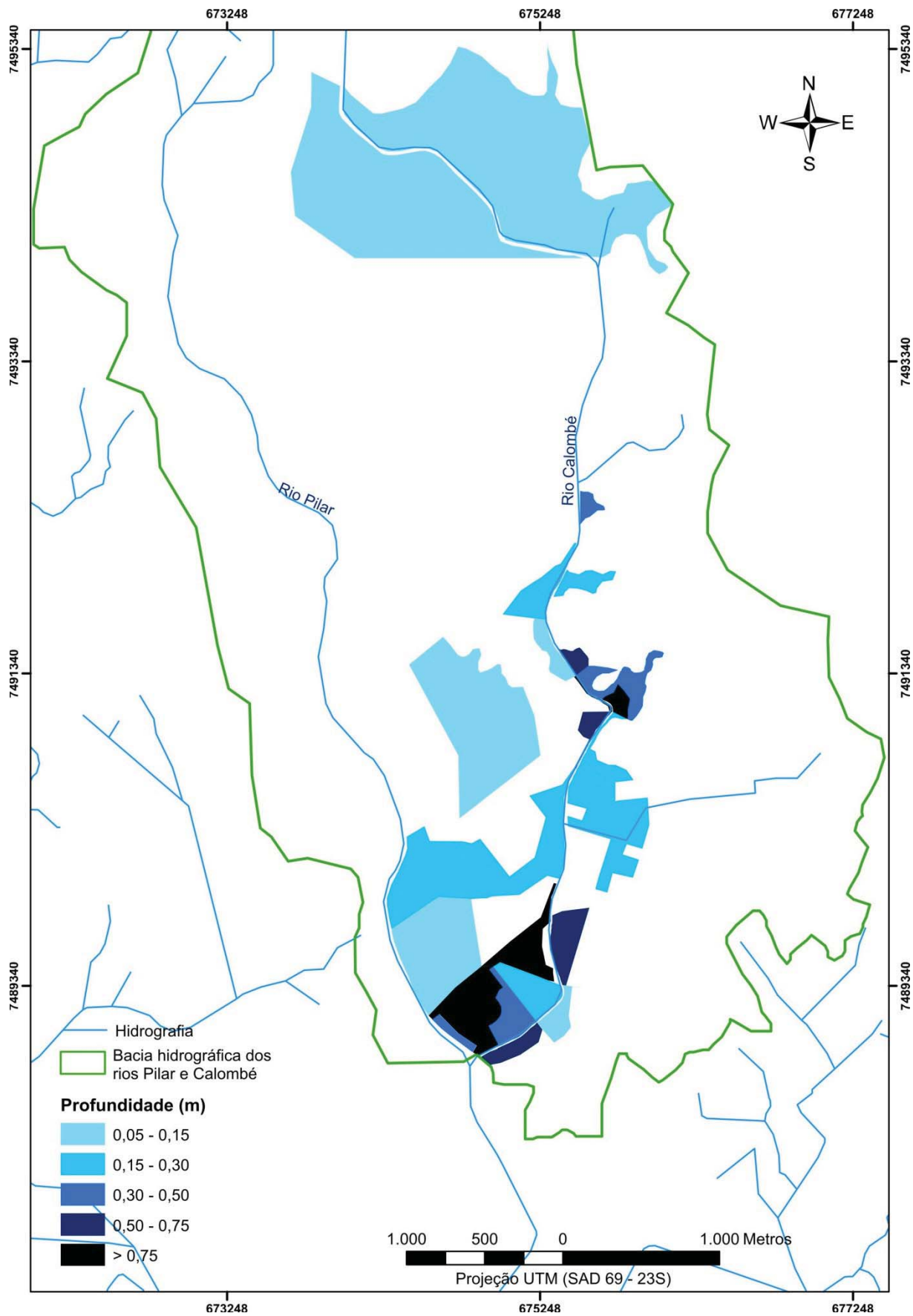


Figura 6.1 – Mapa de Inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos nas condições atuais de uso do solo e da macrodrenagem (Condição 0).

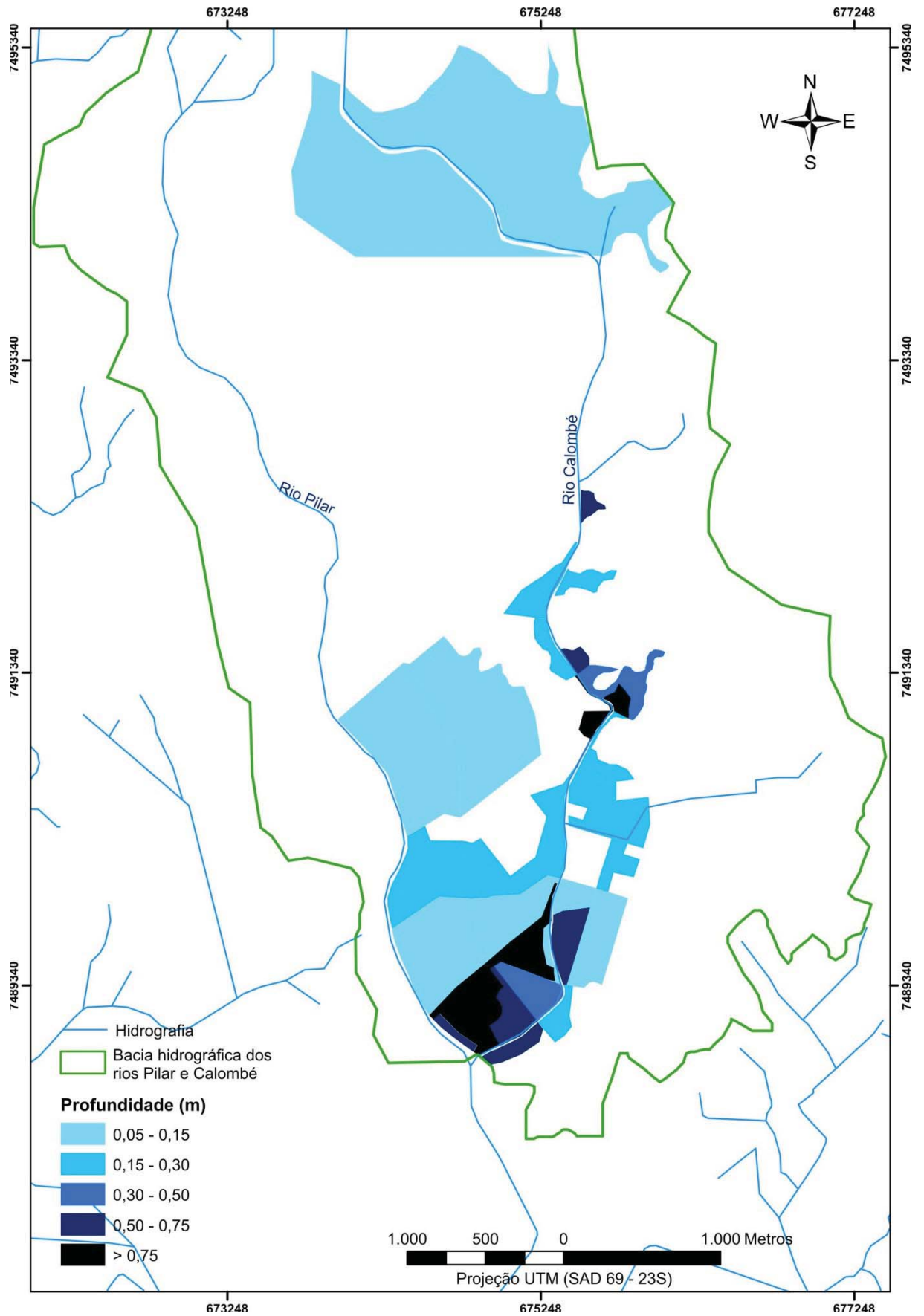


Figura 6.2 – Mapa de Inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 20 anos nas condições atuais de uso do solo e da macrodrenagem (Condição 0).

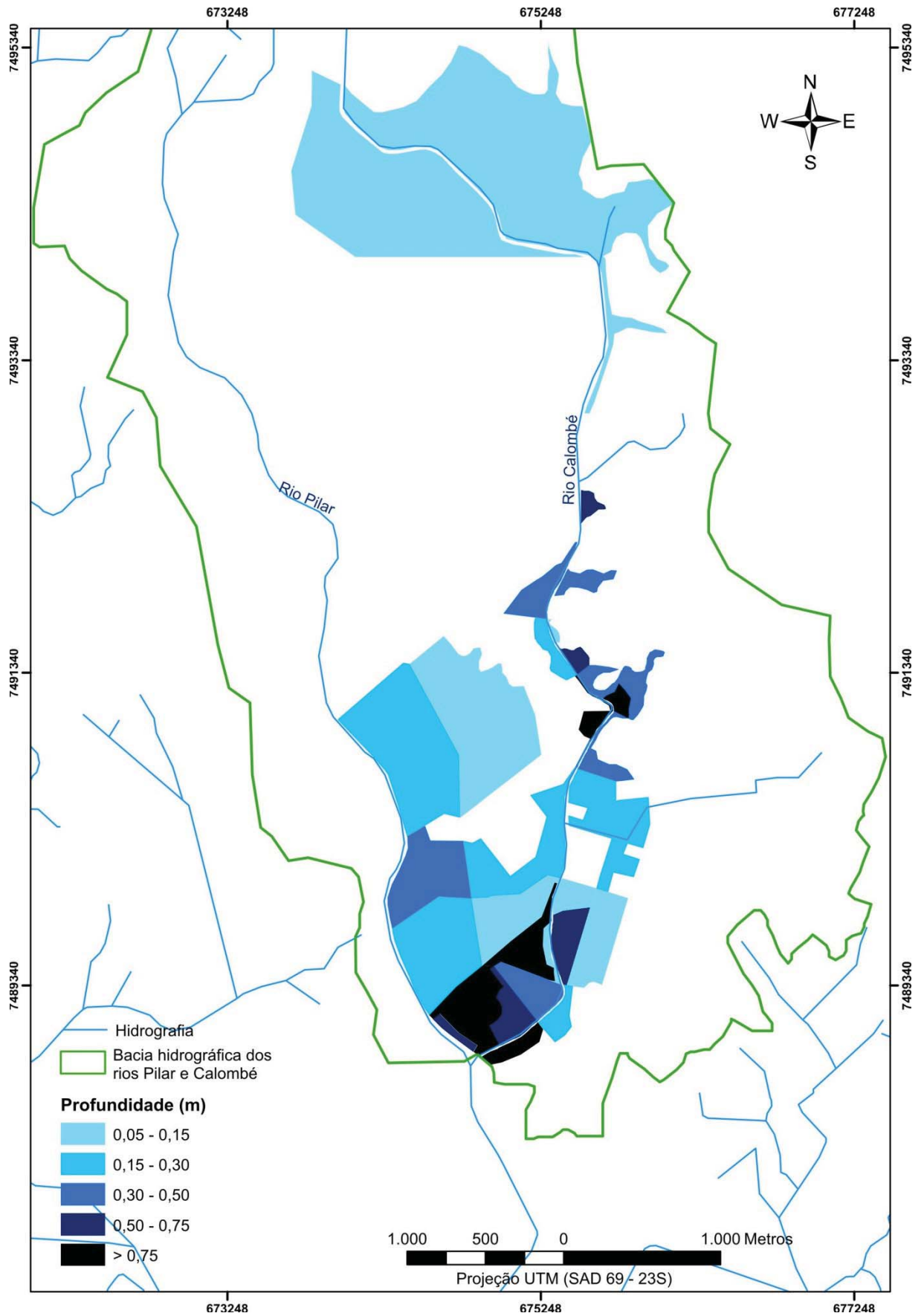


Figura 6.3 – Mapa de Inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 50 anos nas condições atuais de uso do solo e da macrodrenagem (Condição 0).

Na Figura 6.4 são apresentados os gráficos de vazão em alguns trechos do rio Pilar para um evento de chuva com tempo de recorrência de 20 anos. A observação da evolução dos hidrogramas, na medida em que o rio desce, evidencia os efeitos de amortecimento das cheias ocasionados pelo extravasamento da calha principal para as planícies em diversos pontos da macrodrenagem natural. Esse padrão de comportamento é similar para o rio Calombé que também apresenta muitos pontos de extravasamento das águas de seu leito principal.

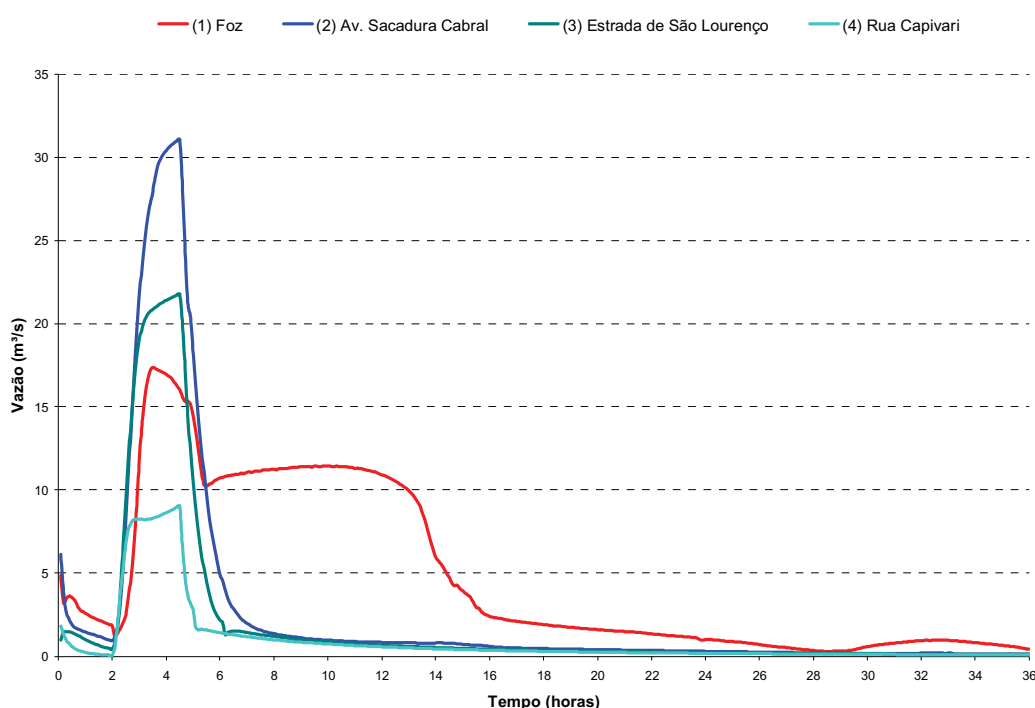


Figura 6.4 – Hidrogramas de cheia do rio Pilar para situação atual

6.2.2. Condição 1 – Solução Convencional de Canalização

O projeto de canalização proposto buscou solucionar os problemas de extravasamento de águas da calha principal dos rios Pilar e Calombé para um evento hidrológico com tempo de recorrência de 20 anos através da implantação de paredes de concreto em ambos os rios. Assim, para os eventos com tempo de recorrência igual ou menor que 20 anos, não existem alagamentos ocasionados pelo transbordamento da macrodrenagem. Em eventos menos frequentes, com maiores tempos de recorrência, a capacidade de condução do canal é ultrapassada, gerando pontos de alagamentos em alguns trechos mais baixos, como pode ser observado na Figura 6.5 que apresenta o mapa de inundações para uma cheia decorrente de uma precipitação com 50 anos de tempo de recorrência.

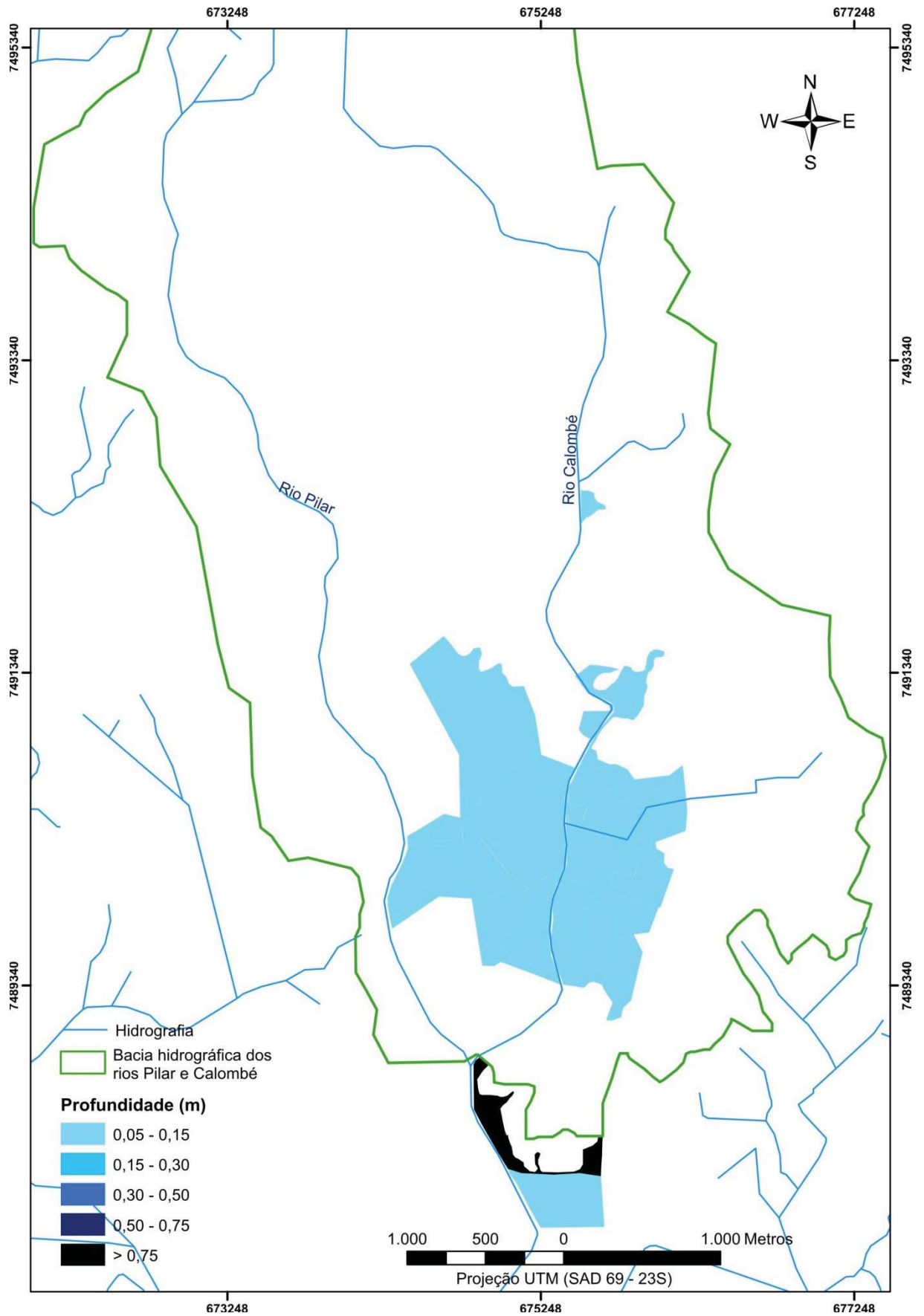


Figura 6.5 – Mapa de Inundação para um evento com tempo de recorrência (TR) de 50 anos nas condições atuais de uso do solo e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

Um efeito conseqüente deste tipo de intervenção, já esperado, é o aumento nos picos de cheia observados na calha do rio após sua canalização. Isso ocorre em conseqüência da eliminação das áreas de extravasamento que funcionam como um reservatório de amortecimento, retirando água do curso principal e retornando essa água aos poucos. Esse efeito pode ser observado na Figura 6.6 apresentada a seguir, na qual estão os hidrogramas resultantes da simulação dos rios Pilar e Calombé antes e depois da implantação do projeto. Um efeito negativo desse aumento nas vazões de cheia é a transferência das inundações para jusante, como pode ser observado no resultado desta simulação. A margem esquerda do rio Pilar, a jusante da confluência com o rio Calombé, passou a sofrer alagamentos em todos os eventos hidrológicos simulados quando se considerou a canalização da macrodrenagem Figura 6.7.

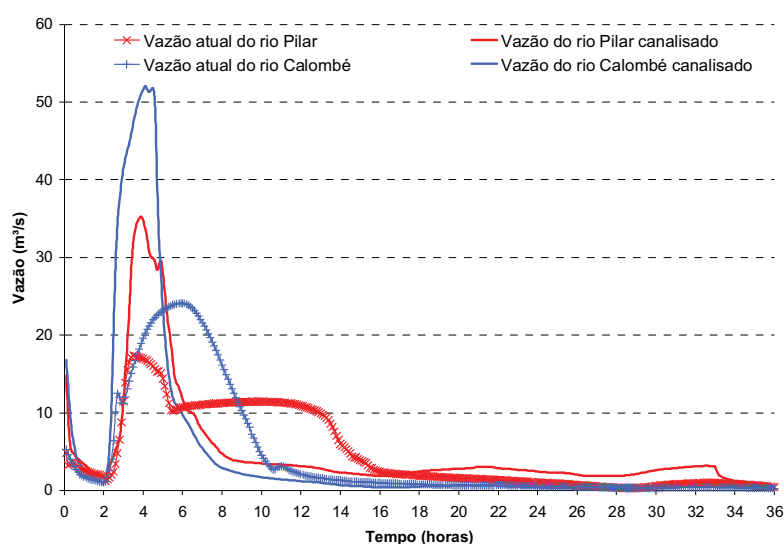


Figura 6.6 – Hidrogramas dos rios Pilar e Calombé para situação atual e de projeto (TR20)

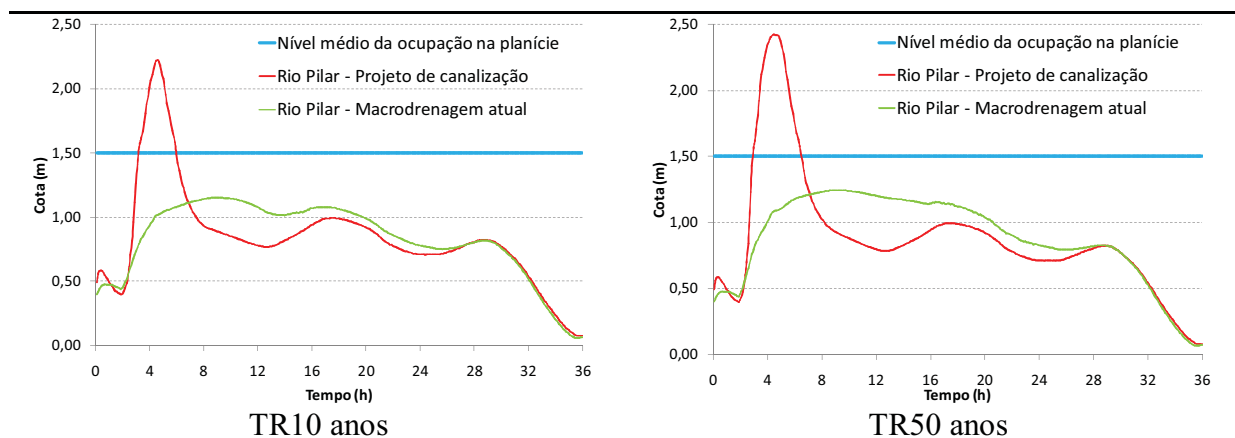


Figura 6.7 – Cotagramas do rio Pilar a jusante da confluência do rio Calombé considerando a situação atual e a canalização da macrodrenagem, para tempos de recorrência de 10 anos e 50 anos.

A simulação dos cenários futuros permitem analisar a importância do controle sobre o processo de urbanização, uma vez que as mudanças introduzidas no uso do solo trazem grandes modificações nas vazões de cheia dos rios, principalmente pelo aumento de áreas impermeabilizadas, fazendo com que a água de chuva chegue à rede de macrodrenagem mais rapidamente e em maiores quantidades.

Para o cenário com adensamento urbano máximo, houve um aumento considerável nos picos de vazão dos hidrogramas de cheia, mostrados na Tabela 6.2. Para ilustrar essas variações foram plotados em dois gráficos, apresentados na Figura 6.8, os hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) resultantes de um evento com tempo de recorrência igual a 20 anos ocorrido na bacia considerando-se as situações de adensamento atual e de saturação. Esse aumento resultou em novos extravasamentos de água da calha do rio, invalidando a própria solução prevista para proteção contra eventos de tempo de recorrência com 20 anos, como demonstrado no mapa de inundações da Figura 6.9. Mesmo para o evento com tempo de recorrência igual a 10 anos, houveram diversos locais com transbordamento do canal, como pode ser observado no mapa apresentado na Figura 6.10.

Tabela 6.2 – Variação da vazão de pico do hidrograma de cheia após adensamento

Tempo de Recorrência	Corpo d'água	Vazão de pico de cheia (m ³ /s)		Variação
		Adensamento urbano Atual	Saturação	
TR10	Pilar	32.61	42.51	30%
	Calombé	59.46	65.60	10%
TR20	Pilar	35.26	43.77	24%
	Calombé	64.51	67.68	5%
TR50	Pilar	37.16	44.81	21%
	Calombé	67.35	69.46	3%

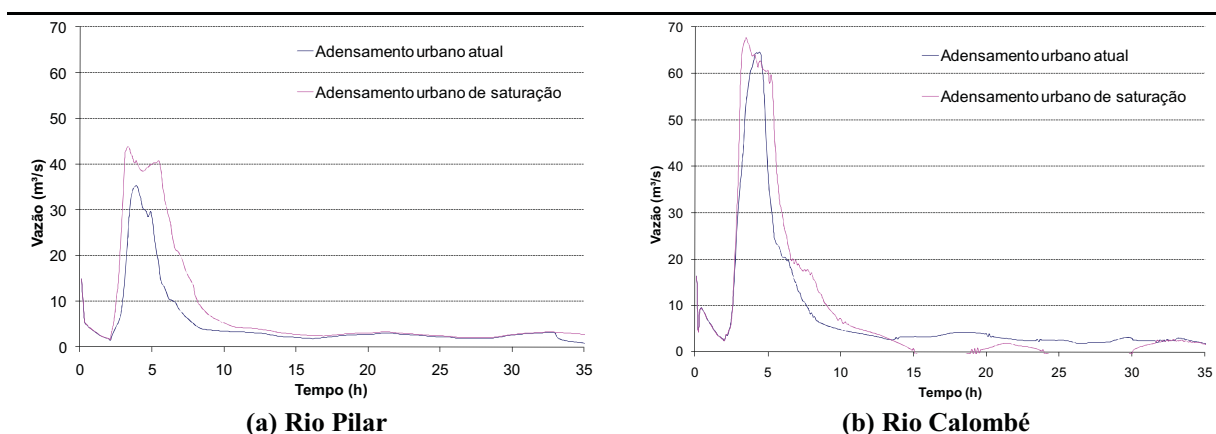


Figura 6.8 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) para adensamento urbano atual e de saturação, TR = 20 anos

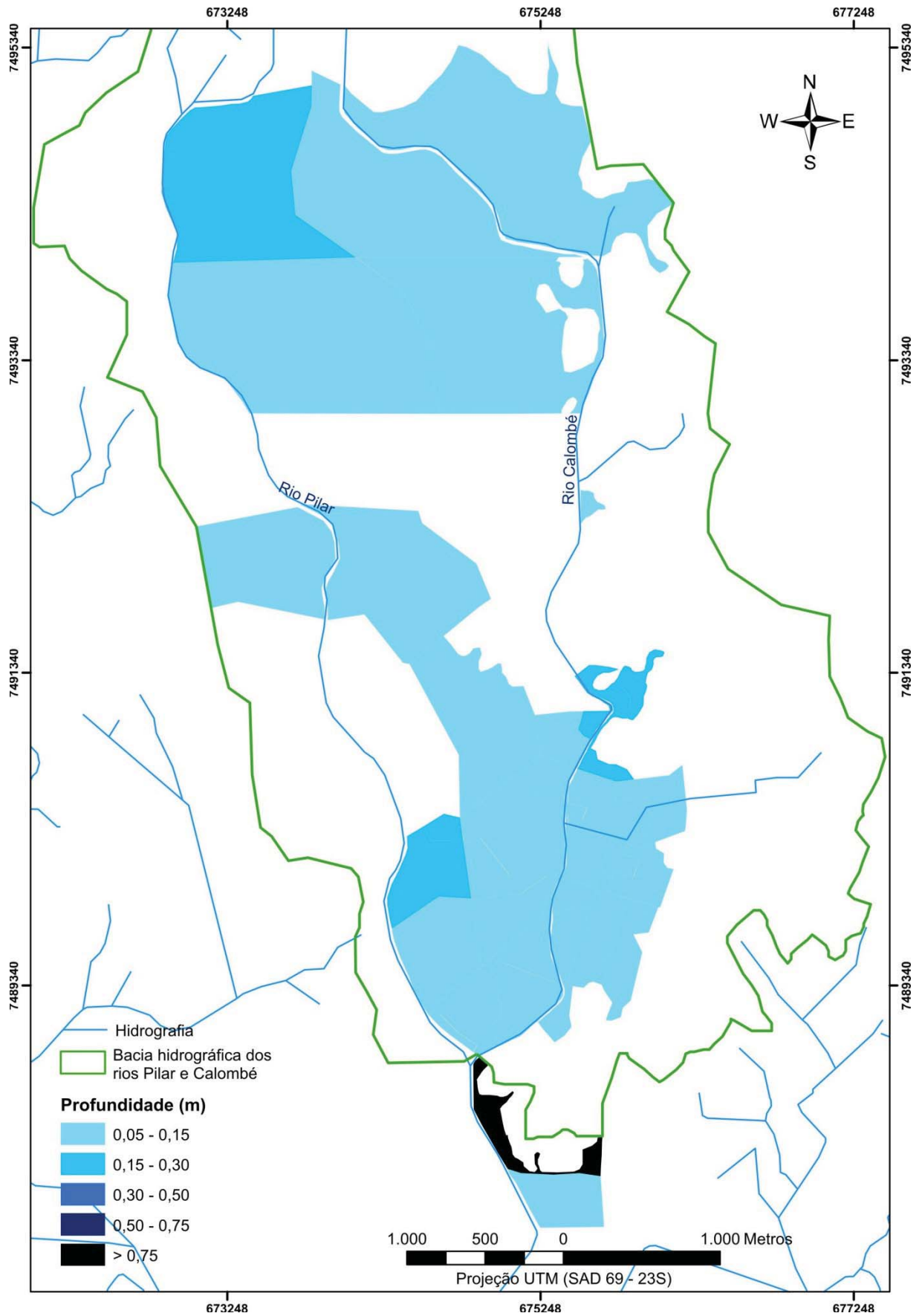


Figura 6.9 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano de saturação e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

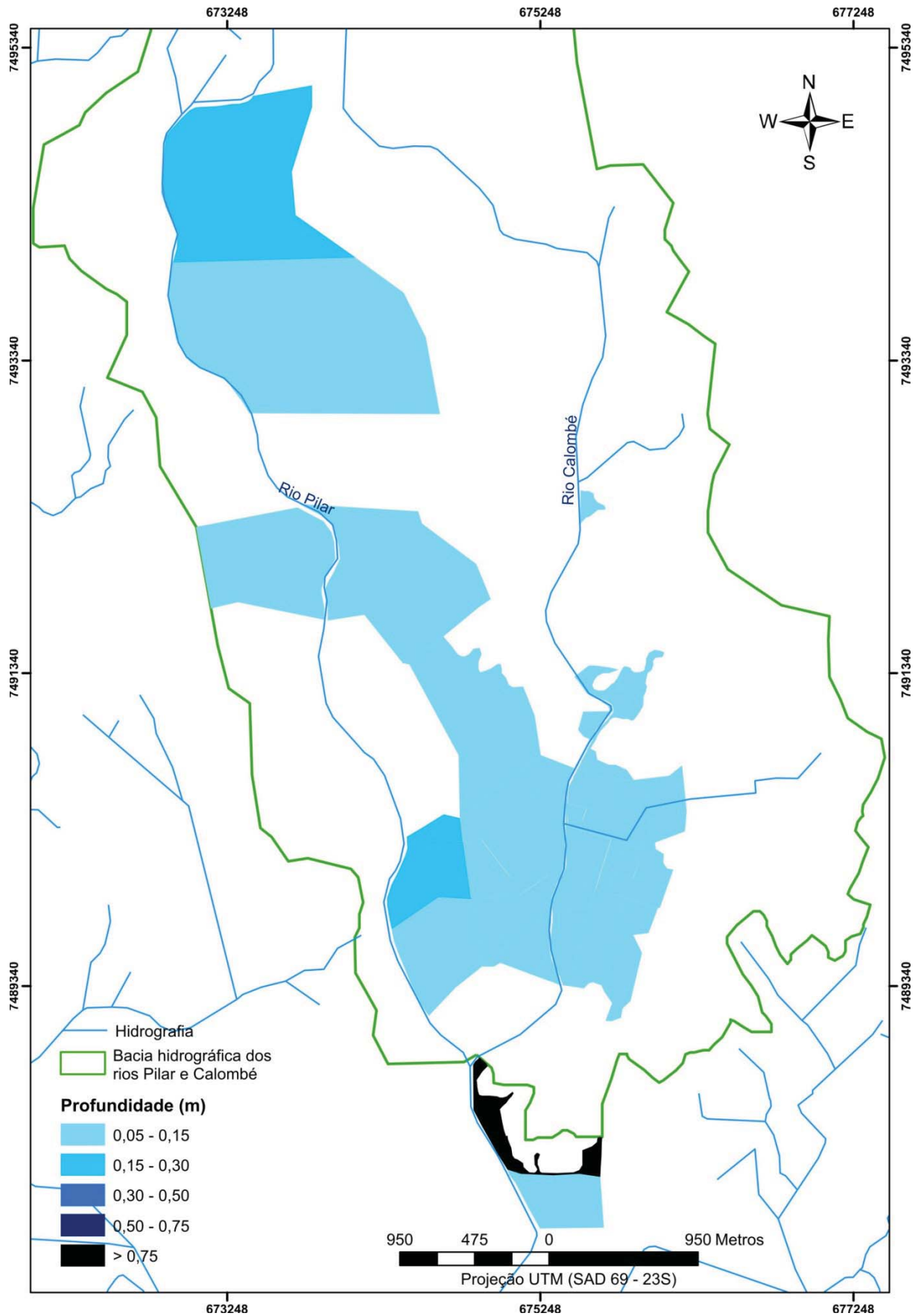


Figura 6.10 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 10 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano de saturação e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

Os resultados mostrados na Tabela 6.2 permitem confirmar que a influência da urbanização sobre os picos de cheia decresce na medida em que se diminui o risco do evento hidrológico considerado. Já a grande diferença entre os valores da variação de vazão dos rios Pilar e Calombé, apresentados na Tabela 6.2, é consequência do diferente grau de urbanização apresentado em cada sub-bacia para a situação atual. O rio Calombé está localizado quase que em toda sua extensão ao lado da Rodovia Washington Luiz (BR-040), justamente na região com maior densidade de ocupação hoje e, por isso, mais impermeável. Por sua vez, a bacia do rio Pilar ainda possui grandes áreas permeáveis, responsáveis por amortecer o hidrograma de cheia. Portanto, o aumento relativo no coeficiente de escoamento será muito maior nas áreas que drenam para o rio Pilar que na bacia do rio Calombé. Essa variação pode ser observada na Tabela 6.3, que apresenta os coeficientes de escoamento para cada célula da bacia nos cenários de ocupação do solo atual e futuros. Pela análise desta tabela fica possível calcular a variação média no coeficiente de escoamento para cada sub-bacia, que para o cenário de **adensamento urbano de saturação**, apresenta um acréscimo médio de 93,32% no coeficiente de escoamento na bacia do rio Pilar e de 27,65% na bacia do rio Calombé.

No cenário simulado com as condições de uso e ocupação do solo representativas de um desenvolvimento com **adensamento urbano segundo o Plano Diretor Urbano** do município de Duque de Caxias há uma menor variação nos coeficientes de escoamento, porém essa variação já é suficiente para intensificar as vazões de pico dos rios de forma a gerar extravasamentos da calha em diversos pontos, invalidando a solução de canalização prevista. Neste cenário as vazões de pico dos rios Pilar e Calombé recebem um incremento de 15% e 2% respectivamente (Figura 6.11), sendo mais significativas, portanto, as modificações ocorridas na bacia do rio Pilar.

Os mapas de inundações construídos a partir dos resultados da simulação deste cenário, para os tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Figura 6.12, na Figura 6.13 e na Figura 6.14, respectivamente.

Tabela 6.3 - Variação do coeficiente de escoamento para os cenários futuros em relação à condição atual de uso e ocupação do solo

Célula		Coeficiente de escoamento e variação						
		Atual	Adensamento Futuro				Controlado	%
			Saturação	%	PDU *	%		
Sub-bacia do rio Pilar	502	0.316	0.685	117.09	0.350	10.92	0.350	10.92
	511	0.312	0.685	119.20	0.599	91.52	0.591	89.25
	521	0.370	0.685	85.30	0.599	61.90	0.591	59.98
	531	0.483	0.685	41.89	0.634	31.22	0.625	29.54
	541	0.489	0.685	40.18	0.595	21.76	0.588	20.33
	542	0.300	0.685	128.33	0.350	16.67	0.350	16.67
	551	0.543	0.685	26.05	0.662	21.73	0.653	20.09
	552	0.300	0.685	128.33	0.398	32.67	0.393	30.96
	561	0.437	0.685	56.70	0.519	18.71	0.506	15.84
	562	0.314	0.685	117.96	0.454	44.43	0.443	40.91
	571	0.393	0.685	74.41	0.485	23.52	0.471	19.85
	572	0.303	0.685	126.38	0.421	39.22	0.414	36.71
	580	0.316	0.685	117.02	0.492	55.81	0.477	51.02
	581	0.350	0.685	95.89	0.500	42.98	0.484	38.41
582	0.304	0.685	125.13	0.497	63.34	0.481	58.19	
Sub-bacia do rio Calombé	601	0.351	0.685	94.92	0.640	81.98	0.631	79.62
	602	0.608	0.685	12.60	0.595	-2.20	0.525	-13.64
	611	0.480	0.685	42.66	0.700	45.79	0.690	43.70
	612	0.626	0.685	9.40	0.600	-4.18	0.529	-15.52
	621	0.374	0.685	83.16	0.700	87.17	0.690	84.50
	622	0.549	0.685	24.67	0.700	27.40	0.690	25.58
	624	0.626	0.685	9.35	0.680	8.52	0.658	4.96
	625	0.487	0.685	40.65	0.482	-1.02	0.435	-10.70
	631	0.494	0.685	38.70	0.700	41.74	0.690	39.71
	632	0.637	0.685	7.49	0.700	9.84	0.690	8.27
	633	0.541	0.685	26.54	0.700	29.31	0.690	27.47
	634	0.553	0.685	23.77	0.594	7.37	0.507	-8.39
	641	0.619	0.685	10.63	0.700	13.06	0.690	11.44
	642	0.685	0.685	0.00	0.649	-5.19	0.609	-11.16
	643	0.676	0.685	1.34	0.700	3.56	0.575	-14.93
	651	0.625	0.685	9.57	0.700	11.97	0.690	10.37
	652	0.665	0.685	3.00	0.690	3.79	0.674	1.39
	661	0.645	0.685	6.19	0.700	8.51	0.690	6.96
	662	0.657	0.685	4.19	0.700	6.47	0.690	4.95
	663	0.674	0.685	1.66	0.700	3.89	0.610	-9.54
	671	0.607	0.685	12.81	0.700	15.28	0.690	13.63
	672	0.623	0.685	9.94	0.700	12.35	0.690	10.74
	673	0.669	0.685	2.42	0.700	4.67	0.615	-8.00
	681	0.570	0.685	20.25	0.549	-3.67	0.534	-6.22
682	0.635	0.685	7.81	0.529	-16.72	0.509	-19.87	
691	0.451	0.685	51.94	0.500	10.90	0.484	7.35	
692	0.586	0.685	16.95	0.500	-14.64	0.484	-17.37	
700	0.339	0.685	101.87	0.448	32.12	0.438	29.03	
701	0.343	0.685	99.94	0.500	45.94	0.484	41.27	
702	0.442	0.685	55.03	0.480	8.66	0.466	5.52	

* Plano Diretor Urbano

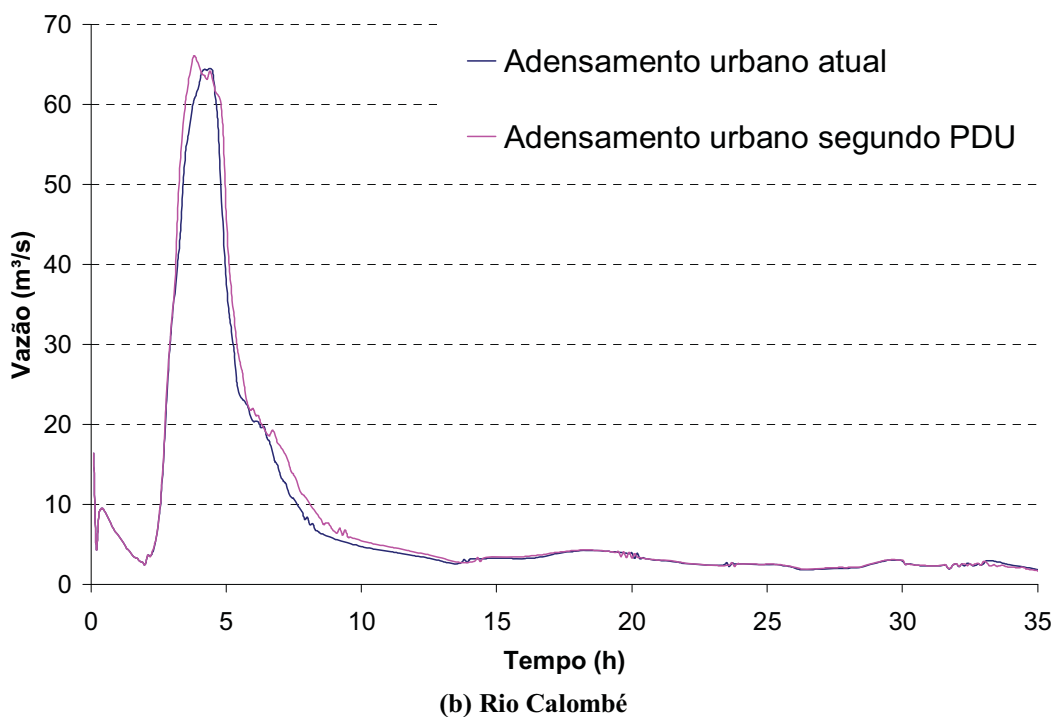
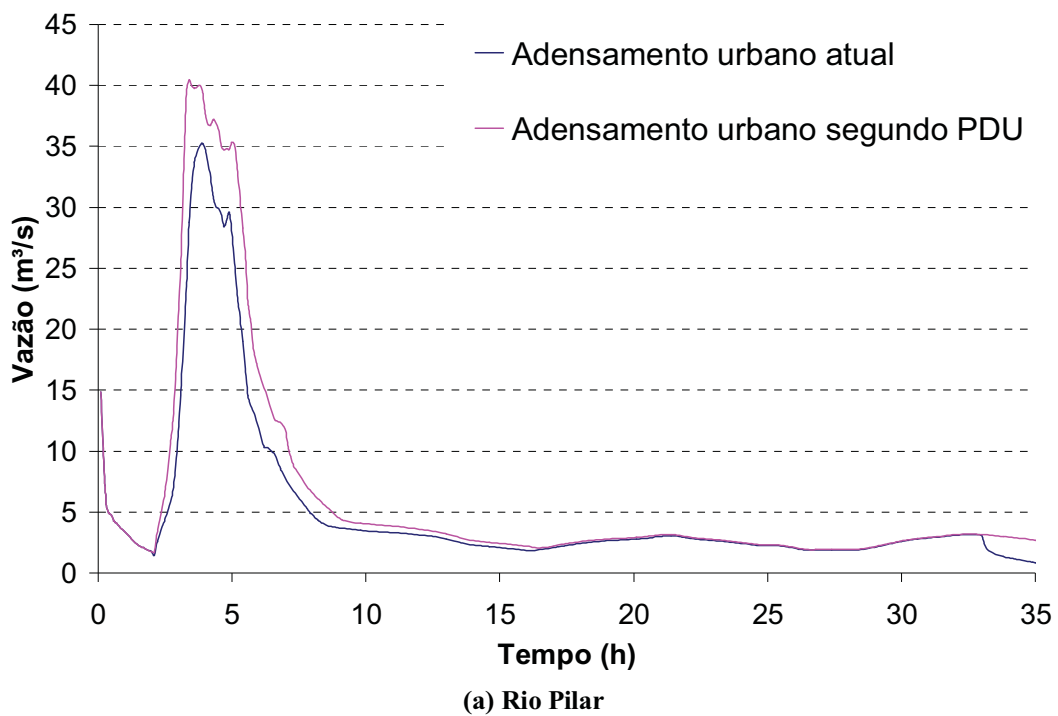


Figura 6.11 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) para adensamento urbano atual e segundo o PDU, TR = 20 anos

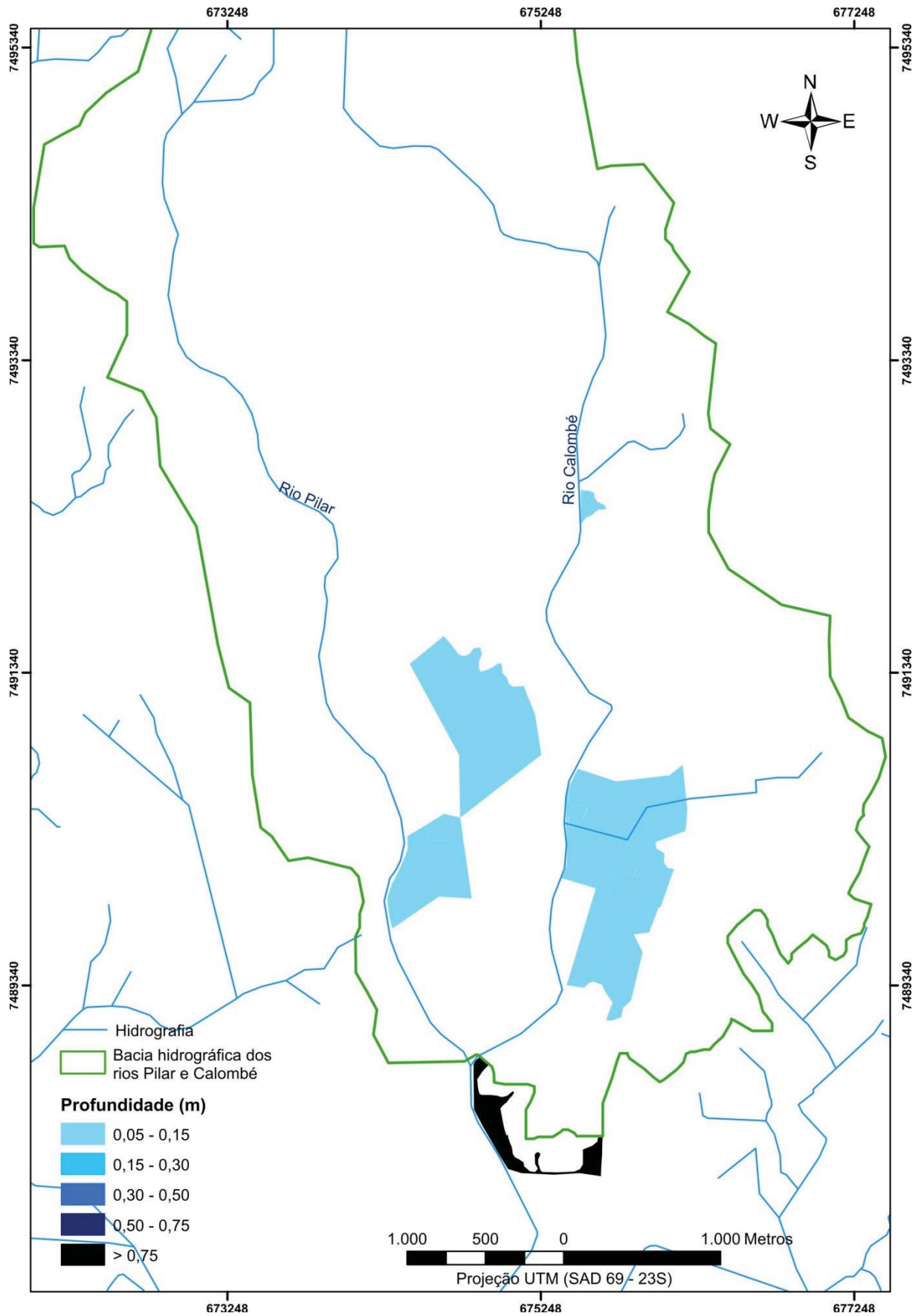


Figura 6.12 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 10 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano segundo PDU e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

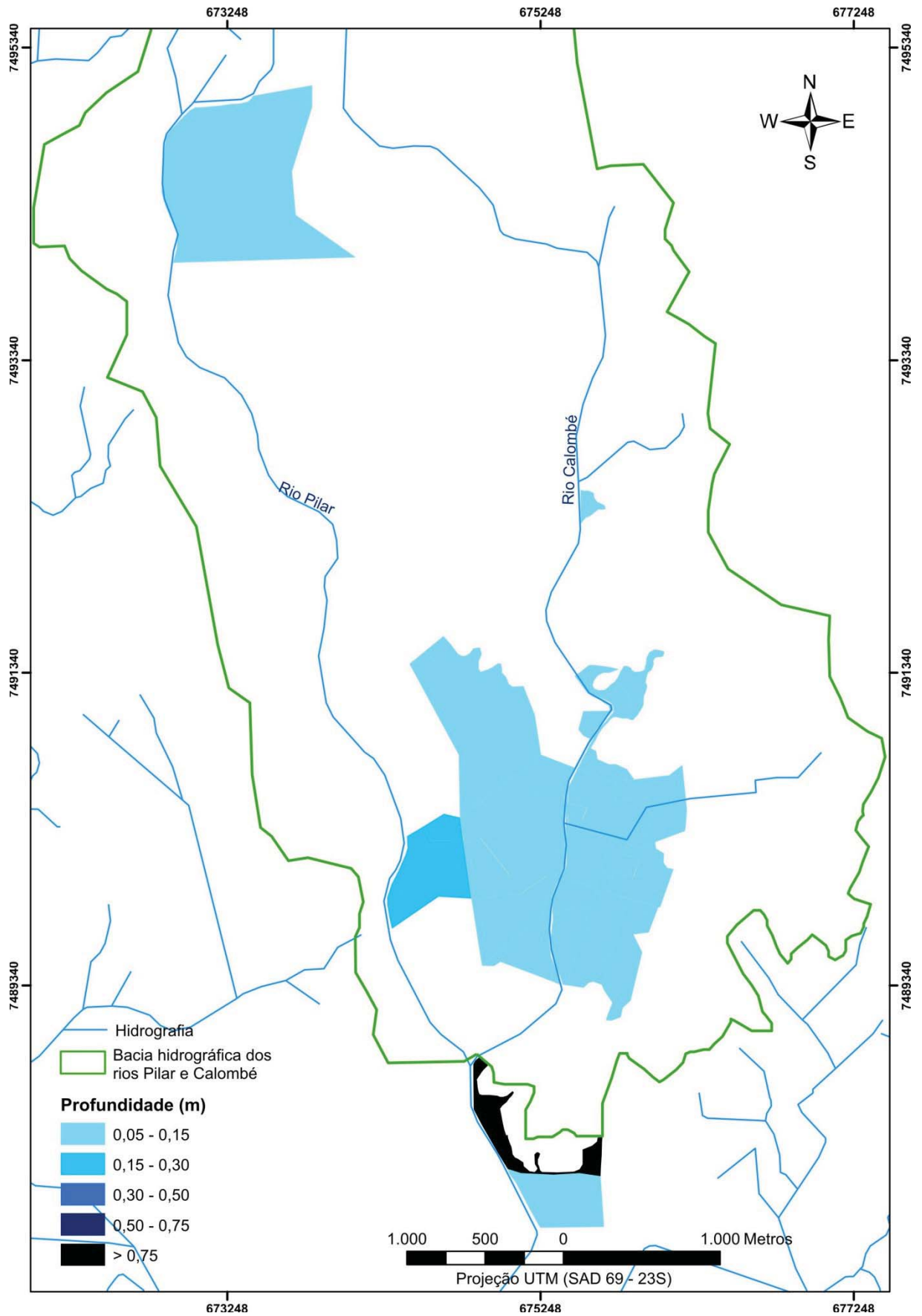


Figura 6.13 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano segundo PDU e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

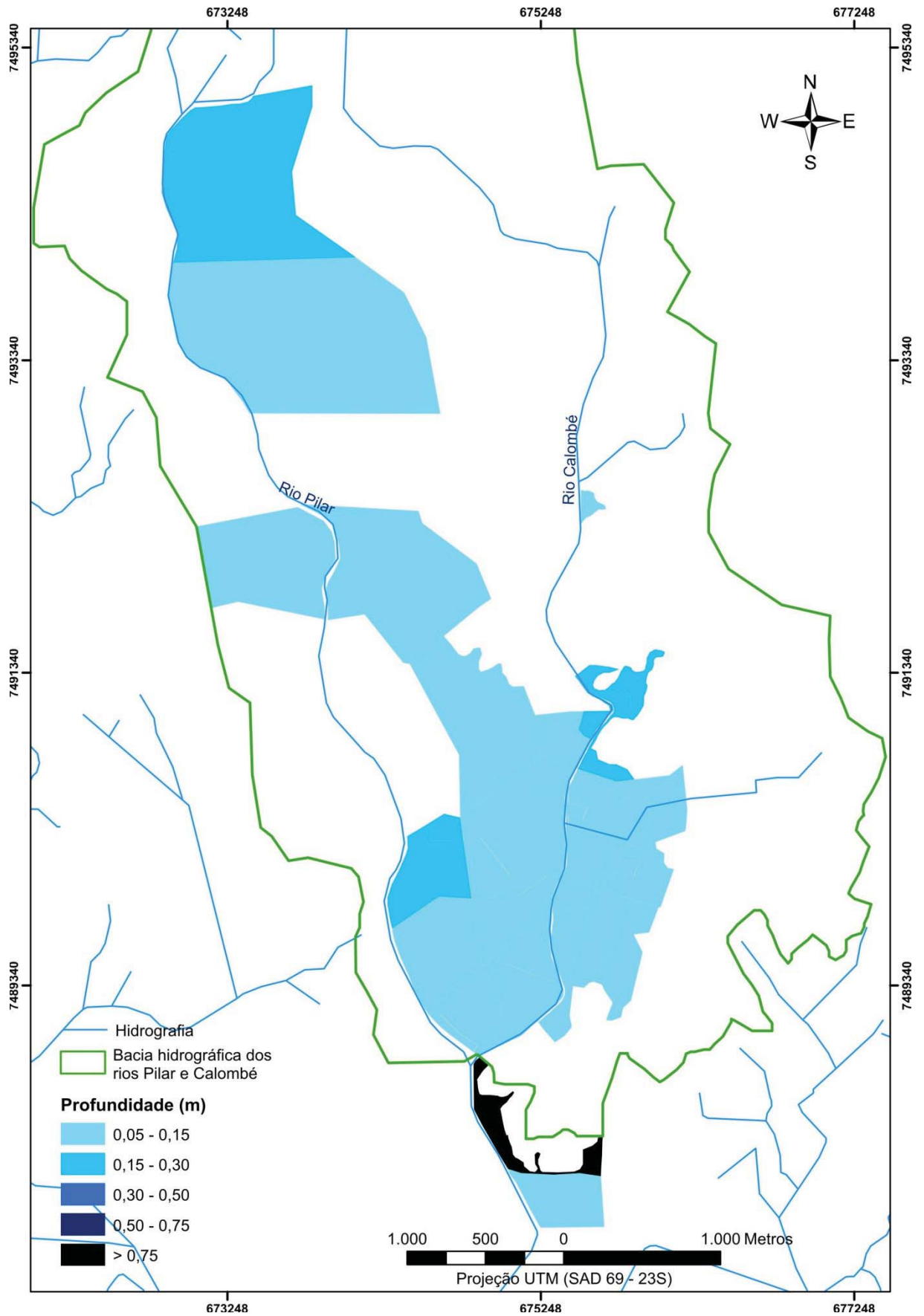


Figura 6.14 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 50 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano segundo PDU e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

Quando considerado um controle sobre as taxas de impermeabilização na bacia, para a simulação do cenário com **adensamento urbano controlado**, o aumento no pico das vazões de cheia do rio Pilar foi inferior aos outros dois cenários futuros, sendo quase que nulo para o rio Calombé, na seção logo a montante da confluência com o rio Pilar. Esse resultado é consequência de uma menor variação no coeficiente de escoamento nas células localizadas na bacia do rio Calombé, que em média variaram 10%, sendo que em alguns casos o valor foi menor que o valor atual. A variação média do coeficiente de escoamento para a bacia do rio Pilar chegou a 35%. Na Figura 6.15 estão os hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) resultantes da simulação de um evento hidrológico com 20 anos de recorrência. Outro fator que contribui para a pequena variação no hidrograma de cheia do rio Calombé é a maior ocorrência de extravasamentos da calha principal do rio para as planícies em ambos os cenários, o que acaba amortecendo as vazões de cheia.

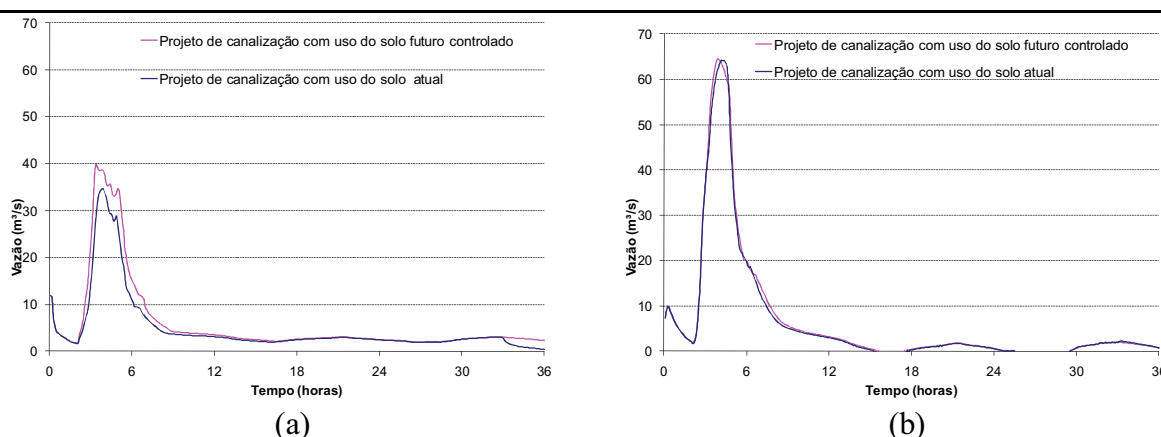


Figura 6.15 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) para adensamento urbano atual e controlado, TR = 20 anos

Apesar do controle sobre o uso do solo, a situação de extravasamento do rio Pilar, a jusante da confluência com o rio Calombé, permaneceu ocorrendo. Esses resultados estão apresentados nos cotogramas da Figura 6.16, para eventos hidrológicos com tempo de recorrência de 10 anos e 50 anos.

Os mapas de inundação desse cenário podem ser vistos na Figura 6.17 para um evento com tempo de recorrência (TR) de 10 anos, na Figura 6.18 para um TR de 20 anos e na Figura 6.19 para um TR de 50 anos. É possível ver que a pequena variação nas vazões foi capaz de causar inúmeros pontos de inundação, mesmo quando considerada a chuva com tempo de recorrência de 10 anos.

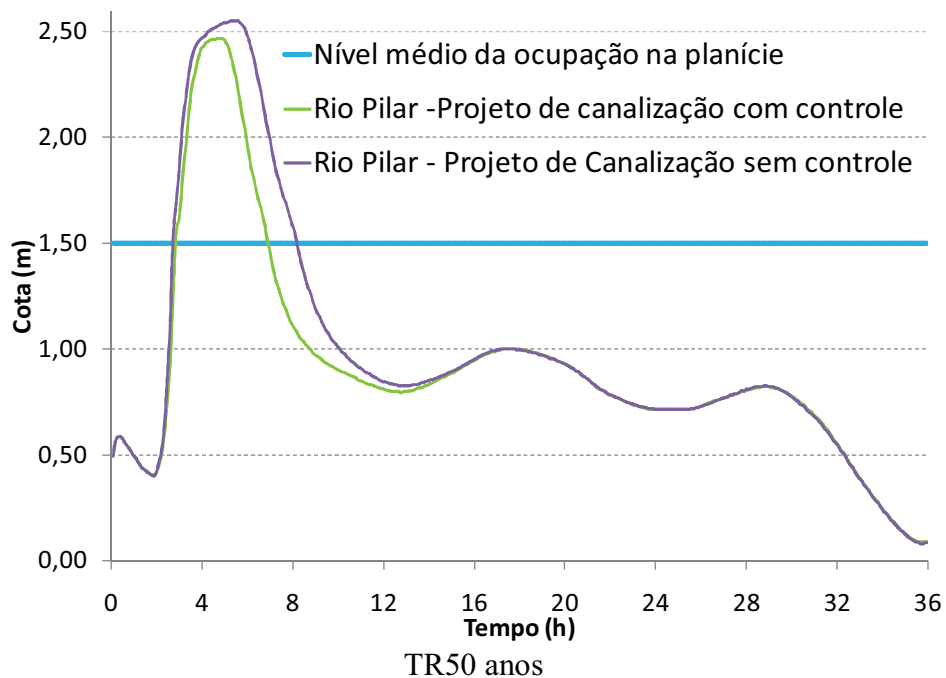
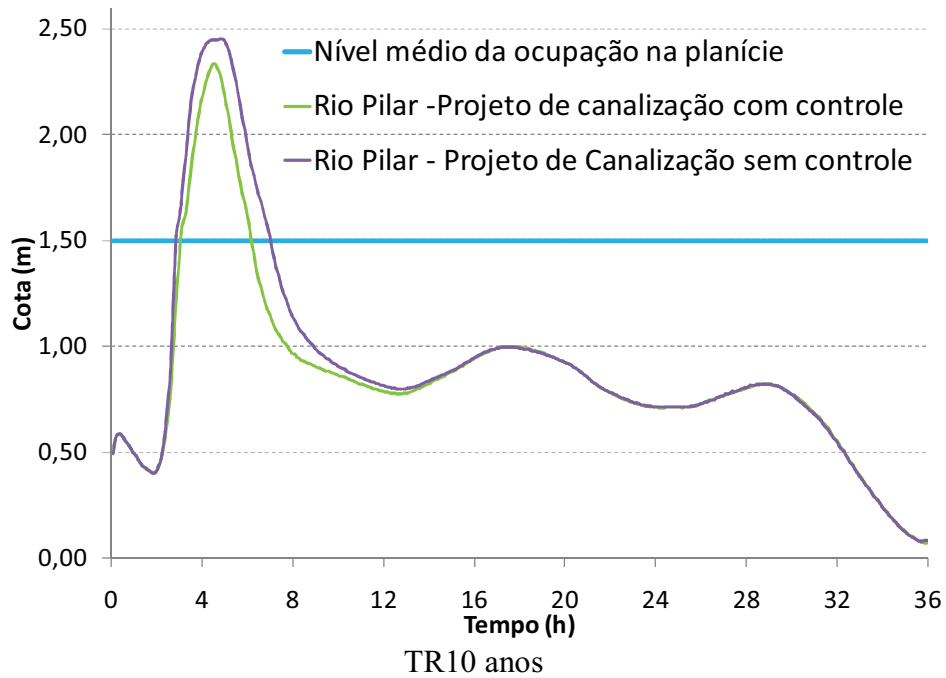


Figura 6.16 – Cotagramas do rio Pilar a jusante da confluência com o rio Calombé com projeto de canalização implantado, considerando cenários futuros de adensamento urbano controlado e saturado.

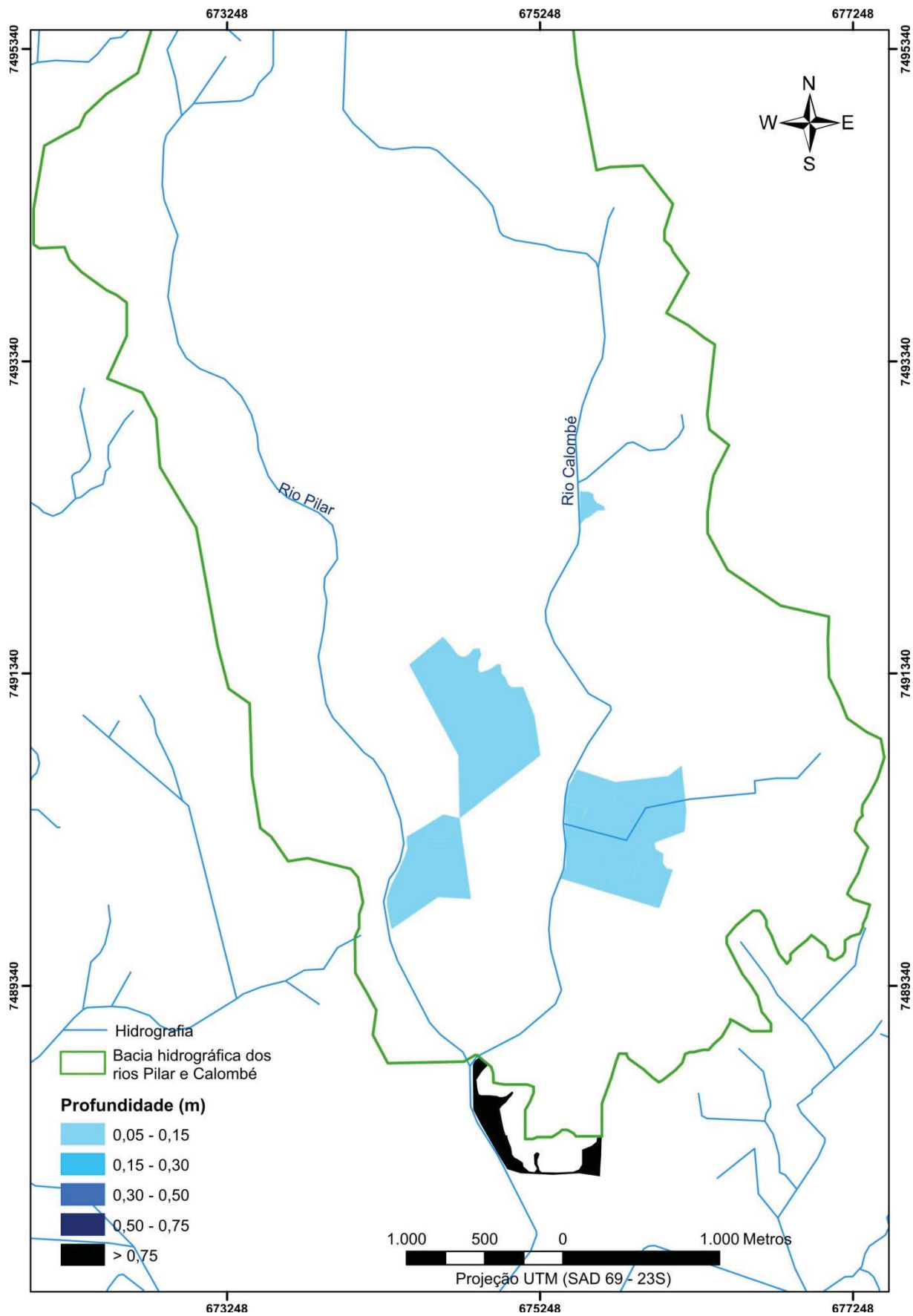


Figura 6.17 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 10 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano controlado e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

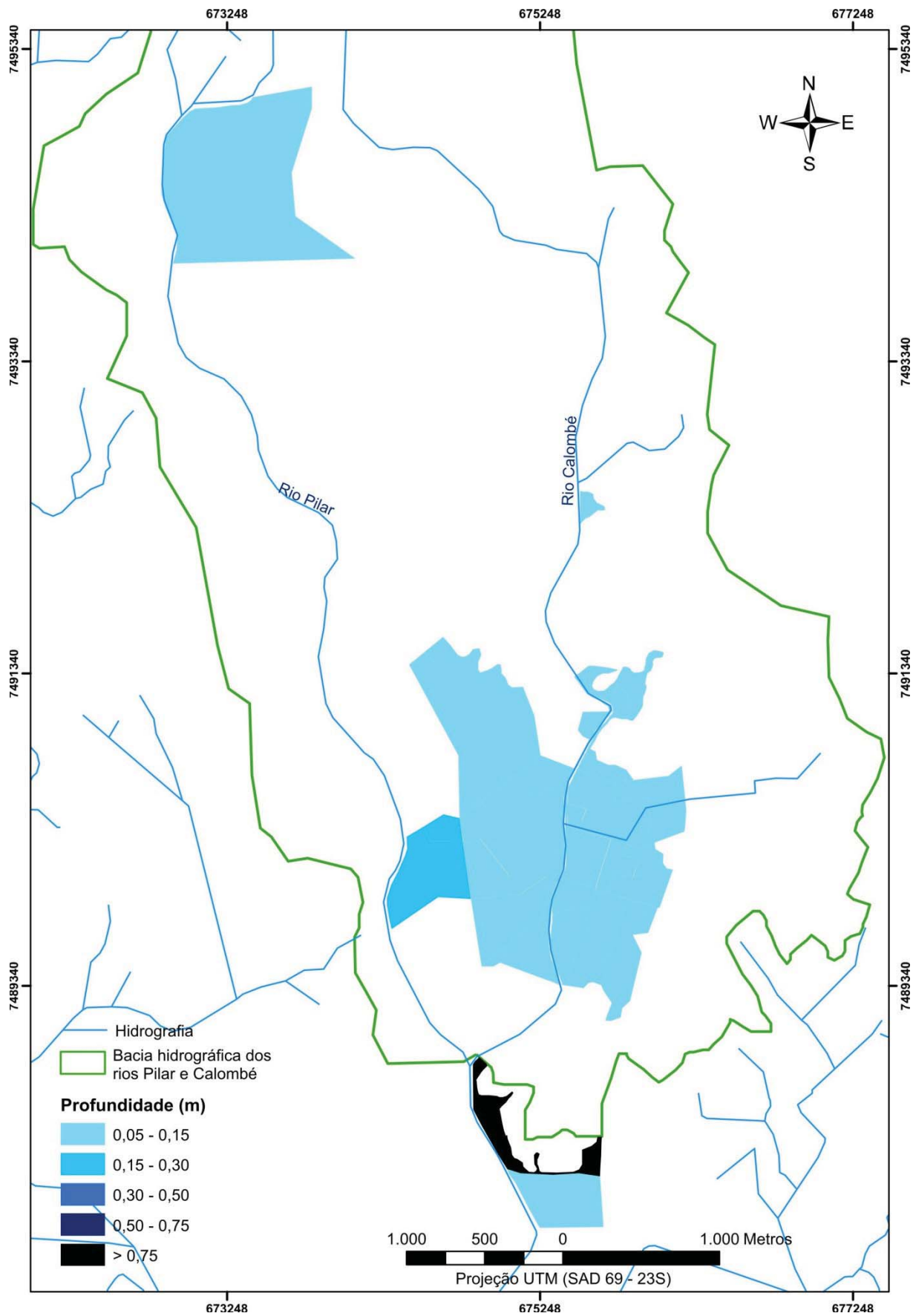


Figura 6.18 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano controlado e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

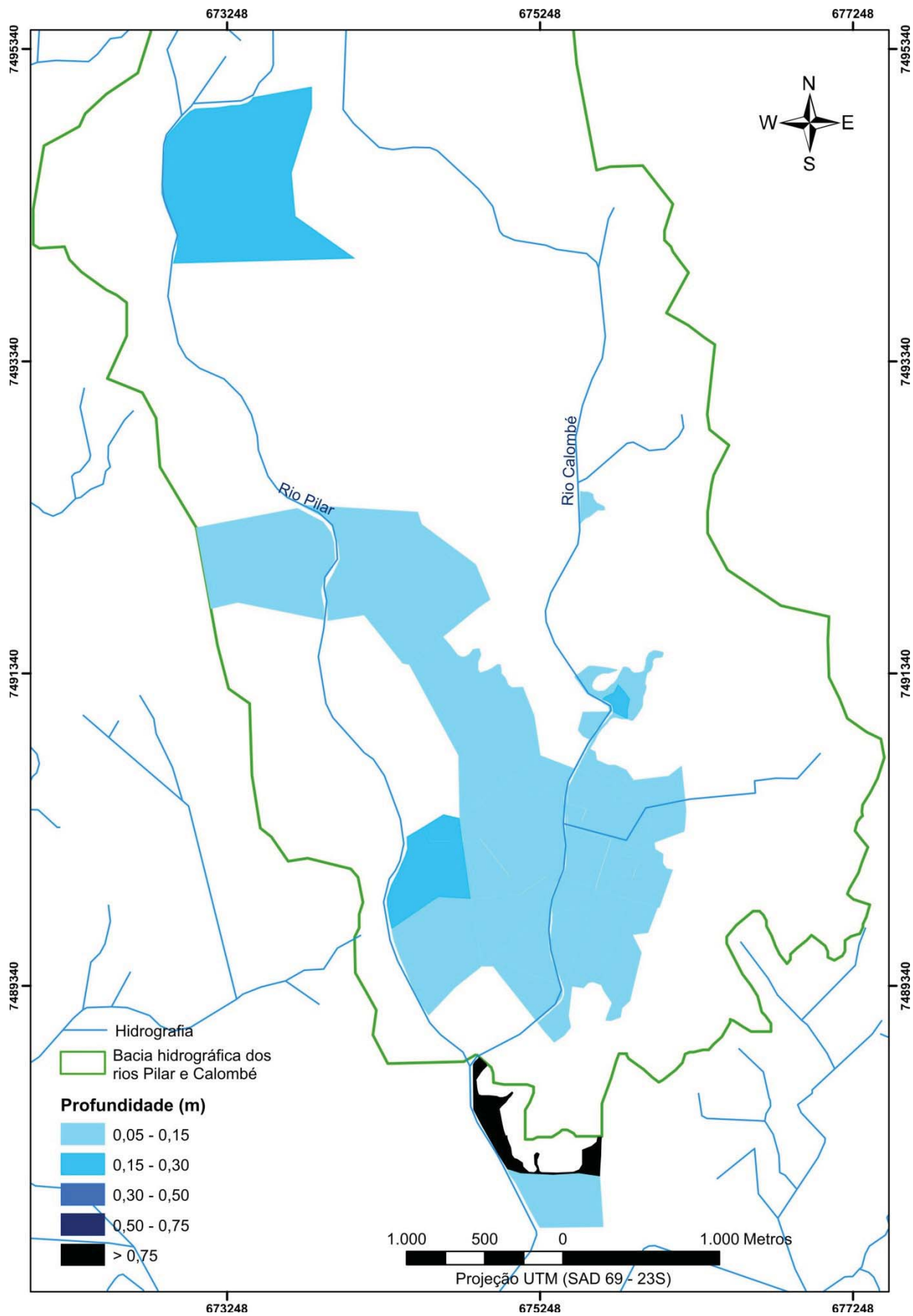


Figura 6.19 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 50 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano controlado e canalização da macrodrenagem (Condição 1).

6.2.3. Condição 2 – Projeto Sustentável com uso de Medidas Distribuídas na Bacia

Para elaboração do projeto de controle de inundações com utilização de medidas distribuídas na bacia foram considerados quatro grupos de intervenções, de acordo com sua localização e efeito esperado, como foi discutido no **Item 6.4.7**. Essas intervenções foram:

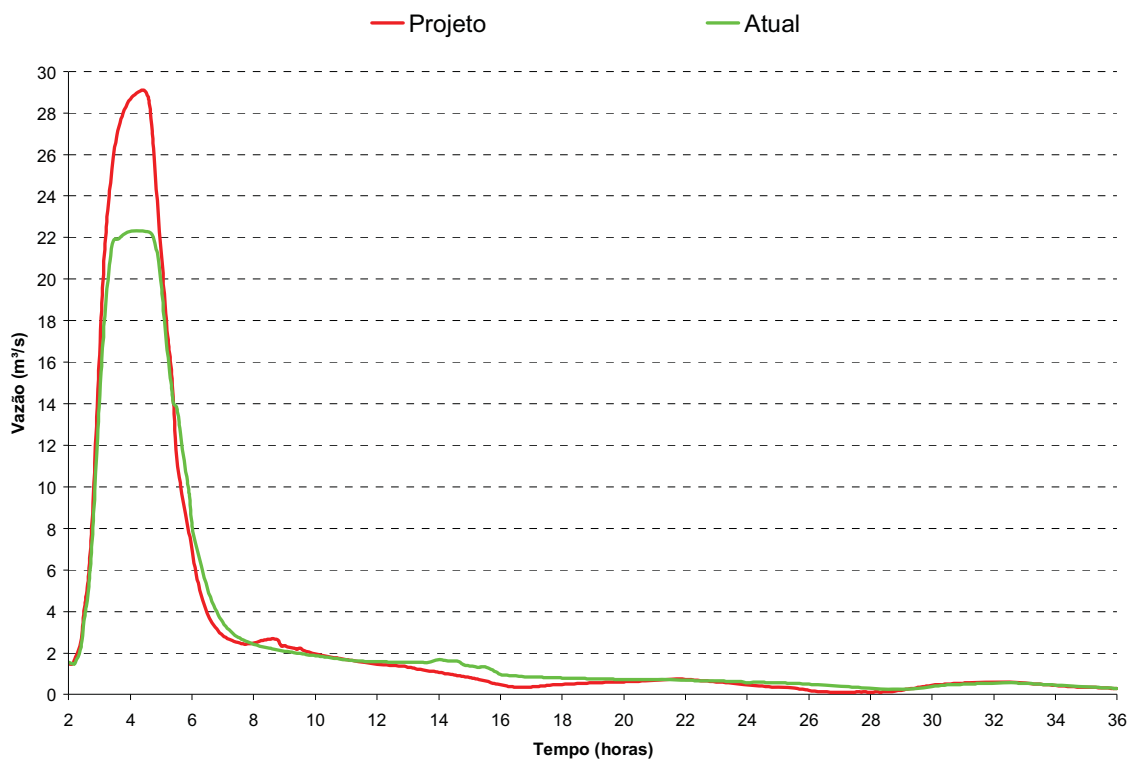
- ✓ implantação de seção de projeto na calha principal dos rios Pilar e Calombé;
- ✓ implantação de reservatórios de detenção em áreas públicas como praças e parques;
- ✓ recuperação da cobertura vegetal em áreas estratégicas (encostas);
- ✓ recuperação das áreas de inundação natural dos rios (várzeas) e implantação de parques fluviais.

Para uma melhor compreensão dos efeitos de cada tipo de intervenção proposta neste cenário, os resultados serão apresentados separadamente, considerando apenas uma medida de controle adotada de cada vez. Finalmente serão apresentados os resultados da combinação de todas as intervenções implantadas na bacia funcionando simultaneamente.

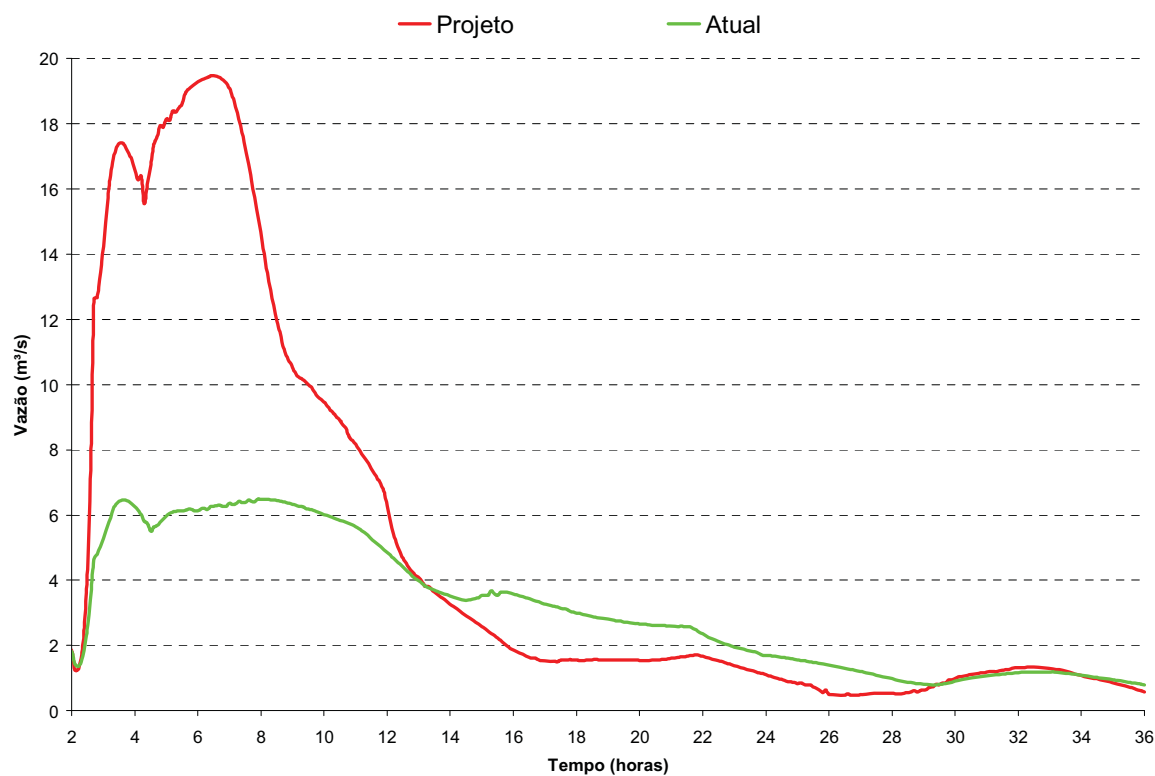
Implantação de seção de projeto na calha principal dos rios Pilar e Calombé

A limpeza e dragagem dos rios Pilar e Calombé, considerando as seções de projeto apresentadas anteriormente, resultaram, como esperado, em uma intensificação dos picos do hidrograma de cheia dos rios como apresentado na Figura 6.20, chegando a um aumento de 30% e 200%, respectivamente para o rio Pilar e para o Calombé. Isso se deve ao aumento da condutividade hidráulica da calha principal, minimizando os extravasamentos para as planícies. Esses resultados mostram que havia grande quantidade de água fora da calha, causando inundações. Assim, apesar de não solucionar os problemas de inundações, a simples implantação da seção de projetos nos rios já é suficiente para se obter uma melhora no quadro de inundações da bacia.

A Figura 6.21 apresenta o mapa de inundações para uma cheia decorrente de um evento hidrológico com 20 anos de tempo de recorrência, para o cenário simulado. Neste mapa é possível observarmos a melhora no quadro de inundações, reduzindo a mancha e as profundidades de inundação alcançadas nas planícies.



(a) Rio Pilar – 1.000 metros a montante da confluência com o rio Calombé



(b) Rio Calombé – 800 metros a montante da confluência com o rio Pilar

Figura 6.20 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) considerando o estado atual da calha principal e com as seções de projeto implantadas. Chuva com TR de 20 anos.

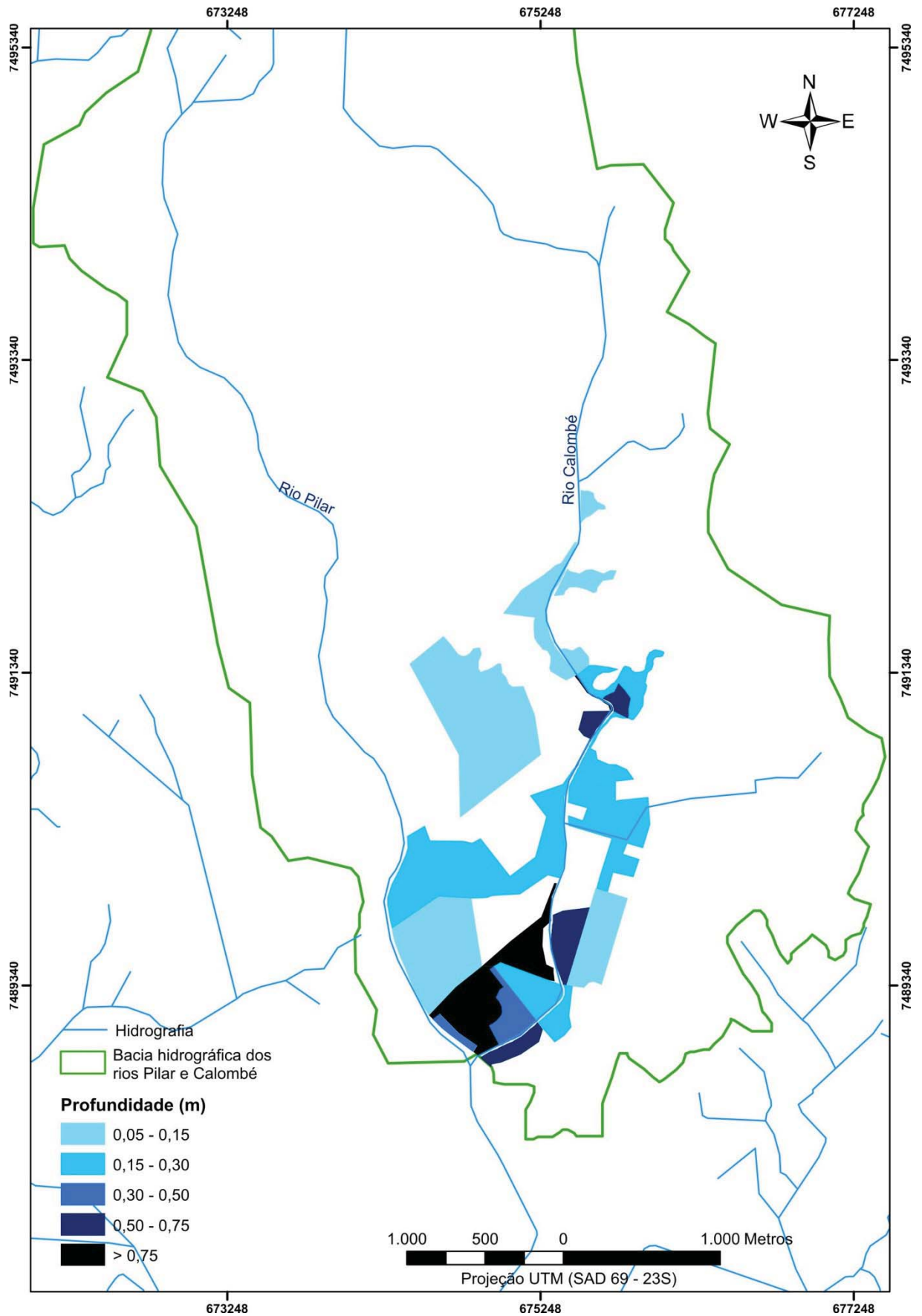


Figura 6.21 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano atual e implantação de seção de projeto.

Implantação de reservatórios de retenção em áreas públicas como praças e parques.

Considerada a limpeza e a implantação de seção de projeto na calha dos rios Pilar e Calombé, foram simulados os efeitos da instalação de reservatórios de retenção em parques e áreas públicas, no intuito de amortecer o escoamento pluvial nas planícies urbanas antes que alcance a rede de macrodrenagem.

A implantação de reservatórios de retenção em praças e parques públicos visa compensar os aumentos no pico de cheia e no tempo de concentração da bacia provocados pelo desenvolvimento da urbanização. Isso se dá através do amortecimento, nesses reservatórios, das águas drenadas de áreas impermeabilizadas da bacia. Assim, na simulação do cenário com essa medida implantada, ocorreu uma diminuição dos valores de pico nos hidrogramas de cheia dos rios Pilar e Calombé, da ordem de 26% e 4% respectivamente. Os hidrogramas amortecidos estão apresentados sobrepostos aos hidrogramas de cheia para a situação considerando apenas a limpeza dos rios e a implantação de seção de projeto em solo.

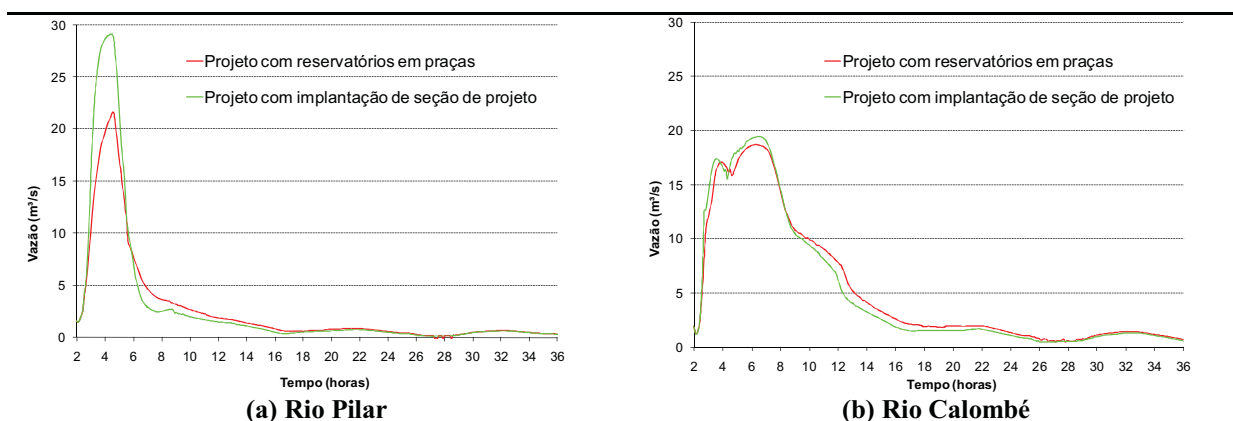


Figura 6.22 – Hidrogramas de cheia dos rios (a) Pilar e (b) Calombé para o cenário com reservatórios de praças implantado e para o cenário com implantação de seção de projeto nos rios. Evento hidrológico com tempo de recorrência de 20 anos.

O pequeno amortecimento observado no rio Calombé se deve ao fato de existirem ainda diversos pontos com extravasamento das águas para as planícies nos trechos a jusante das áreas consideradas para implantação dos reservatórios. Esses extravasamentos já produzem um abatimento considerável sobre o hidrograma de cheia do rio Calombé.

Na Figura 6.23 é apresentado um gráfico comparando os hidrogramas antes e depois da implantação dos reservatórios em uma seção logo a jusante da Estrada São Lourenço, a qual se apresenta como limite da área destinada aos reservatórios (ver Figura 5.21). Nesta seção, o

amortecimento do hidrograma chegou a um valor de 32% em relação ao hidrograma de cheia do cenário com seção de projeto implantada.

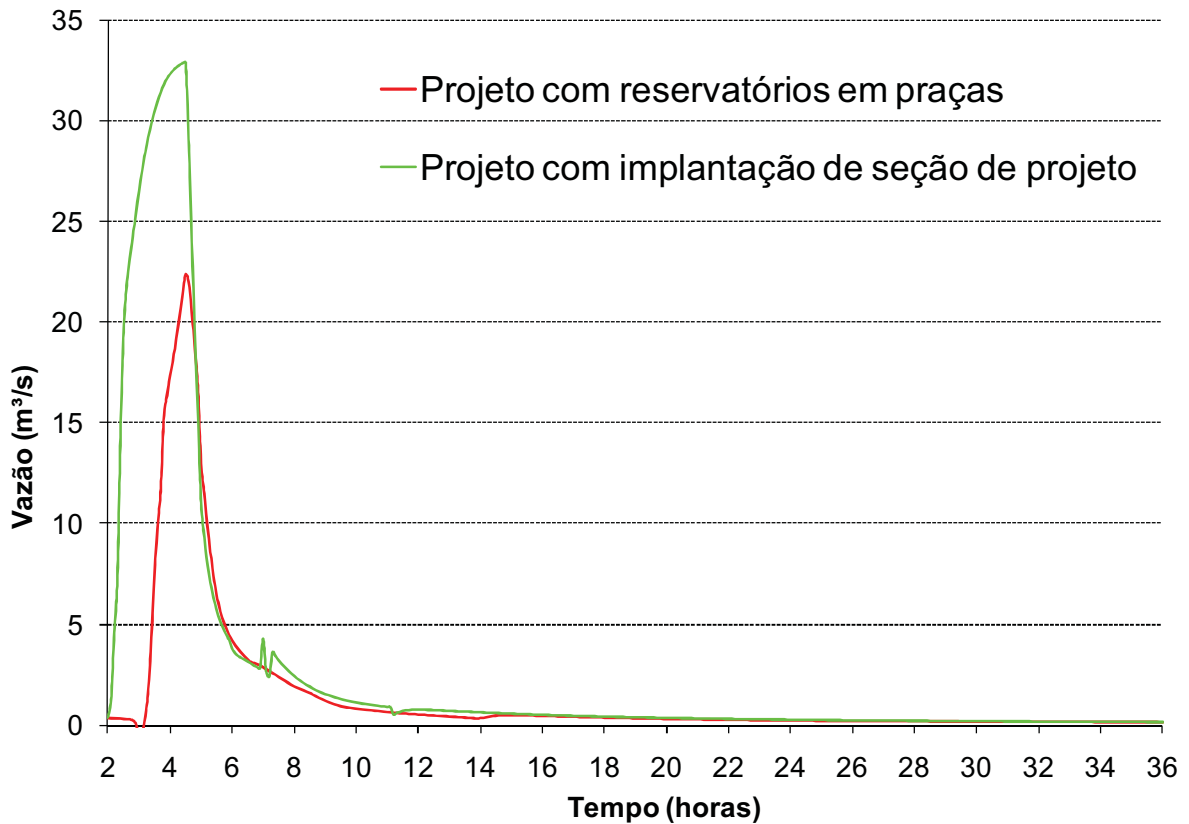


Figura 6.23 – Hidrograma de cheia do rio Calombé logo a jusante da Estrada São Lourenço. Cenário com reservatórios de praças implantados e cenários com implantação de seção de projeto no rio. Evento hidrológico com tempo de recorrência de 20 anos.

Para uma melhor análise dos efeitos da implantação desses reservatórios sobre o controle de inundações na bacia, foi montado um mapa com a mancha de inundação para este cenário, que pode ser visto na Figura 6.24.

Neste mapa pode-se observar que ocorreram ainda muitos pontos de extravasamento da calha do rio, inundando as planícies adjacentes, porém, em menor número e com uma profundidade inferior ao quadro apresentado atualmente.

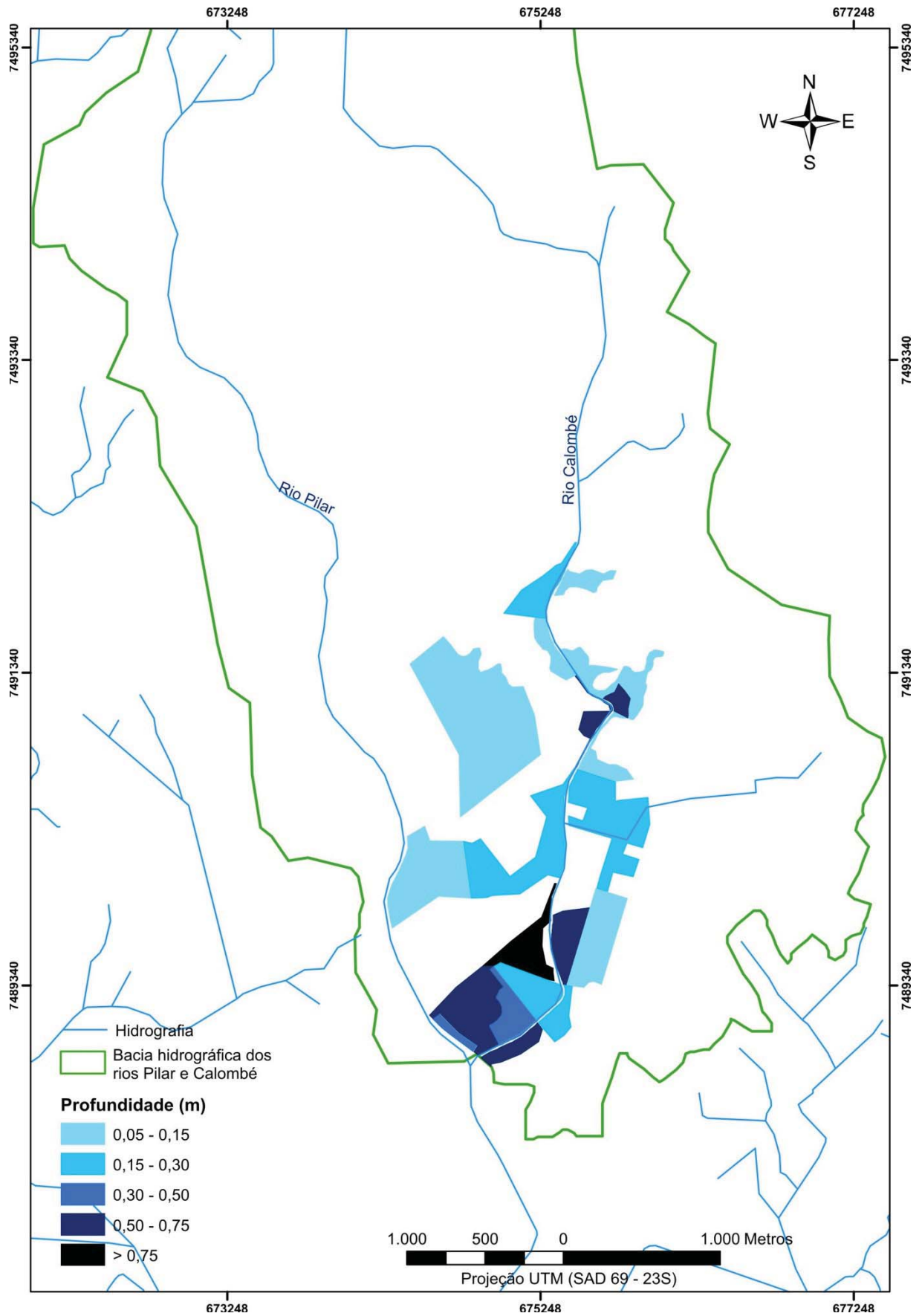


Figura 6.24 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano atual e implantação de reservatórios em praças e parques.

Recuperação da cobertura vegetal em áreas estratégicas (encostas)

O intenso processo de ocupação da bacia e as suas características físicas dificultaram a delimitação de áreas passíveis de reflorestamento, restando algumas regiões de encosta na bacia do rio Calombé. O efeito dessa medida foi então pouco significativo sobre o quadro de inundações da região, sendo perceptível apenas em um pequeno abatimento do hidrograma de cheia do rio Calombé, como pode ser visto na Figura 6.25, que apresenta um amortecimento no pico de cheia de 4%, reduzindo também o volume de água escoado superficialmente, como pode ser notado neste mesmo gráfico.

Apesar desse efeito pouco significativo, apresentando apenas uma pequena diminuição nas inundações na bacia do rio Calombé quando comparado com o cenário de implantação de seção de projeto, como pode ser observado no mapa de inundações apresentado na Figura 6.26 para esse cenário, acentua-se aqui o importante papel que esta medida representa para o controle do uso do solo e para preservação ambiental, impedindo a ocupação dessas áreas e assim, minimizando o efeito da urbanização sobre a geração de escoamento pluvial.

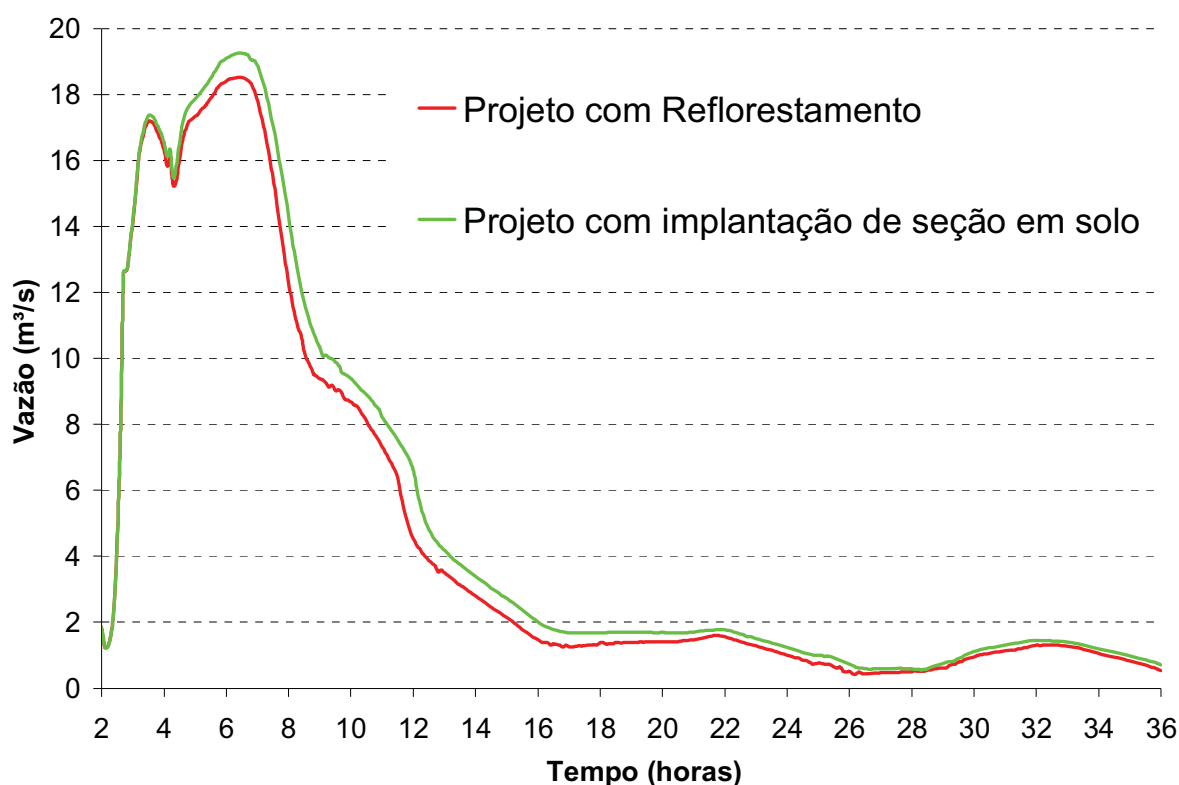


Figura 6.25 – Hidrogramas de cheia resultante de uma chuva com TR20 anos para os cenários com apenas implantação de seção de projeto e com reflorestamento

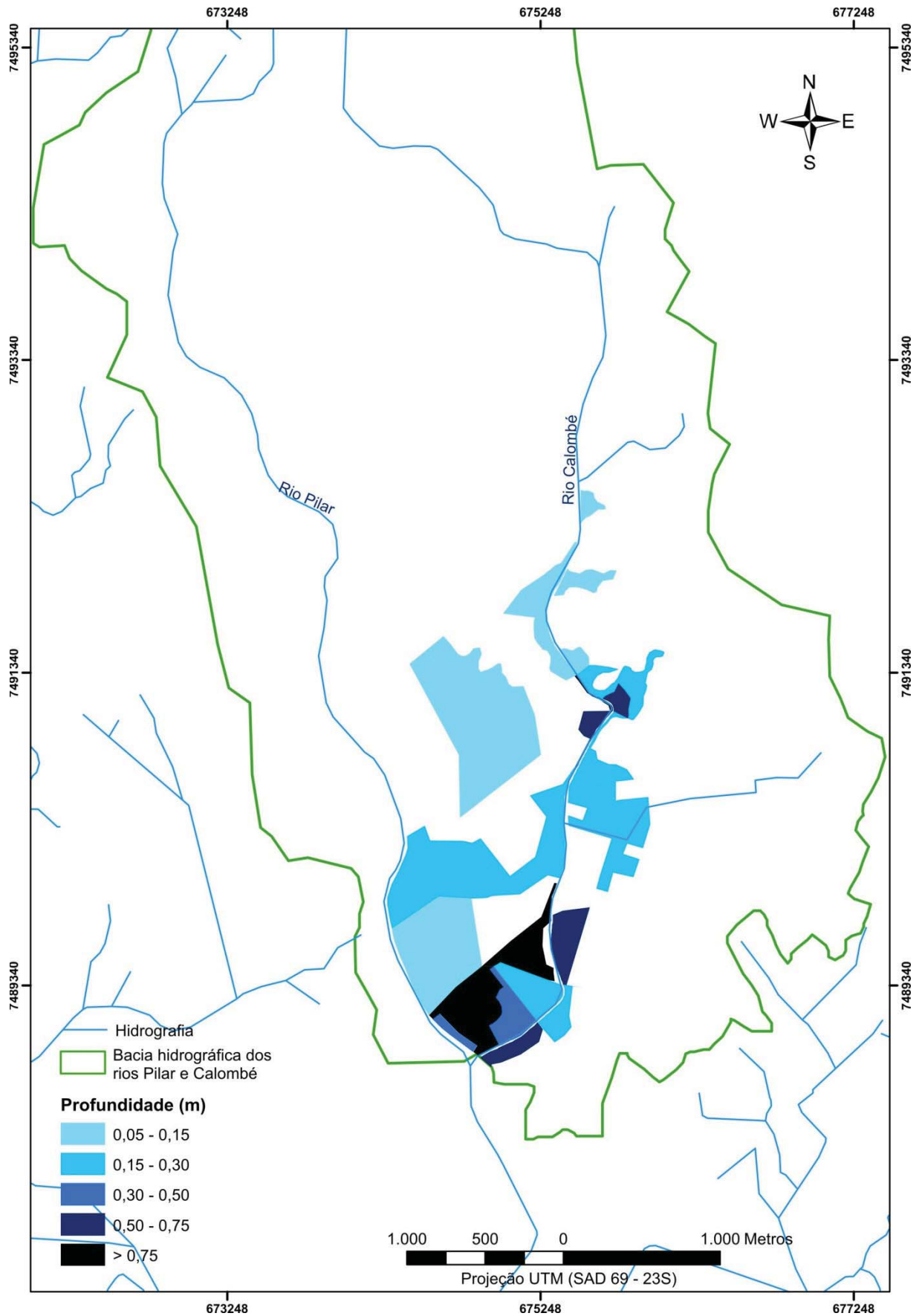


Figura 6.26 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano atual e recuperação da cobertura vegetal.

Recuperação das áreas de inundação natural dos rios (várzeas) e implantação de Parques Fluviais Inundáveis.

A restauração das várzeas de inundação dos rios Pilar e Calombé tiveram um efeito de amortecimento nas vazões de cheia ao longo de todo o curso dos rios. A Figura 6.27 apresenta uma imagem do aplicativo **Google Earth** com a localização das seções de cálculo dos hidrogramas de cheia, apresentados nos gráficos da Figura 6.28, decorrentes de um evento hidrológico com 20 anos de tempo de recorrência, comparando o cenário de implantação da seção de projeto na calha dos rios com o cenário de recuperação das várzeas e áreas de alagamento natural dos rios e implantação de parques fluviais inundáveis.

Uma grande vantagem da utilização desta medida no controle de inundações é a possibilidade de se investir na recuperação de áreas degradadas no entorno dos rios. A implantação de parques fluviais inundáveis, além da função de amortecimento do escoamento fluvial, garante a existência de áreas de lazer para a população e ainda funciona como um instrumento de controle do uso do solo, impedindo a ocupação irregular de áreas com risco de inundações.

No mapa com a mancha de inundações resultante de um evento hidrológico com 20 anos de tempo de recorrência (Figura 6.29), pode-se observar o aumento na profundidade de inundação nas áreas destinadas a recuperação das várzeas e aos parques fluviais, mostradas na Figura 5.23 (pág. 128). O aumento na inundação destas áreas funciona como uma realocação das águas de chuva que inundariam outros locais na bacia e, assim, reduz o nível máximo de inundação em locais mais sensíveis. Também é possível notar a nova área de inundação ao longo da margem direita do rio Pilar, que representa o extravasamento da calha do rio para o Parque Fluvial previsto nesta margem. Ressalta-se que neste cenário ocorre um transbordamento do Parque Fluvial para a área do parque reservada para funcionar seca em eventos hidrológicos com o tempo de recorrência simulado (TR 20 anos) ou inferiores, confirmando a necessidade de associação com outras medidas de controle.

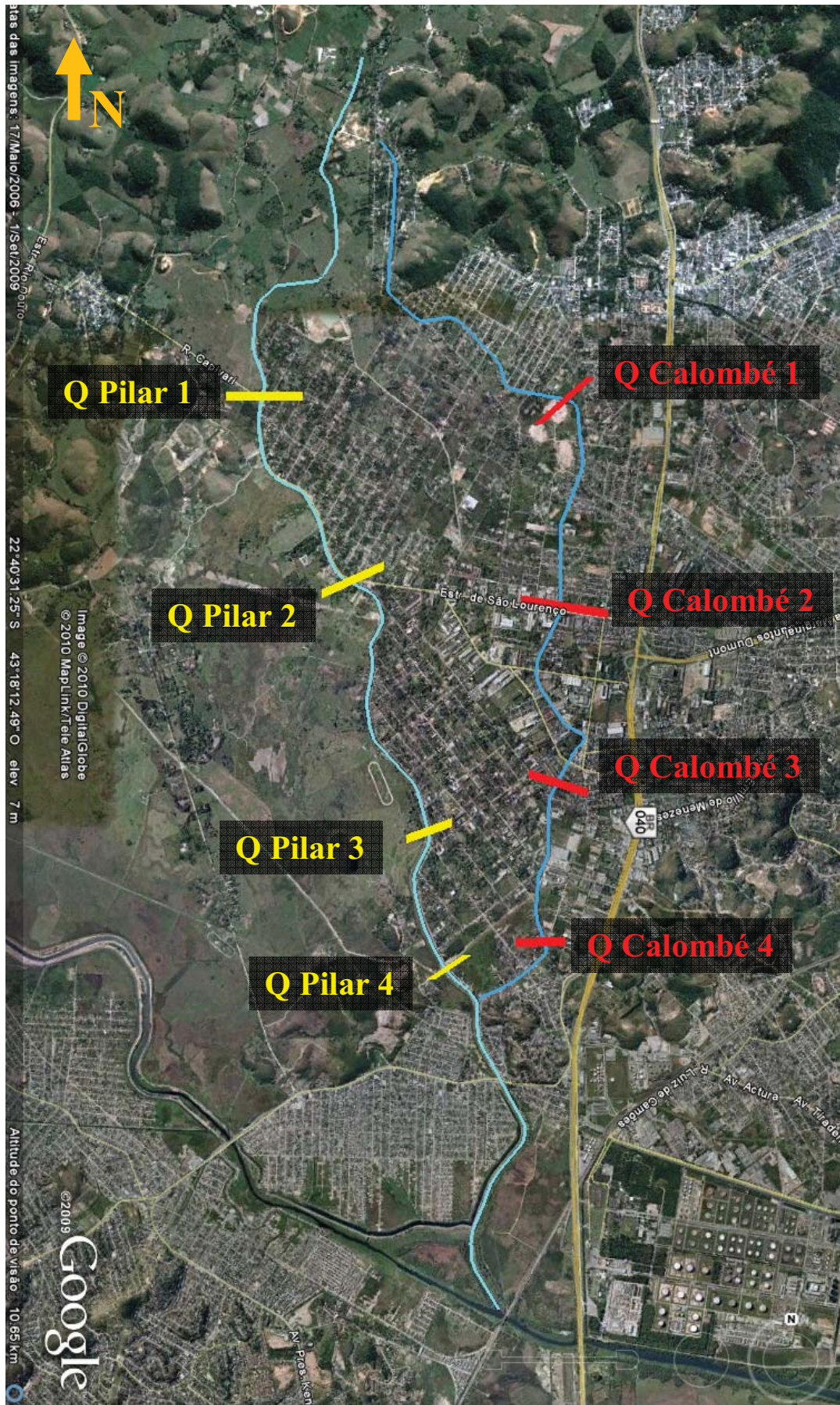


Figura 6.27 – Localização dos hidrogramas apresentados na Figura 6.28

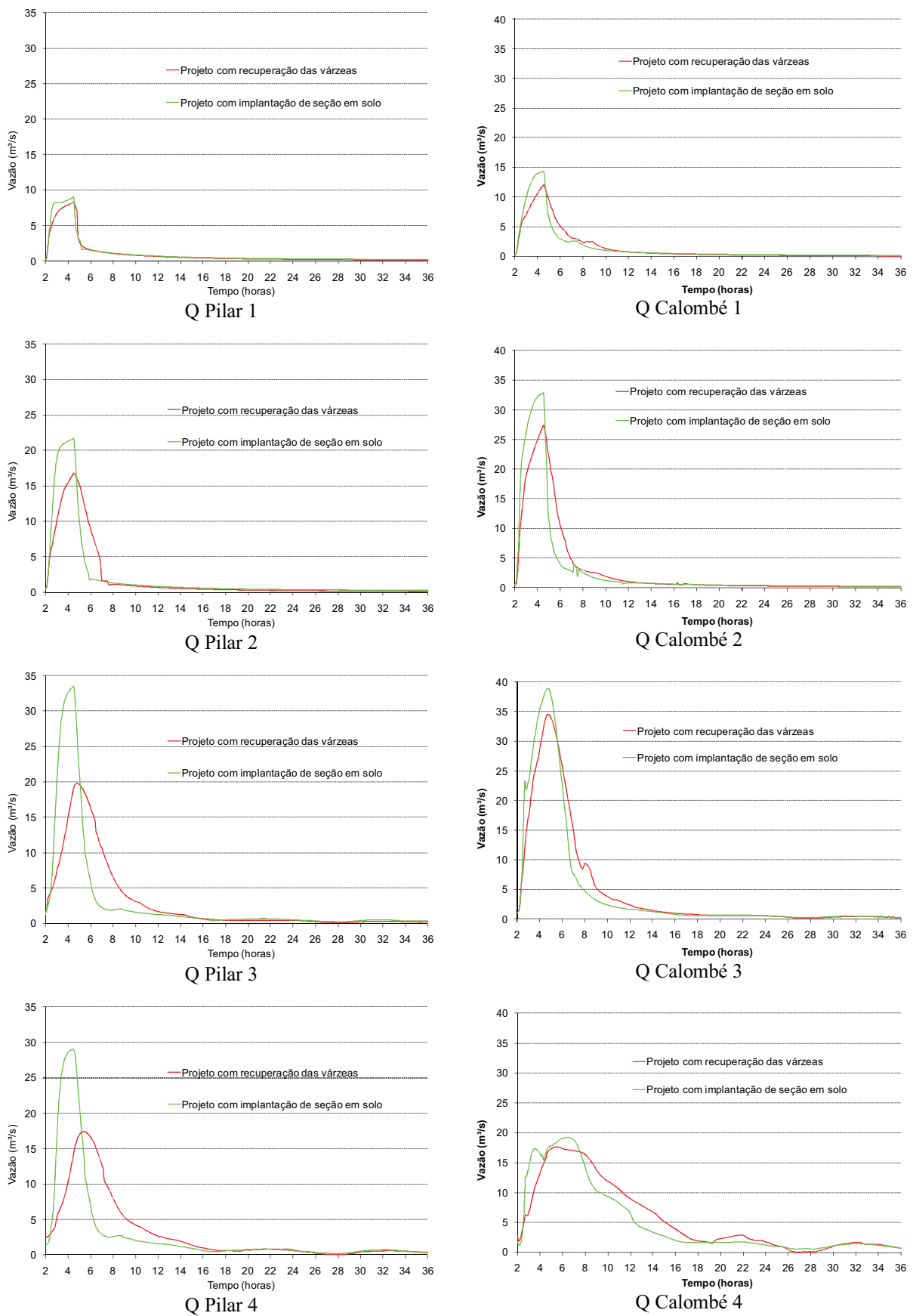


Figura 6.28 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar e Calombé para o cenário com recuperação das várzeas de inundação e parques fluviais. TR = 20 anos.

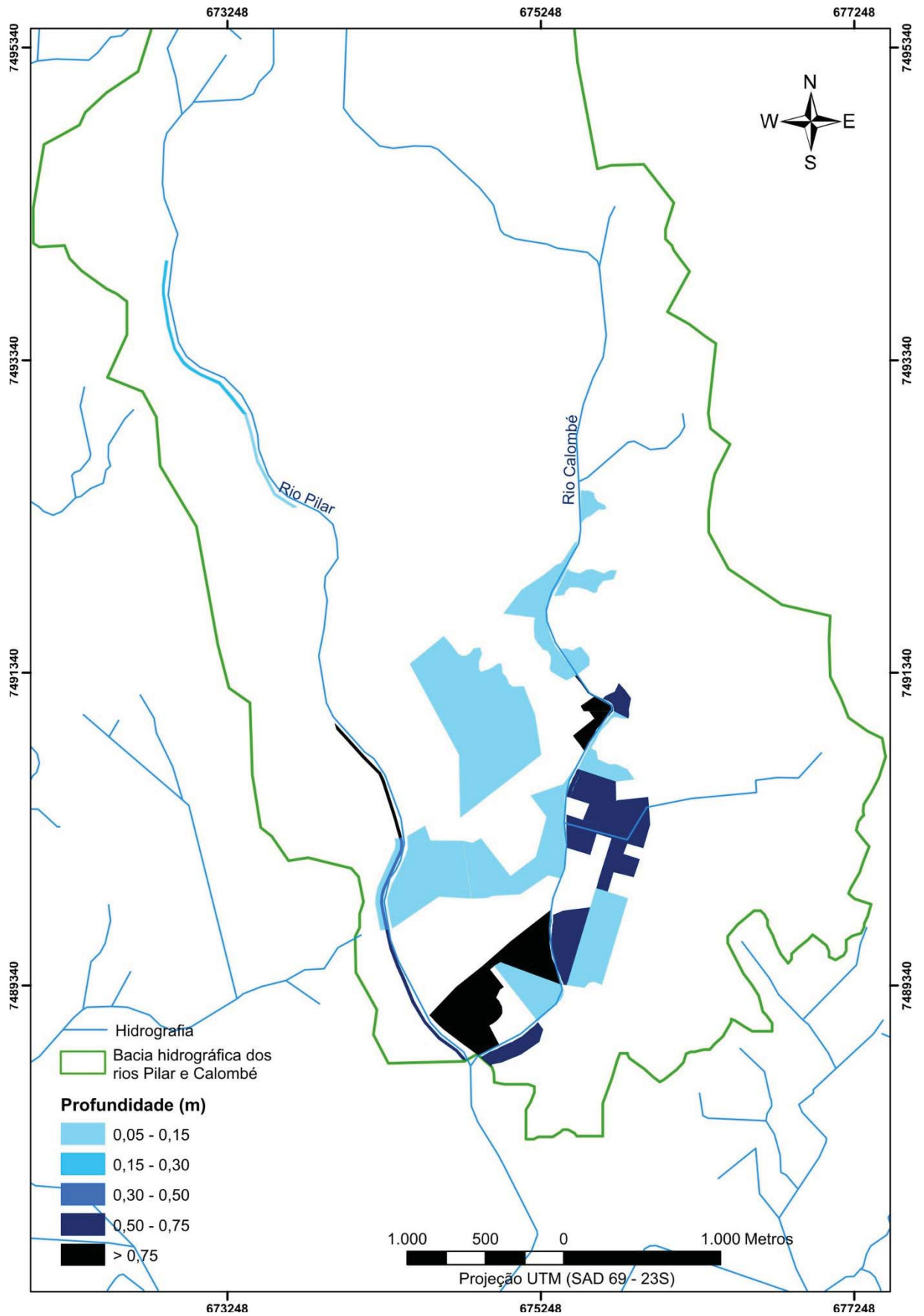


Figura 6.29 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo com adensamento urbano atual e recuperação da várzeas de inundação.

Medidas de controle distribuídas na bacia implantadas em conjunto

Agregando as medidas estudadas, em um cenário de projeto único, foi possível avaliar o efeito conjunto de todas essas intervenções sobre o controle de inundações na bacia do rio Pilar/Calombé e, assim, realizar modificações necessárias para alcançar a proteção ao risco de inundações previsto. Dessa maneira o projeto representativo da **Condição 2 - Solução com Medidas Distribuídas na Bacia** utilizando medidas de melhoria do fluxo na calha dos rios, instalação de reservatórios de detenção em áreas públicas, reflorestamento de encostas, aumento da capacidade de amortecimento em calha dos rios e recuperação de áreas naturais de inundações mostrou-se suficiente para solucionar os problemas de inundações provenientes de um evento hidrológico com tempo de recorrência (TR) de 20 anos.

Na Figura 6.30 estão apresentados hidrogramas de cheia decorrentes de uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos em diversas seções dos rios Pilar e Calombé, comparando as vazões atuais com as vazões de projeto. É possível observar uma variação no efeito dessas medidas de acordo com o local de análise. Ao longo de todo o rio Pilar houve um significativo amortecimento nas vazões de cheia. Isso se deve ao menor extravasamento de suas águas apresentado no cenário atual, demonstrando um maior efeito das medidas de armazenamento. Já no rio Calombé, a região mais a montante apresenta uma boa resposta às medidas de controle por armazenamento, evidenciado pelo abatimento do hidrograma de cheia. Porém, mais a jusante, o rio Calombé apresenta um significativo incremento de vazões, que ocorre devido à diminuição dos extravasamentos da calha principal e da melhoria no fluxo dos escoamentos.

Pela observação do mapa de inundações resultante de uma chuva com TR de 20 anos, apresentado na Figura 6.31, é possível visualizar as áreas reservadas para alagamentos naturais que aparecem como áreas inundadas. Essas áreas, além da função hidráulica, tanto podem servir para a simples preservação ambiental, favorecendo a recomposição de sua cobertura vegetal específica, como também podem receber áreas de lazer compatíveis com inundações esporádicas. Para o evento mais severo simulado, com TR de 50 anos, a inundação das áreas reservadas para o amortecimento da cheia se intensifica um pouco, apresentando um ponto de inundação em área urbana na margem esquerda do rio Calombé (Figura 6.32). Esse quadro demonstra a importância da realocação de espaços para as águas de chuva como uma medida de controle de inundações.

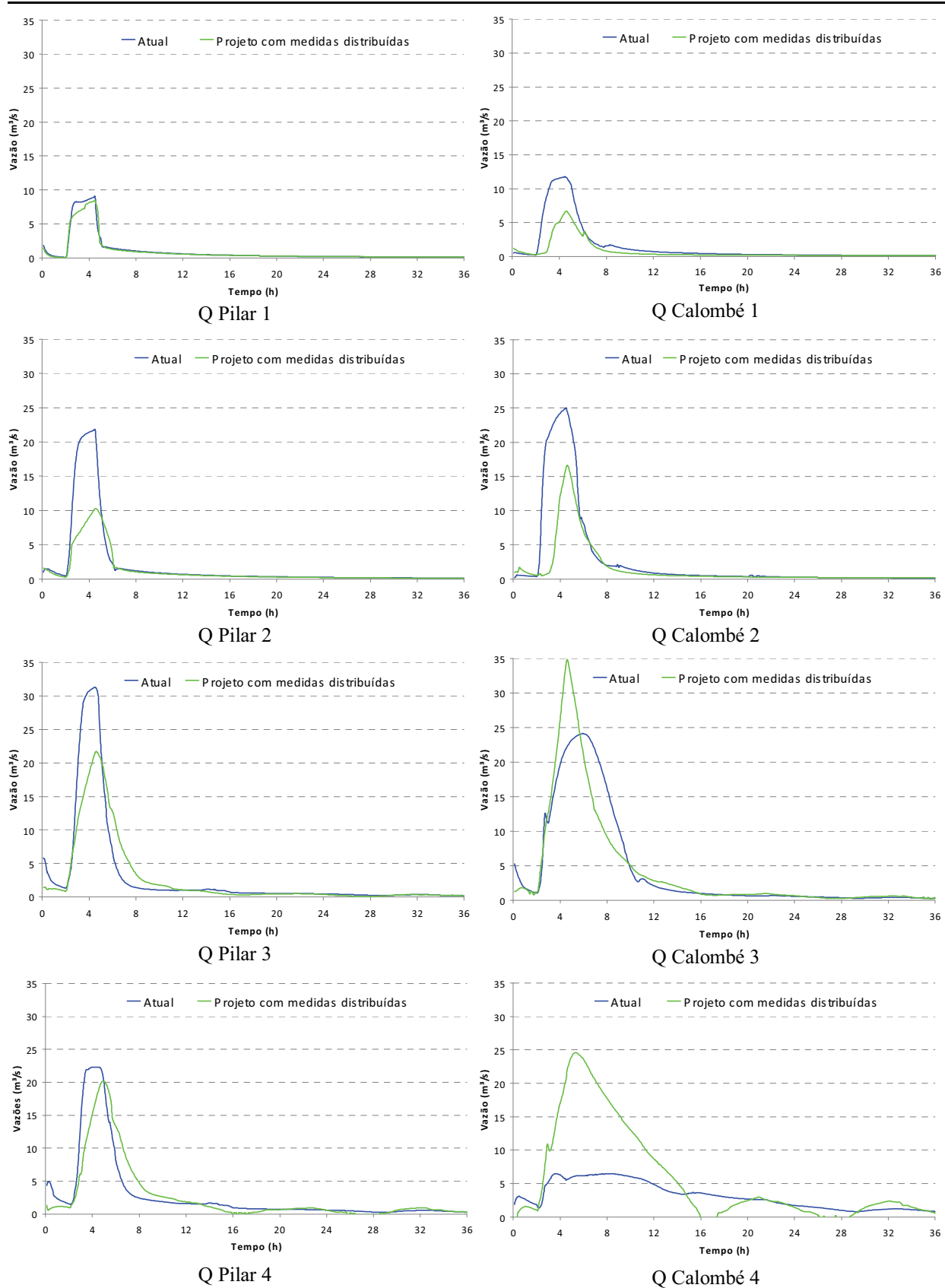


Figura 6.30 – Comparação entre os hidrogramas de cheia resultantes de uma chuva com TR 20 anos, para a situação atual e para o cenário com projeto de controle das inundações com medidas distribuídas (ver Figura 6.27 para localização das seções)

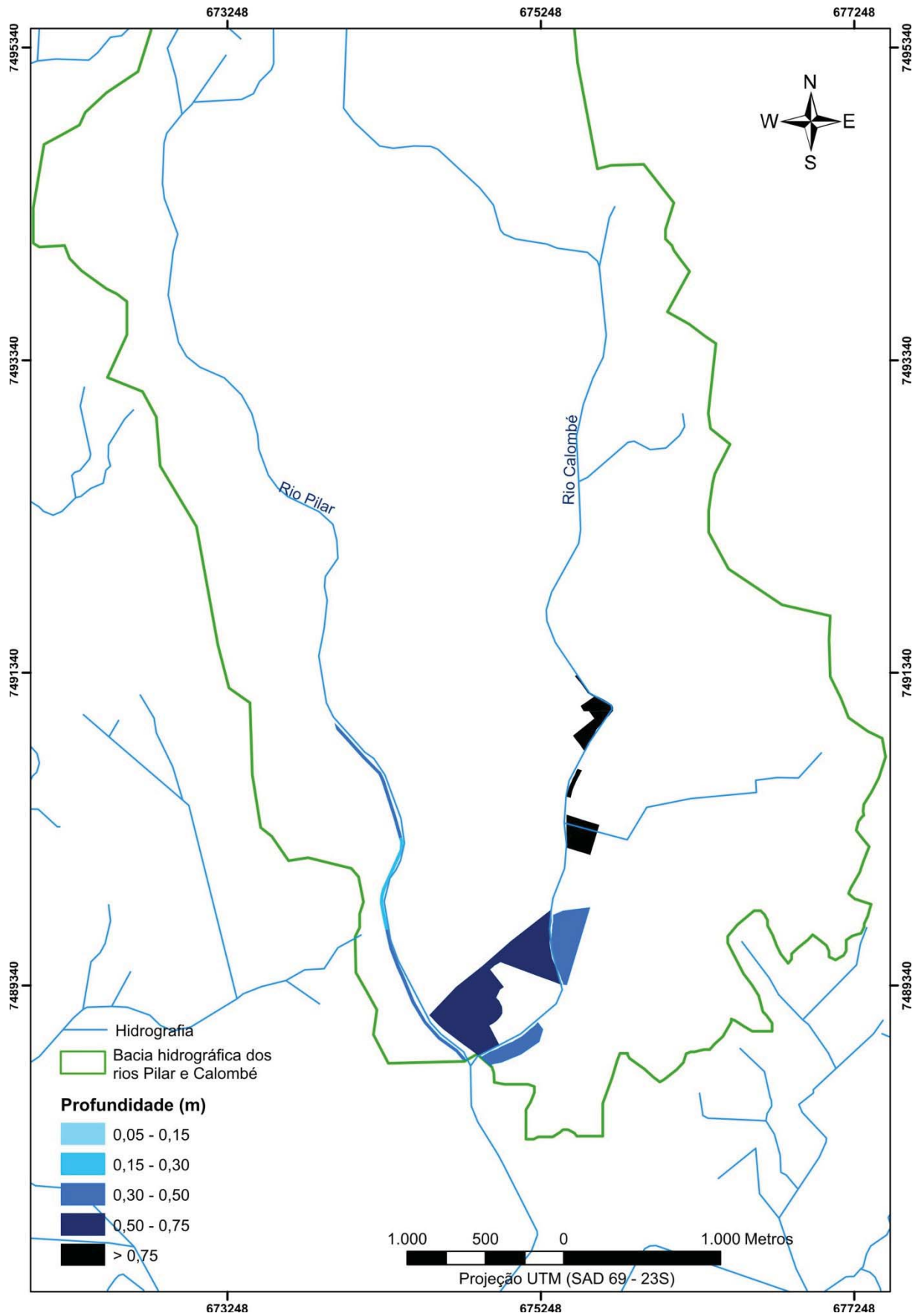


Figura 6.31 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 20 anos nas condições de uso do solo atual e medidas de controle distribuídas na bacia implantadas em conjunto (Condição 2).

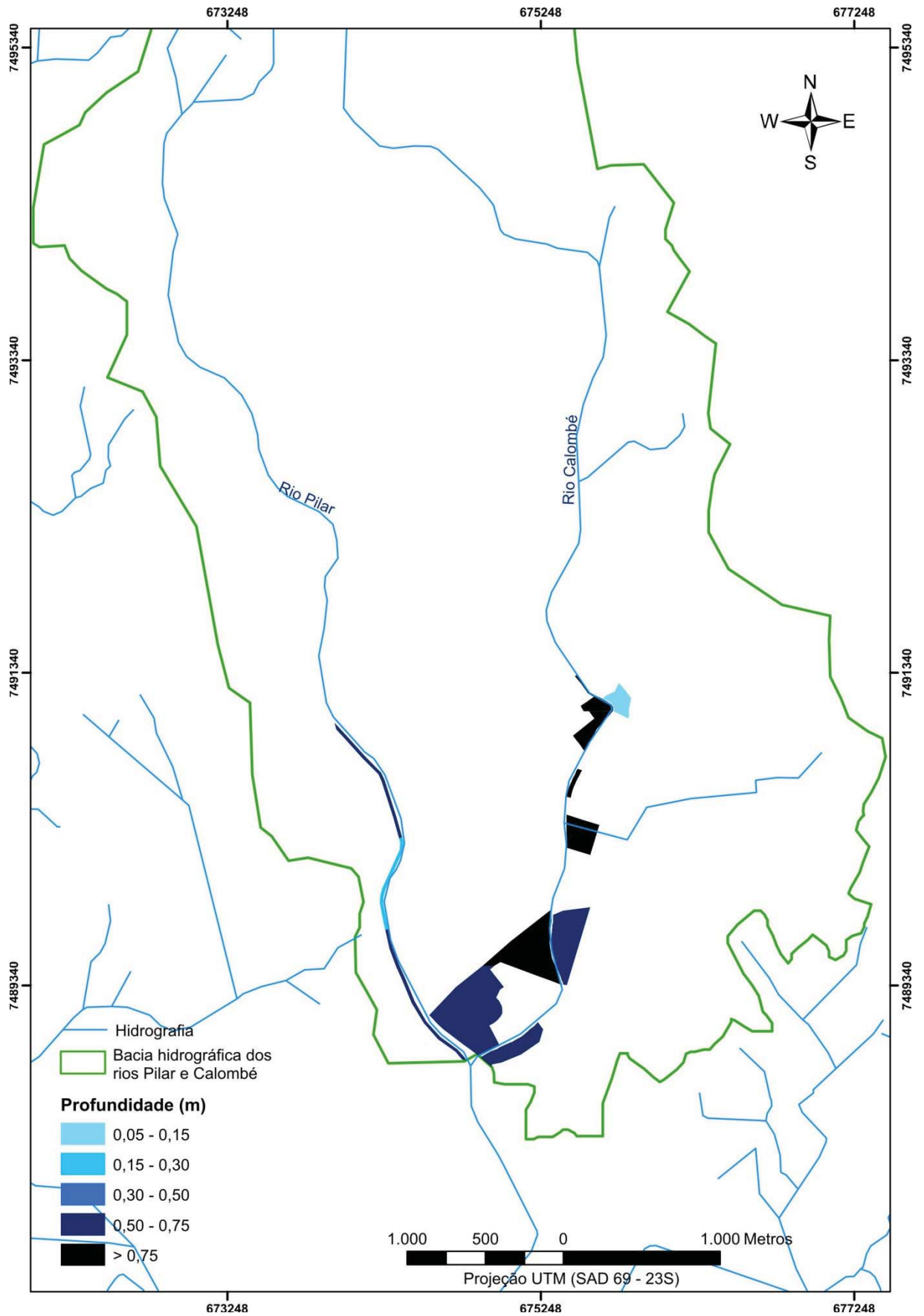


Figura 6.32 – Mapa de Inundação para um evento com TR de 50 anos nas condições de uso do solo atual e medidas de controle distribuídas na bacia implantadas em conjunto (Condição 2).

A consideração de um cenário futuro com desenvolvimento urbano sem controle tendo como consequência um **adensamento urbano de saturação** para a bacia resultou em um aumento nos picos e nos volumes dos hidrogramas de cheia dos rios Pilar e Calombé. A Figura 6.33 apresenta os hidrogramas de cheia para uma chuva de tempo de recorrência de 10 anos no rio Pilar e no rio Calombé, superpondo o cenário de projeto com uso do solo atual com o uso do solo com adensamento urbano de saturação.

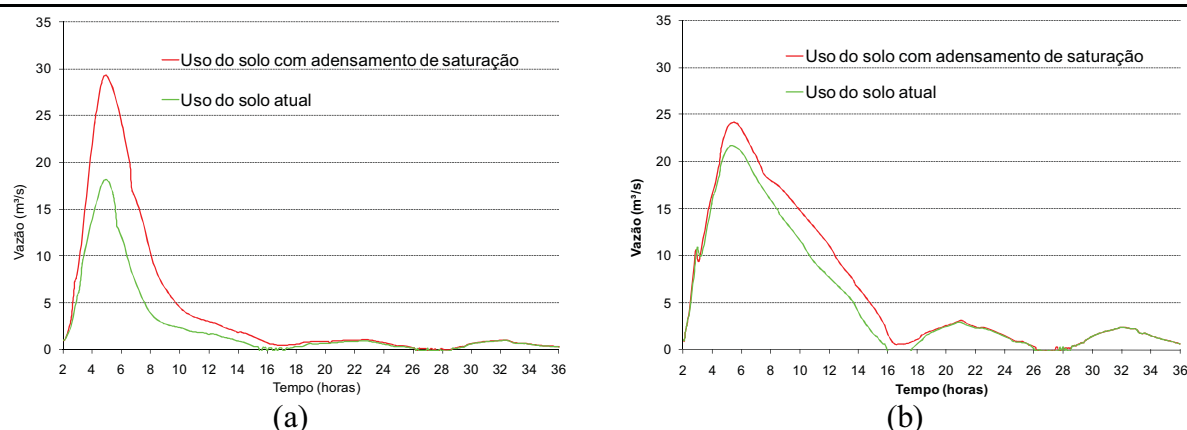


Figura 6.33 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) para o cenário de projeto com medidas distribuídas na bacia com condições de uso do solo atual e com adensamento de saturação. (Chuva com TR 10 anos)

A variação no pico da vazão de cheia nos rios decorrente do processo de urbanização sem controle para os diferentes cenários de eventos hidrológicos simulados pode ser vista na Tabela 6.4. Percebe-se, mais uma vez, a grande diferença entre as variações de vazão do rio Pilar e do rio Calombé devido à já alta taxa de adensamento encontrada na sub-bacia do rio Calombé. A diminuição percebida na vazão do rio Calombé para a chuva de tempo de recorrência de 50 anos deve-se a um aumento no transbordamento da calha principal do rio para as planícies. A seguir são apresentados os mapas de inundação para o cenário de projeto com medidas distribuídas na bacia considerando-se um adensamento urbano de saturação.

Tabela 6.4 – Variação no pico de cheia devido ao processo de urbanização

Tempo de Recorrência	Corpo d'água	Vazão de pico de cheia (m³/s)		
		Adensamento urbano Atual	Saturação	Varição
TR10	Pilar	18.12	29.35	62%
	Calombé	21.65	24.21	12%
TR20	Pilar	20.15	31.79	58%
	Calombé	24.58	25.01	2%
TR50	Pilar	22.94	35.35	54%
	Calombé	26.80	25.99	-3%

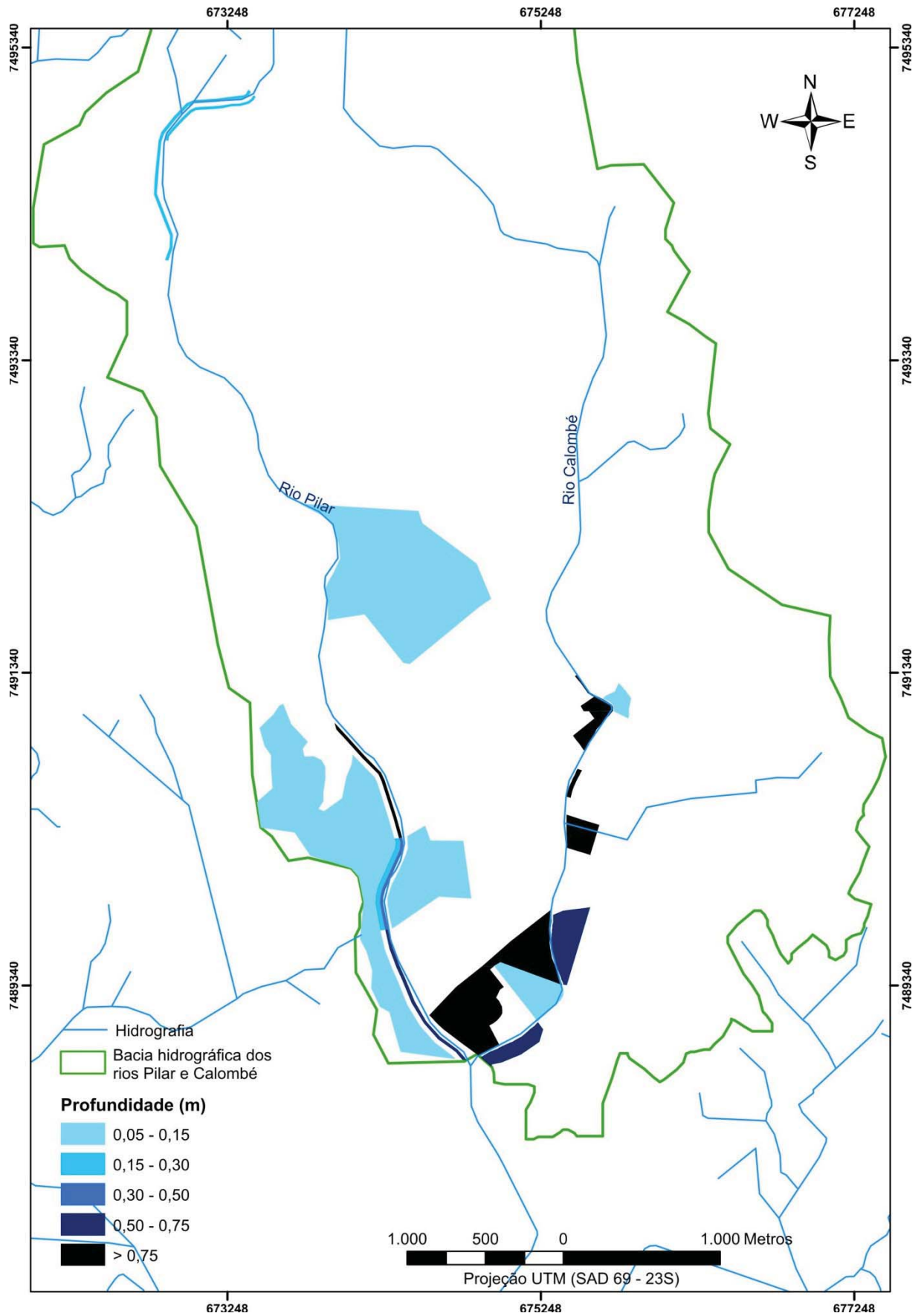


Figura 6.34 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano de saturação e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR10 anos.

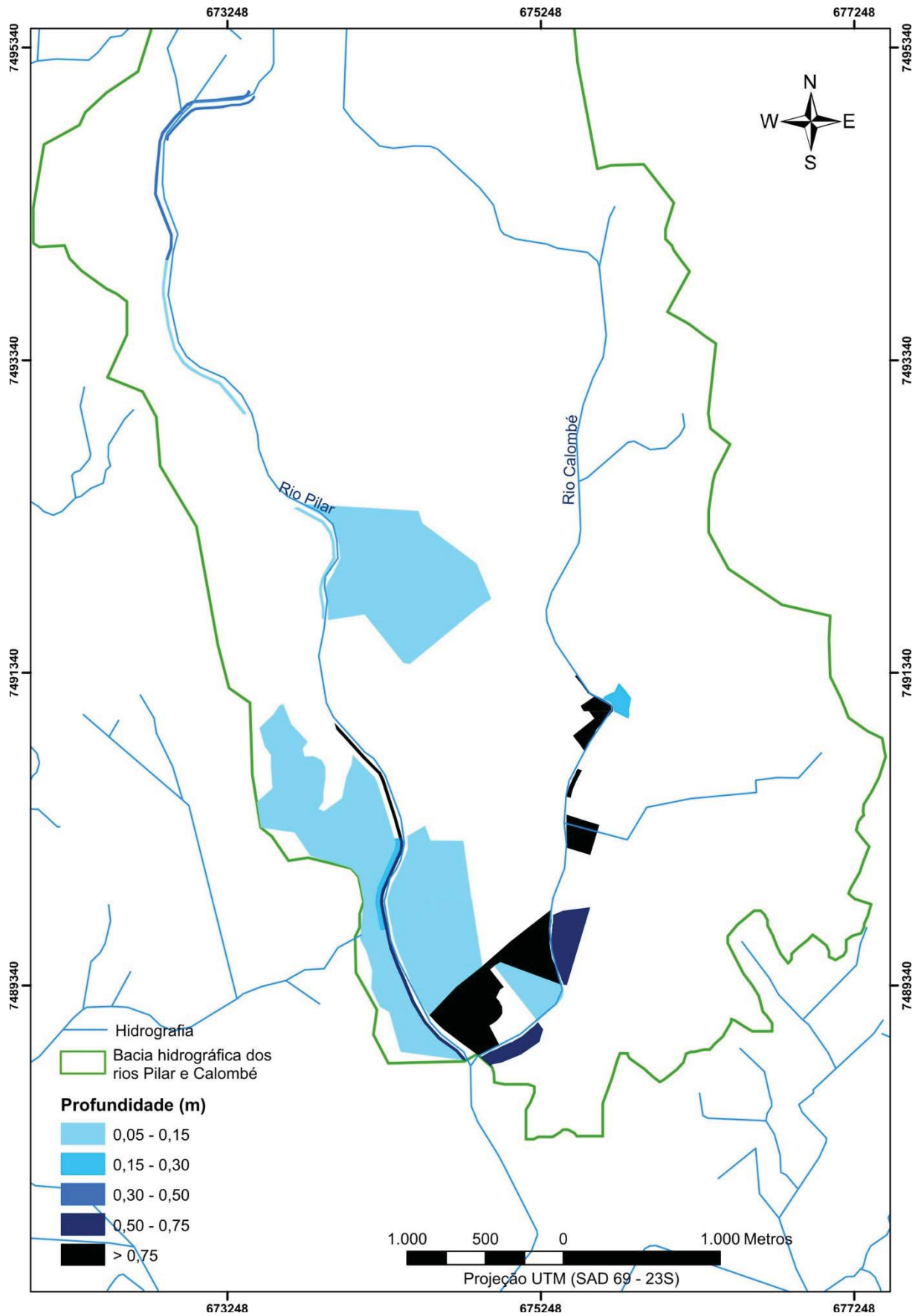


Figura 6.35 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano de saturação e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR20 anos.

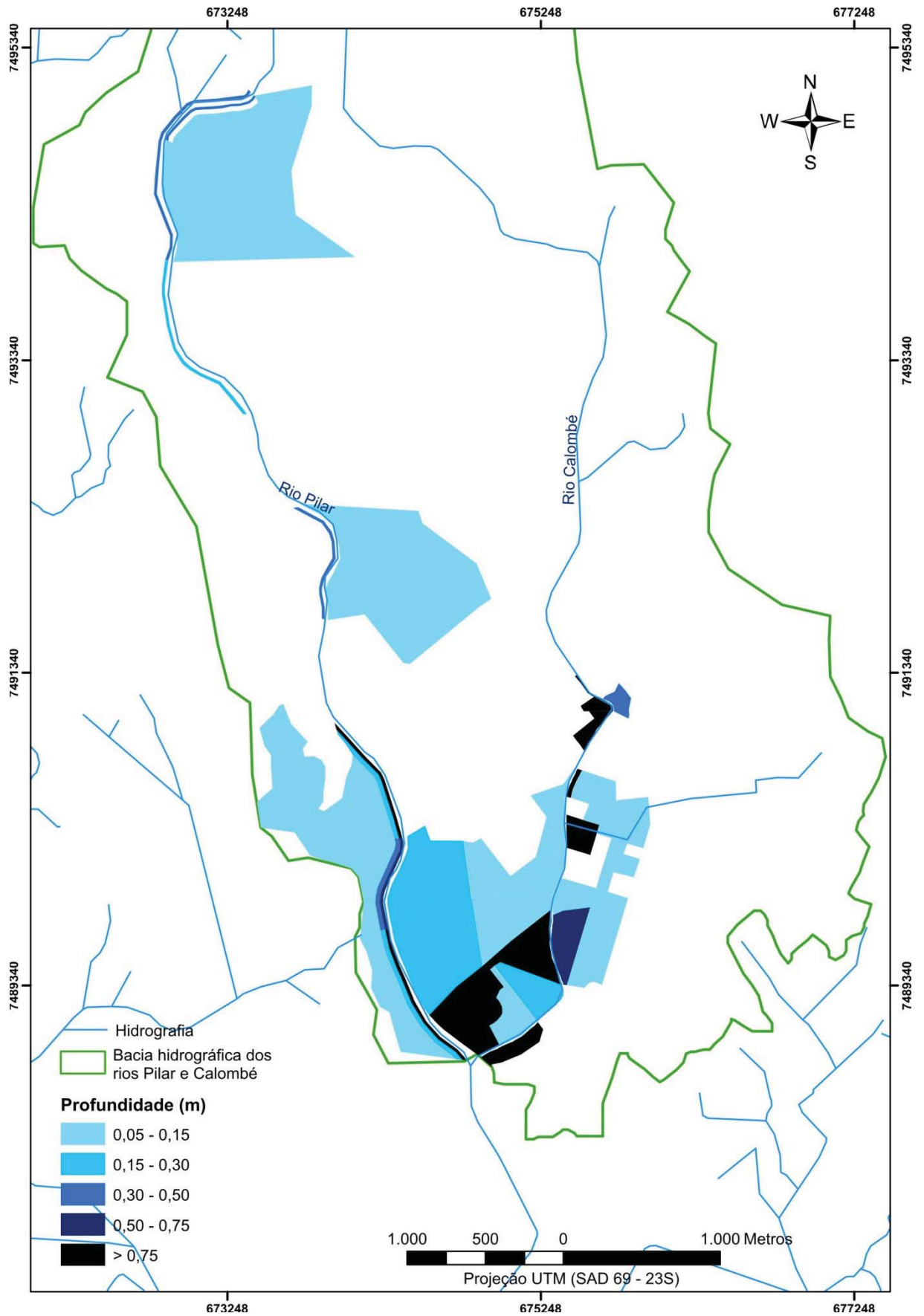


Figura 6.36 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano de saturação e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR50 anos

Quando considerado um cenário futuro com **adensamento urbano segundo o Plano Diretor Urbano** do município, a variação dos picos de cheia foi menor (ver Figura 6.37 e Tabela 6.5), porém, suficientes para retornar problemas de inundações em alguns trechos dos rios Pilar e Calombé, como pode ser observado no mapa de inundação apresentado na Figura 6.38, para uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos.

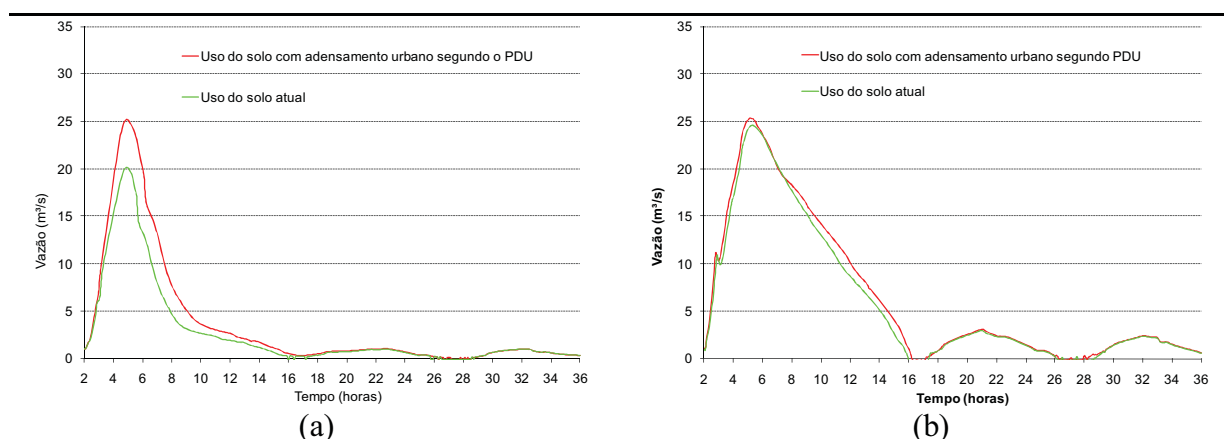


Figura 6.37 – Hidrogramas de cheia dos rios Pilar (a) e Calombé (b) para o cenário de projeto com medidas distribuídas na bacia com condições de uso do solo atual e com adensamento segundo Plano Diretor Urbano. (Chuva com TR 20 anos)

Tabela 6.5 - Variação no pico de cheia devido ao processo de urbanização

Tempo de Recorrência	Corpo d'água	Vazão de pico de cheia (m³/s)		Variação
		Atual	segundo PDU	
TR10	Pilar	18.12	23.04	27%
	Calombé	21.65	22.46	4%
TR20	Pilar	20.15	25.18	25%
	Calombé	24.58	25.33	3%
TR50	Pilar	22.94	27.88	21%
	Calombé	26.80	26.39	-2%

Considerando um evento hidrológico com tempo de recorrência de 20 anos, quando simula-se a condição de adensamento urbano de acordo como Plano Diretor Urbano, ocorrem extravasamentos da calha principal dos rios, como pode ser visto no mapa de inundações da Figura 6.38. Para o tempo de recorrência de 50 anos é observado uma pequena variação negativa no pico de cheia do rio Calombé, sendo consequência de um aumento no transbordamento da calha principal do rio para as planícies, acarretando em um maior amortecimento do hidrograma. Esse efeito pode ser visto no mapa de inundações apresentado na Figura 6.39.

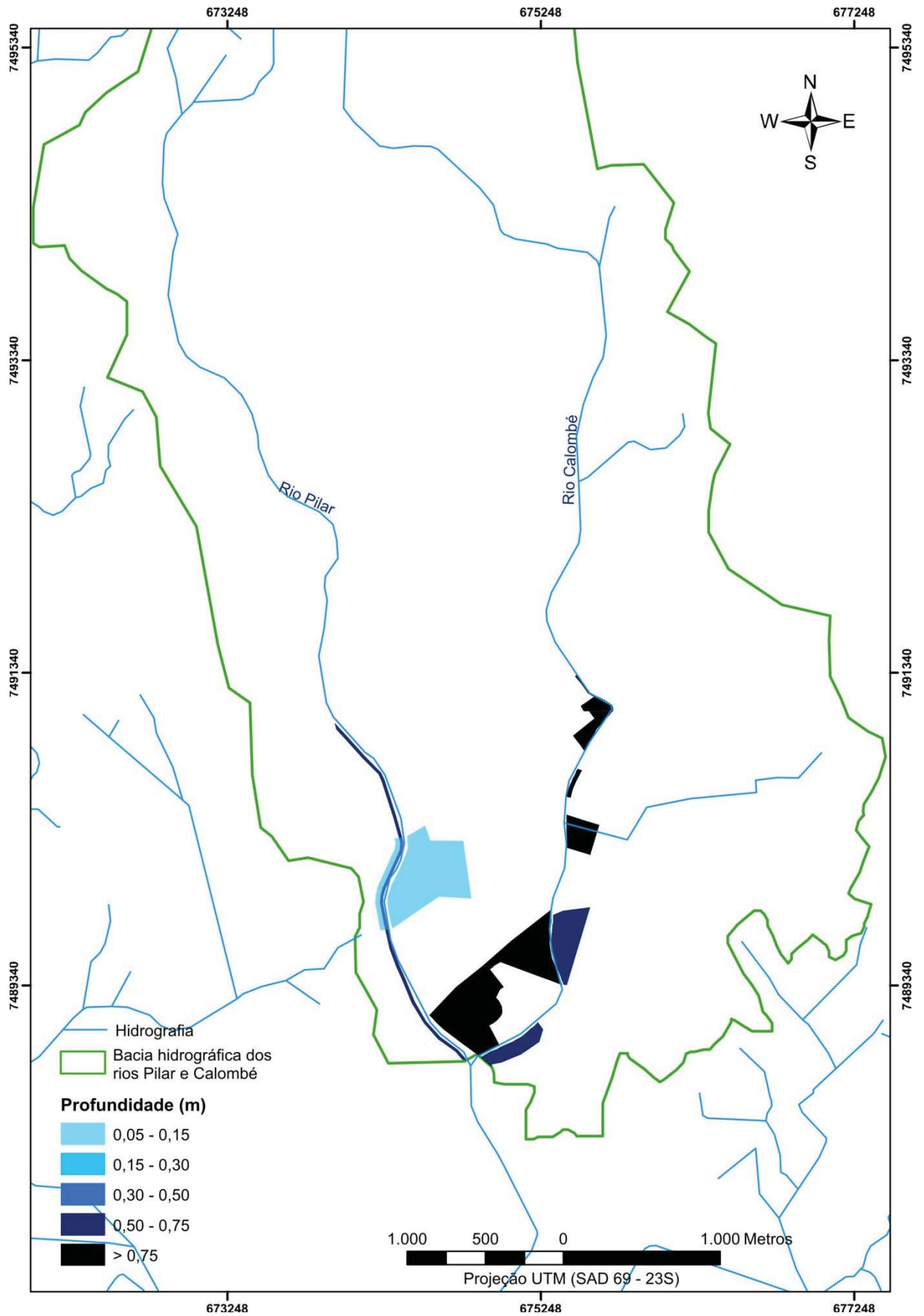


Figura 6.38 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano de segundo o PDU e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR20 anos.

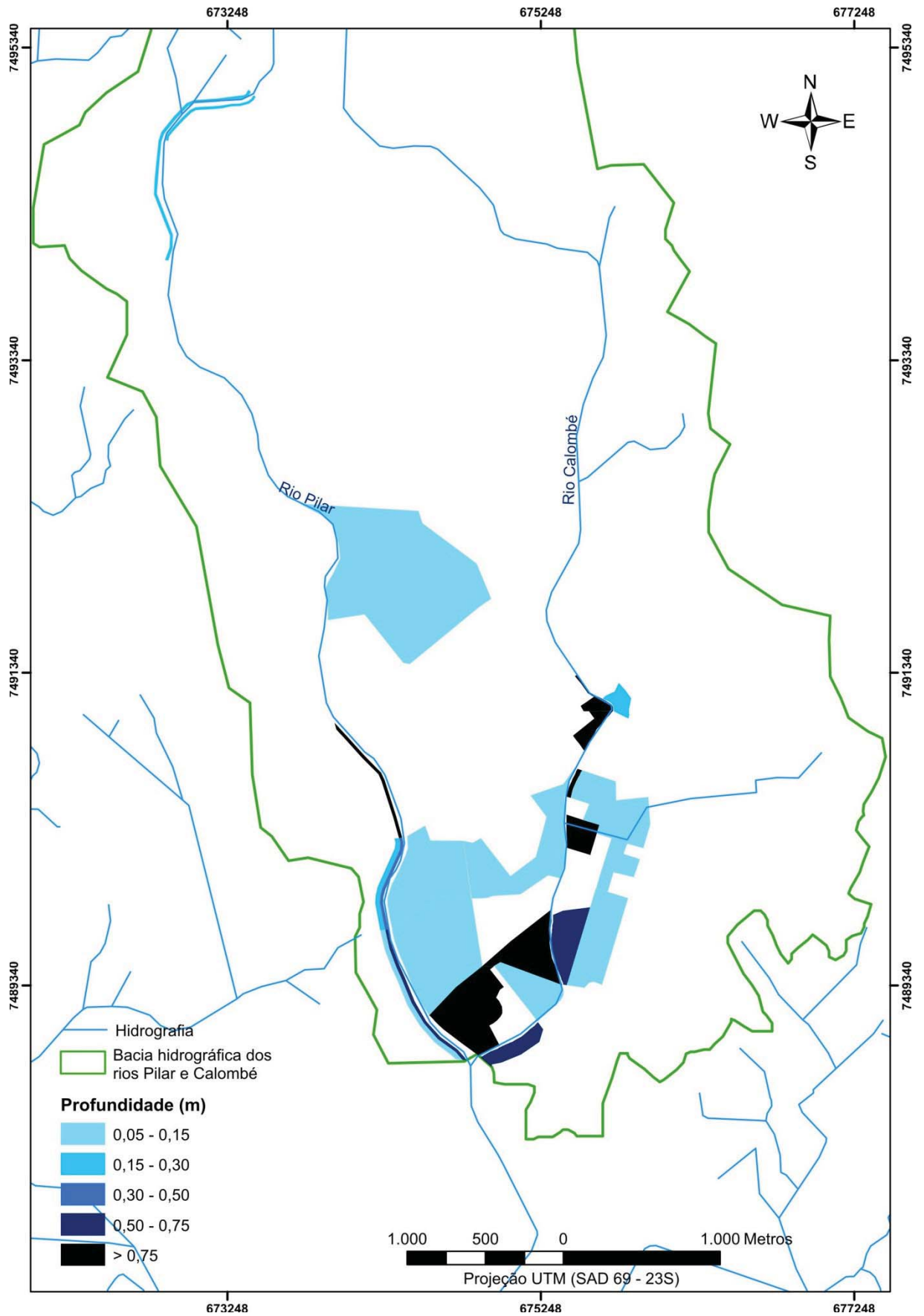


Figura 6.39 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano segundo o PDU e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR50 anos.

O controle exercido sobre o processo de urbanização através da imposição de limites para o percentual de impermeabilização nos lotes, simulado no cenário futuro com **adensamento urbano controlado**, obteve ótimos resultados na redução de futuros problemas de inundações gerados pelo crescimento urbano. A variação das vazões de pico de cheia nos rios Pilar e Calombé logo a montante da confluência entre eles não diferiu muito do resultado obtido pelo cenário futuro com adensamento urbano segundo o PDU, como mostrado na Tabela 6.6. Os valores negativos, representando uma diminuição no valor de pico do hidrograma de cheia, deve-se a uma redução nos valores do coeficiente de escoamento em várias células contribuintes ao rio Calombé, as quais apresentam-se fortemente adensadas.

Ao considerarmos o controle sobre a impermeabilização, a urbanização futura resultou em um único ponto de extravasamento do rio, que demandaria apenas uma intervenção localizada para solucioná-lo, apresentando ainda, menores alturas de inundação nas áreas destinadas ao amortecimento quando comparadas com o cenário do Plano Diretor Urbano (PDU). Essa observação pode ser feita através do mapa de inundações apresentado na Figura 6.40 resultante de uma chuva com 20 anos de tempo de recorrência (TR). O efeito causado por um evento menos freqüente (TR 50 anos, apresentado na Figura 6.41) apresenta ainda mais benefícios em redução de área alagada e altura de inundação, quando comparado com o cenário do PDU.

Tabela 6.6 - Variação no pico de cheia devido ao processo de urbanização

Tempo de Recorrência	Corpo d'água	Vazão de pico de cheia (m ³ /s)		Variação
		Adensamento urbano Atual	Controlado	
TR10	Pilar	18.12	22,70	25%
	Calombé	21.65	21,42	-1%
TR20	Pilar	20.15	24,85	23%
	Calombé	24.58	24,32	-1%
TR50	Pilar	22.94	27,49	20%
	Calombé	26.80	25,52	-5%

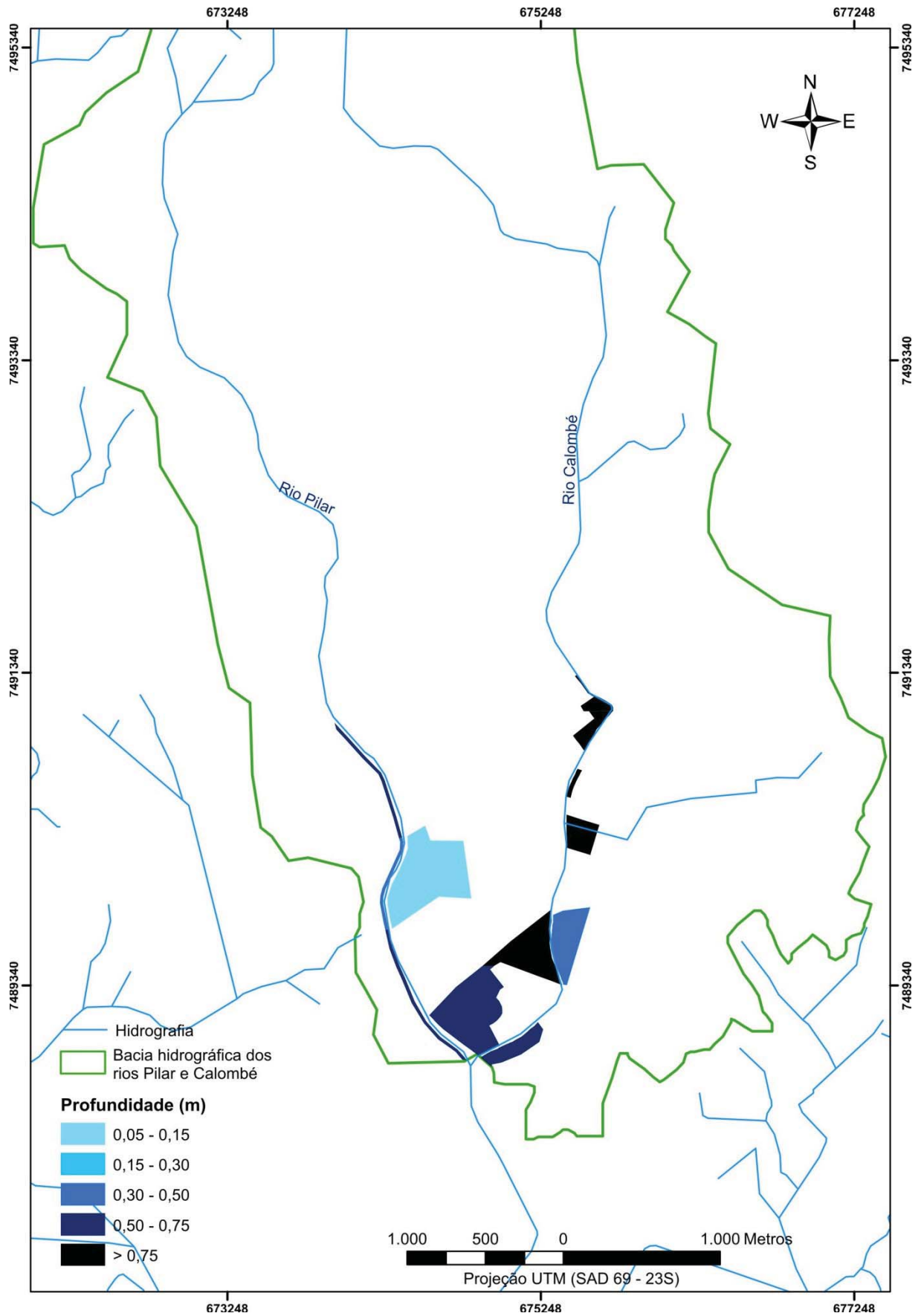


Figura 6.40 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano controlado e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR20 anos.

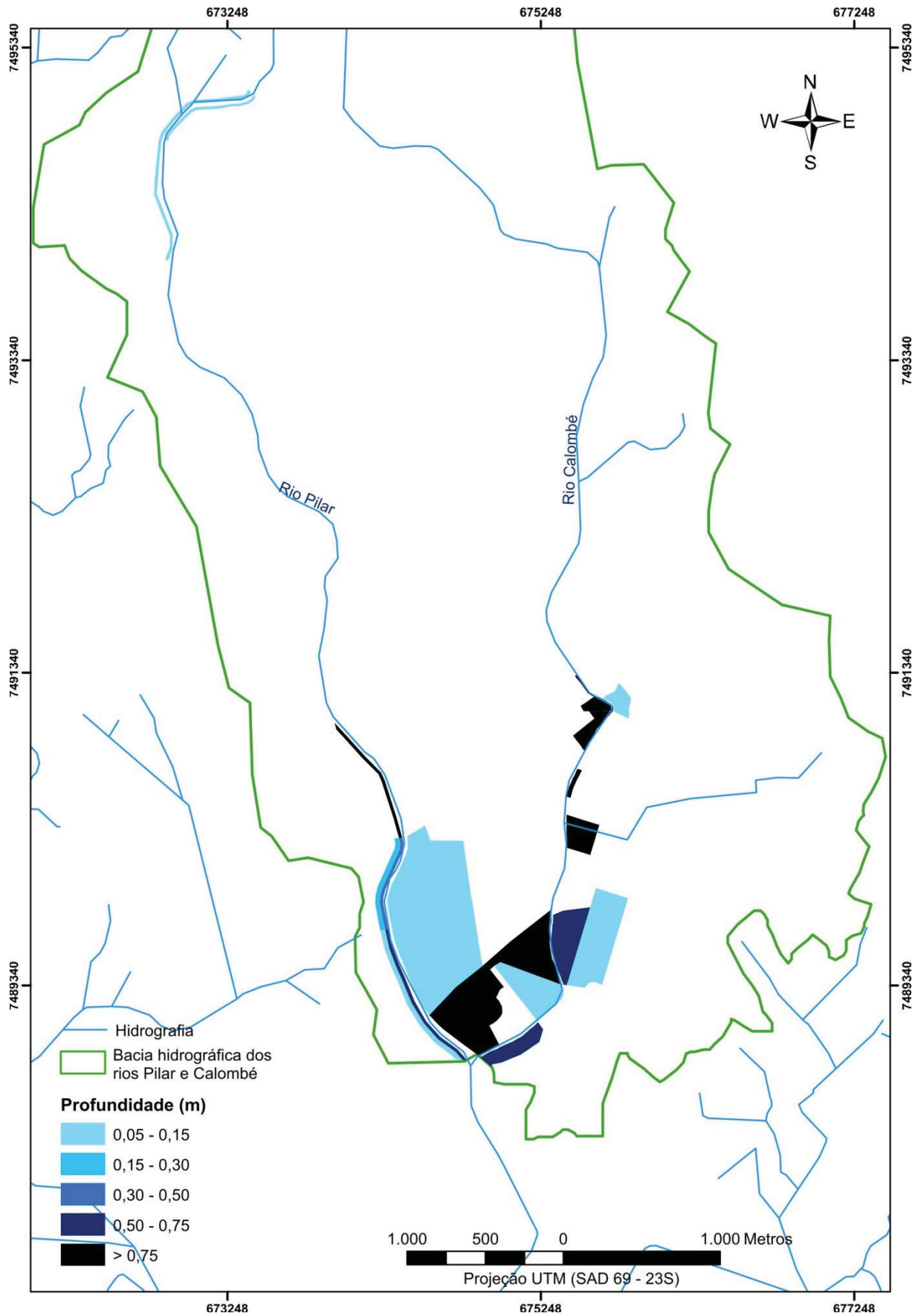


Figura 6.41 – Mapa de Inundação para as condições de uso do solo com adensamento urbano controlado e medidas de controle distribuídas na bacia (Condição 2). Chuva com TR50 anos.

6.2.4. Análise Comparativa dos Resultados

Uma grande vantagem da implantação de medidas distribuídas na bacia em detrimento da simples canalização da rede de macrodrenagem é o abatimento nas vazões de pico dos hidrogramas de cheia, mesmo quando considerado cenários futuros com processo de adensamento urbano. Na Figura 6.42 estão apresentados diversos hidrogramas de cheia para uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos, em diferentes seções dos rios Pilar e Calombé, superpondo os resultados das simulações dos cenários atual (**Condição 0**), de projeto com canalização (**Condição 1**) e de projeto com medidas distribuídas na bacia (**Condição 2**).

Para o rio Calombé, a vazão de pico do projeto com medidas de controle distribuídas na bacia chega a ser 65% menor que quando considerado um projeto de canalização, enquanto que para o rio Pilar esse valor chega a 51%. Os valores da vazão de pico de cheia para os cenários simulados podem ser vistos na Tabela 6.7 (Rio Pilar) e na Tabela 6.8 (Rio Calombé), que apresentam também a relação entre a vazão de pico dos cenários de projeto com canalização e com medidas distribuídas. A observação desses resultados nos permite confirmar que a canalização da macrodrenagem terá um grande impacto na transferência das inundações para jusante do local de intervenção, como foi observado nos mapas de inundação resultantes do projeto de canalização, para o qual foi observado um extravasamento para todos os cenários simulados. Já para o projeto com medidas distribuídas esse efeito não ocorreu, uma vez que a estratégia de controle passou a ser a detenção das águas, através de reservatórios e restauração de áreas naturais de inundação.

Para os cenários futuros de desenvolvimento urbano com **adensamento de saturação**, ambos os projetos apresentaram-se insuficientes para controlar as inundações resultantes do acréscimo de vazões gerado pelo aumento da impermeabilização de superfícies. Quando considerado o planejamento da ocupação prevista no Plano Diretor Urbano (PDU) de Duque de Caxias, o projeto convencional de canalização tornou-se obsoleto, apresentado extravasamentos da calha em diversos pontos. Porém, quando considerado o projeto sustentável com medidas distribuídas na bacia, os problemas de inundações apresentaram-se em menor gravidade, demandando talvez uma pequena nova intervenção para adequar o trecho com problemas.

É importante lembrar que o artifício de modelagem utilizado para simular o cenário de urbanização com **adensamento segundo o PDU** foi feito a partir de uma relação entre a ocupação definida no Zoneamento Urbano e a provável taxa média de impermeabilização que cada tipo de ocupação produziria. Essa relação, apesar de coerente, pode não representar a real situação da ocupação futura da bacia, uma vez que o PDU não introduz qualquer tipo de controle sobre a impermeabilização dos lotes e não especifica sequer uma taxa de adensamento para as Zonas de Ocupação. Essa falta de controle pode levar a um alto grau de impermeabilização da bacia, dependendo do nível das habitações, o que seria equivalente a um cenário com um **adensamento urbano de saturação**.

Para isso foi previsto um controle sobre a impermeabilização, simulado no cenário com **adensamento urbano controlado**. Neste caso, ambos os projetos tiveram melhorias significativas no quadro de inundações quando comparado com o cenário de saturação urbana. Porém, o cenário com projeto convencional implantado apresentou um panorama de inundações ainda muito crítico, se considerarmos que houveram investimentos para implantação do projeto, que deveria proteger a bacia contra inundações resultantes de chuvas com até 20 anos de tempo de recorrência (TR). Mas o que ocorreu é que mesmo em um evento menos freqüente, TR de 10 anos, o quadro de inundações apresentou-se generalizado, com diversos pontos de extravasamento da macrodrenagem.

Com as medidas distribuídas na bacia, referentes ao projeto sustentável, o cenário futuro com controle da impermeabilização dos lotes resultou em quadros de inundações aceitáveis, com apenas um ponto de extravasamento da calha do rio Pilar para a planície quando considerado um evento hidrológico com 20 anos de tempo de recorrência. Apesar do mapa de inundações apresentar-se similar ao obtido pelo cenário com adensamento urbano segundo o PDU, deve-se ressaltar novamente, que a falta de controle sobre a impermeabilização de superfícies no Plano Diretor pode acarretar em um cenário de impermeabilização da bacia urbanizada similar ao de adensamento de saturação.

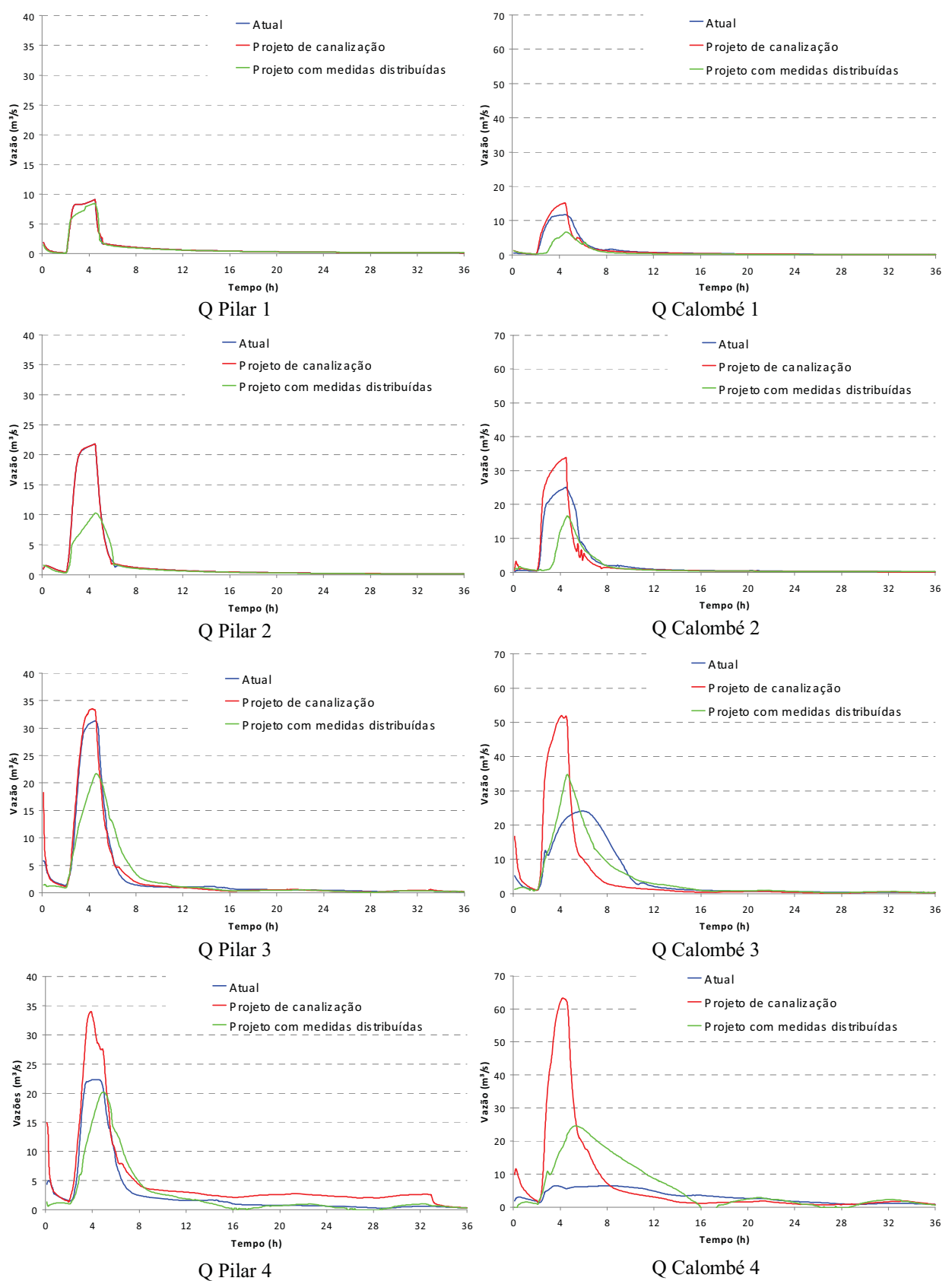


Figura 6.42 – Hidrogramas de cheia para a situação atual e para os cenários de projeto com canalização e com medidas distribuídas na condição de uso do solo atual – TR20 (ver Figura 6.27 para localização das seções)

Tabela 6.7 – Vazões de pico de cheia para o rio Pilar nos diferentes cenários simulados

Condição do uso do solo	TR (anos)	Condição da Macrodrenagem			
		0 - Atual	1 - Projeto com Canalização	2 - Projeto com medidas distribuídas	$\frac{(2-1)}{1}$
Atual	TR10	17,17 m ³ /s	32,08 m ³ /s	15,78 m ³ /s	-51%
	TR20	17,47 m ³ /s	34,73 m ³ /s	17,38 m ³ /s	-50%
	TR50	17,88 m ³ /s	36,51 m ³ /s	19,35 m ³ /s	-47%
Futuro com adensamento urbano segundo PDU	TR10	-	38,89 m ³ /s	20,25 m ³ /s	-48%
	TR20	-	39,39 m ³ /s	21,60 m ³ /s	-45%
	TR50	-	41,36 m ³ /s	23,43 m ³ /s	-43%
Futuro com adensamento urbano de saturação	TR10	-	41,58 m ³ /s	25,05 m ³ /s	-40%
	TR20	-	42,69 m ³ /s	26,92 m ³ /s	-37%
	TR50	-	43,66 m ³ /s	28,56 m ³ /s	-35%
Futuro com adensamento urbano controlado	TR10	-	39,00 m ³ /s	20,08 m ³ /s	-49%
	TR20	-	39,73 m ³ /s	21,48 m ³ /s	-46%
	TR50	-	41,30 m ³ /s	23,22 m ³ /s	-44%

Tabela 6.8 – Vazões de pico de cheia para o rio Calombé nos diferentes cenários simulados

Condição do uso do solo	TR (anos)	Condição da Macrodrenagem			
		0 - Atual	1 - Projeto com Canalização	2 - Projeto com medidas distribuídas	$\frac{(2-1)}{1}$
Atual	TR10	6,95 m ³ /s	59,25 m ³ /s	21,36 m ³ /s	-64%
	TR20	6,94 m ³ /s	64,20 m ³ /s	23,96 m ³ /s	-63%
	TR50	6,98 m ³ /s	66,90 m ³ /s	26,46 m ³ /s	-60%
Futuro com adensamento urbano segundo PDU	TR10	-	63,06 m ³ /s	22,16 m ³ /s	-65%
	TR20	-	65,71 m ³ /s	24,86 m ³ /s	-62%
	TR50	-	68,10 m ³ /s	25,71 m ³ /s	-62%
Futuro com adensamento urbano de saturação	TR10	-	66,03 m ³ /s	23,87 m ³ /s	-64%
	TR20	-	67,25 m ³ /s	24,28 m ³ /s	-64%
	TR50	-	68,71 m ³ /s	24,34 m ³ /s	-65%
Futuro com adensamento urbano controlado	TR10	-	61,53 m ³ /s	21,09 m ³ /s	-66%
	TR20	-	64,56 m ³ /s	23,76 m ³ /s	-63%
	TR50	-	67,53 m ³ /s	25,25 m ³ /s	-63%

7. Conclusões e Recomendações

Neste capítulo serão expostas as conclusões alcançadas após a análise de todos os resultados do processo de modelagem da bacia, frente aos novos conceitos de controle de inundações urbanas revisados neste trabalho. O capítulo é dividido em dois itens, apresentando, em um primeiro momento, as conclusões do estudo, e, em seguida, sugerindo recomendações para possíveis novos estudos na mesma linha.

7.1. Conclusões

O presente estudo permite uma reflexão sobre os possíveis benefícios trazidos por um projeto de controle de inundações concebido a partir de um Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais, considerando medidas distribuídas na bacia em detrimento de uma abordagem de canalização convencional.

Considera-se que foram alcançados todos os objetivos pretendidos no início deste estudo. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangendo tópicos de drenagem e controle de inundações, apresentando os conceitos modernos de um planejamento sustentável de águas pluviais. A partir disso, foi elaborado um conjunto de medidas de controle de inundações baseado nestes conceitos para aplicação na bacia do rio Pilar/Calombé. A validade das medidas propostas foi avaliada com uso do Modelo de Células de Escoamento, assim como os possíveis efeitos de diferentes cenários de desenvolvimento da urbanização sobre a macrodrenagem, confrontando esses resultados com os de um projeto convencional de canalização.

Foram contabilizadas as áreas de inundação de cada cenário simulado, a fim de se calcular a parcela da bacia que sofre alagamentos. Essa tarefa permitiu a construção da Tabela 7.1, que apresenta as porcentagens de área da bacia inundada em cada cenário, possibilitando uma melhor compreensão e uma análise mais sensível dos resultados. A parcela da bacia inundada durante um evento hidrológico foi contabilizada de duas formas: uma primeira, considerando toda e qualquer área com presença de água acima de 5 centímetros; e uma segunda, considerando apenas as áreas com profundidade de alagamento superior a 15 centímetros. A primeira abordagem permite calcular a área total da mancha de inundação apresentada nos mapas, já a segunda considera apenas as áreas com inundações mais severas, que possuem maior potencial para causar danos às edificações, de acordo com o padrão encontrado na bacia.

Tabela 7.1 – Porcentuais de área da bacia inundada em cada cenário, para eventos hidrológicos com tempos de recorrência (TR) de 20 e 50 anos

CENÁRIOS		TR20		TR50	
Condição	Uso do solo	% Área da bacia com alagamentos	% Área da bacia com alagamentos > 15cm	% Área da bacia com alagamentos	% Área da bacia com alagamentos > 15cm
0 - Diagnóstico	Atual	19,19%	5,58%	19,41%	8,32%
	Atual	0	0	10,43%	0,42%
1 – Projeto convencional	Adensamento urbano de saturação	37,75%	5,27%	38,03%	17,65%
	Adensamento urbano segundo PDU	13,82%	1,29%	26,12%	5,27%
	Adensamento urbano controlado	13,82%	1,29%	28,86%	4,74%
2 – Projeto sustentável	Atual	0	0	0,09%	0,02%
	Adensamento urbano de saturação	7,40%	0,16%	13,62%	2,43%
	Adensamento urbano segundo PDU	0,84%	0,02%	6,84%	0,16%
	Adensamento urbano controlado	0,77%	0,02%	2,83%	0,09%

O projeto considerando medidas de controle distribuídas na bacia, simulado na **Condição 2**, obteve um ótimo resultado para o controle das inundações apresentadas no estudo de diagnóstico, demandando um investimento similar ao do projeto convencional de canalização. Os efeitos alcançados com esse projeto, em termos de redução da área alagada, mantiveram-se significativos em todos os cenários futuros simulados, desde a total falta de controle sobre o uso do solo (cenário de **adensamento urbano de saturação**) até o controle através de taxas máximas de impermeabilização dos lotes (cenário de **adensamento urbano controlado**). Os resultados das inundações desses cenários apresentaram áreas inundadas, com mais de 15 cm de profundidade, inferiores a 1% de toda a bacia. Para um cenário de desenvolvimento urbano com controle do uso do solo, a área inundada, com mais de 15 cm de profundidade, representa apenas 0,09% da área da bacia, enquanto que a não consideração desse controle, resulta em uma inundação sobre 2,43% da bacia.

Dessa maneira, conclui-se que a **Condição 2** – Projeto Sustentável com uso de medidas de controle de inundações distribuídas na bacia apresenta-se satisfatória quanto à proteção ao risco de inundações, possibilitando um controle ao longo do tempo, em paralelo e de forma integrada com o processo de desenvolvimento urbano da região.

Com os resultados das simulações fica possível destacar, ainda, a grande importância que o planejamento do controle do uso e da ocupação do solo apresenta para se efetivar um projeto de controle de inundações com a validade espaço-temporal requerida. A falta de controle sobre o uso do solo, simulada no cenário futuro com adensamento urbano de saturação, invalidou as duas soluções estudadas, reapresentando pontos de inundação na bacia. Porém, quando considerada uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos, houve uma significativa redução na área inundada, com profundidades superiores a 15 cm, para a condição com Projeto Sustentável implantado em relação ao Diagnóstico, passando de 5,58% para 0,16% da área da bacia, enquanto que para o Projeto Convencional, esse valor passou para 5,27%.

No trecho do rio Pilar a jusante da confluência com o rio Calombé, o controle sobre a urbanização, através de limites de impermeabilização dos lotes, resultou em uma redução do volume de água escoada pelo rio e, também, da profundidade da inundação na planície marginal neste trecho, quando comparado com um cenário de adensamento urbano de saturação (sem controle sobre a urbanização). Porém, o controle do uso do solo, neste caso,

não foi suficiente para impedir o extravasamento da calha principal do rio para a planície urbana.

Ainda assim, a análise dos efeitos futuros da urbanização sobre o sistema de macrodrenagem demonstra uma clara superioridade do projeto sustentável frente ao projeto convencional. Em todos os cenários futuros simulados, os efeitos da urbanização sobre a rede de macrodrenagem, quando considerada apenas a canalização dos rios, foram mais graves que quando consideradas medidas distribuídas na bacia, resultando, para aquele caso, em áreas de inundação mais extensas e com maior profundidade.

Deve-se ressaltar ainda, que na concepção de um projeto sustentável é considerado o controle sobre o uso do solo como uma das medidas a serem respeitadas no Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais, não sendo esta medida uma posição recorrente em projetos de controle de inundações convencionais. Porém, mesmo quando considerado o controle do uso do solo em um cenário de urbanização futura, o projeto convencional de canalização demonstrou-se insatisfatório, retornando a ocorrer diversos pontos de extravasamento da calha principal dos rios para a planície urbana. Esse quadro indica a necessidade de readequação da rede de macrodrenagem, de forma a suportar as novas vazões geradas pelo aumento do escoamento superficial na bacia mais impermeável, o que demandaria mais investimentos do Poder Público para novas intervenções a fim de solucionar esses problemas.

Macêdo *et al.* (2004) estimaram custos de impactos causados por inundações em três diferentes momentos, avaliando cenários tendenciais e com políticas públicas para mitigação desses impactos, sendo consideradas políticas públicas **permissivas** (A), **moderadas** (B) e **rígidas** (C). O resultado desse estudo demonstra a grande economia que poderia ser feita se considerássemos políticas públicas mais rigorosas, chegando a reduzir os custos dos impactos em até 70% em relação aos cenários tendenciais e, ainda, reduzir os custos futuros em 50% quando comparados com os atuais.

O projeto sustentável com uso de medidas distribuídas na bacia apresentou-se então qualificado para o controle de inundações na bacia do rio Pilar/Calombé, desde que acompanhado de um plano de ações envolvendo o treinamento técnico de projetistas, a educação da população, um sistema de controle sobre as medidas propostas e uma articulação com o Plano Diretor Urbano, garantindo, assim, a sustentabilidade das soluções ao longo do tempo.

Será imprescindível para se alcançar a real sustentabilidade do projeto, o planejamento do uso e ocupação do solo da bacia, considerando o controle sobre as taxas de impermeabilização de futuros loteamentos, como demonstrado nas simulações dos cenários futuros de desenvolvimento urbano. Quando considerada uma chuva com tempo de recorrência de 20 anos precipitada sobre a bacia, com a condição de projeto sustentável implantado, e os cenários futuros de urbanização sem controle (com adensamento urbano de saturação) e com controle da impermeabilização, os mapas de inundação apresentam o efeito de cada cenário sobre a bacia, possibilitado a visualização do grande impacto causado pela urbanização descontrolada.

Em diversos pontos da sub-bacia do rio Calombé, as taxas de impermeabilidade do solo apresentam-se muito elevadas, sendo necessária também, a previsão de medidas compensatórias sobre a drenagem desses locais, como reservatórios de lote, tetos verdes, e outras medidas de controle na fonte. A restrição sobre a ocupação do solo deve ser acompanhada de alternativas econômicas para o proprietário, de modo que ele não sofra prejuízos que o incentivariam a desobedecer à legislação. O simples impedimento do uso do espaço privado, ainda que em pró do bem público, deve ser compensado pelo público beneficiado, para não ser caracterizado como um confisco (TUCCI, 2005).

O projeto formulado para controle de inundações na bacia do rio Pilar/Calombé, nomeado por **projeto sustentável de controle de inundações com uso de medidas distribuídas na bacia**, possibilita o atendimento às metas de projeto propostas por Alshuwaikha e Nkwenti (2001, **appud** SOUZA et al., 2005), definidoras de um projeto sustentável. São elas:

- ✓ A formulação de uma política de planejamento que possa ser continuada e avaliada pelas futuras gerações de planejadores, administradores e cidadãos;
- ✓ A criação de uma estrutura socioeconômica viável, capaz de garantir equidade e reduzir externalidades;
- ✓ A criação de uma estrutura sociocultural para conservar o legado e a cultura de uma dada comunidade;
- ✓ O estabelecimento de uma infraestrutura viável para restringir o impacto ambiental negativo e encorajar o uso eficiente dos recursos.

A primeira meta pode ser atendida pela aplicação do Plano de Manejo Sustentável de Águas Pluviais, o qual possui instrumentos suficientes para incentivar a sua continuidade. No segundo item, o atingimento desta meta dependerá de uma política de financiamento do sistema, podendo ser baseado no conceito de rateio dos custos de implementação das obras do Plano e de operação e manutenção da rede, que propiciam uma distribuição destes custos proporcionalmente à demanda pelo uso do sistema (TUCCI, 2002).

Para garantir o cumprimento das duas últimas metas, pode-se adequar as medidas de controle por retenção para agregar funções paisagísticas e de lazer às funções hidráulicas desses dispositivos, assim como previsto neste trabalho. Essa medida propicia um maior valor urbano e ambiental do espaço, criando um local de encontro, contemplação e prática de esportes, o que torna a paisagem urbana mais amena e auxilia na mitigação de impactos ambientais.

7.2. **Recomendações**

A imensa riqueza de assuntos associada ao tema “Controle de Inundações” nos obriga a priorizar algumas áreas de estudo, deixando algumas lacunas ao longo da pesquisa. Dessa maneira, não foram considerados neste estudo os aspectos ligados ao controle qualitativo das águas pluviais, devendo estes aspectos serem contemplados para que realmente seja atingido a meta de sustentabilidade proposta.

O calamitoso quadro de inundações urbanas apresentado no Brasil, juntamente com a falta e ineficiência dos serviços de saneamento, atualmente generalizada em todo o país, dificulta uma abordagem do controle de inundações levando em conta medidas para mitigar os impactos da água pluvial, drenada de áreas urbanas, na qualidade dos corpos hídricos, uma vez que a quase totalidade dos corpos d’água apresentam um alto grau de degradação, principalmente pela presença de lançamento de águas residuárias **in natura**. Um exemplo desse problema é apresentado no reservatório de retenção “Parque Marinha do Brasil”, em Porto Alegre, que apesar de ter sido projetado para receber apenas águas pluviais, após a sua construção, uma grande quantidade de contribuição de águas residuárias foi identificada, tendo origem, principalmente, em ligações clandestinas de esgotamento sanitário na rede de drenagem (GOLDENFUN *et al.*, 2007).

No intuito de se reverter esse quadro, devem ser estabelecidos padrões de qualidade das águas a serem alcançados em um determinado período, prevendo ações e intervenções que permitam

o atingimento desses padrões dentro do prazo requerido. Desta forma, podem-se prever estruturas de controle de inundações preparadas para agir na busca de um balanço entre a qualidade e a quantidade.

Goldenfun *et al.* (2007) identificam, descrevem e apontam possíveis soluções para alguns dos principais entraves que dificultam e restringem a implementação de planos sustentáveis de águas pluviais em países periféricos. São abordadas pelos autores a falta de dados hidráulicos e hidrológicos e a expansão urbana sem controle, considerando também, dificuldades na implantação de dispositivos de controle distribuídos, como a questão da qualidade da águas, o mau dimensionamento e execução das estruturas, a falta de instrumentos legais e dificuldade de aprovação de novas legislações, restrições no planejamento urbano, problemas políticos e institucionais e, ainda, oposição pelos técnicos projetistas, gestores públicos e pela população, principalmente pela falta de conhecimento sobre o assunto. Como um caminho para se iniciar a busca por soluções a esses problemas, os autores citam, na conclusão do estudo:

“Esses problemas podem ser abordados por uma combinação de ações educacionais e administrativas, no intuito de se promover integração institucional e transferir conhecimento do setor de pesquisa para a população.” (GOLDENFUN *et al.*, 2007)

Outro importante aspecto a ser considerado são os estudos econômicos do controle de inundações. O benefício alcançado por um projeto de drenagem é tomado como a diferença entre os seus custos de implantação e manutenção ao longo de sua vida útil e os prejuízos causados pelo evento hidrológico para o qual se pretende proteger uma dada área, caso não fosse tomada nenhuma ação de controle. O cálculo dos danos causados pelas inundações demanda um grande número de informações específicas da bacia, como nível e padrão de urbanização, tipo de construções, nível de renda da população residente, etc.

Inicialmente, pretendia-se analisar os benefícios de cada alternativa proposta, a fim de se confrontar economicamente diferentes concepções de controle de inundações, discutidas neste trabalho. No decorrer da pesquisa foram encontradas diversas dificuldades que inviabilizaram a utilização da metodologia de análise de danos das inundações. Uma delas foi a baixa densidade de ocupação encontrada em grande parte da bacia, somada a uma grande parcela de habitações de baixa renda, o que na análise dos benefícios do controle de inundações, provavelmente resultaria em danos inferiores aos custos de implantação das intervenções de controle.

A análise econômica dos benefícios do controle de inundações é muito importante, porém, ainda encontra-se em um estágio com grandes dificuldades em auferir com maior precisão os benefícios não tangíveis desse controle, como a redução da violência devido à redução de áreas urbanas degradadas, o aumento da confiança da população e de sua identidade com o espaço urbano e sua vizinhança. Segundo Jacobi (2006) “Os fatores apontados como determinantes para a atenuação da violência são a presença de capital social e o acesso a direitos, onde se destacam o direito a educação, saúde, cultura e **lazer**.” Dessa maneira, apresenta-se imensamente oportuno a consideração das técnicas de paisagens multifuncionais, agregando às medidas de controle de inundações, as funções paisagísticas e de lazer, garantindo a preservação ambiental e a valorização do espaço urbano. Mesmo alguns benefícios tangíveis são difíceis de mensurar, como, por exemplo, a valorização imobiliária e a redução de gastos em saúde pública.

Uma vez ignorados os benefícios sociais que um gerenciamento sustentável da cidade pode oferecer, corre-se o risco de continuarmos reféns de análise parciais, as quais contemplam apenas os benefícios financeiros instantâneos e localizados de uma intervenção.

Referências Bibliográficas

ALLASIA, D.G. et al., 2003, **Estudo de caso: Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre/RS**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba/PR. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

BAPTISTA, M., NASCIMENTO, N., BARRAUD, S., 2005, **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH, Porto Alegre, 2005, 266 p.

BRASIL – Lei Federal 4.771, de 15 de setembro de 1965, **Código Florestal**, 1965.

BRASIL – Lei Federal 6.766, de 19 de dezembro de 1979, **Lei de Parcelamento do Solo Urbano**, Senado Federal, 1979.

BRASIL – Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, **Lei das Águas**, Senado Federal, 1997.

BRASIL – Lei Federal 10.257 de 10 de julho de 2001, **Estatuto da Cidade**, Senado Federal, 2001.

BRASIL – Lei Federal 11.445, de 5 de janeiro de 2007, **Lei de Saneamento**, Senado Federal, 2007.

BRASIL – Ministério das Cidades, **Manual de Drenagem Urbana Sustentável**, Brasília, DF, 2004.

BRASIL – Ministério das Cidades, **Glossário de Drenagem Urbana Sustentável**, Brasília. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/saneamento-ambiental/biblioteca/GlossarioSaneamento060206.pdf/view>>. Acesso em: 01 jun. 2009.

BRASIL – Ministério da Integração Nacional, 2006, **Manual para Apresentação de Propostas**, Programa 1138 – Drenagem Urbana Sustentável. Brasília - DF.

BURIAN, S.J. et al., 1999, Historical Development of wet-weather flow management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 125 (1): 3-11.

BURIAN, S.J. EDWARDS, F.G., 2002, **Historical perspectives of urban drainage**, Global Solutions for Urban Drainage; CD-ROM Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage, 8-13, Setembro de 2002, Portland.

CANHOLI, A.P., 2005. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de Textos, São Paulo. 304 p.

CARDOSO, A.S., 2008, **Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação de Alternativas de Intervenção em Cursos de Água em Áreas Urbanas**. 183 f. Dissertação de M.Sc. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://cadastrochidro.ana.gov.br/arquivos/dissertao.pdf>>. Acesso em: 3 mar. 2010.

CARNEIRO, P.R.F., 2003, **Dos Pântanos à Escassez: A Construção Social dos Conflitos em torno do Uso da Água na Baixada dos Goytacases, no Norte Fluminense**. Dissertação de M.Sc., IPPUR/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARNEIRO, P.R.F., 2008. Controle de Inundações em Bacias Metropolitanas Considerando a Integração do Planejamento do Uso do Solo à Gestão dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia dos rios Iguaçu/Sarapuí na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 296 f. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHOCAT, B et al., 2007, Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water. **Indoor And Built Environment**: International Society of the Built Environment, p. 273-285.

CIRIA, 2007, **The SUDS Manual**, C697. Disponível em: < <http://www.ciria.org.uk/suds>>. Acesso em: 7 jul. 2008.

COFFMAN, L. et al., 1998, **Low-Impact Development: Hydrologic Analysis and Design**. In: LOUCKS, Eric D (Comp.). Water Resources and the Urban Environment. Illinois: Asce., p. 1-35.

COPPETEC, 2003, Modelagem Matemática de Cheias Urbanas, Através de Células de Escoamento, como Ferramenta na Concepção de Projetos Integrados de Combates às Enchentes: Apresentação da Modelação Topográfica e da Topologia Associada. Relatório II - PEC 4221 – Projeto CT-Hidro/GBH nº 520093/2003-8.

COPPETEC, 2003, Modelagem Matemática de Cheias Urbanas, Através de Células de Escoamento, como Ferramenta na Concepção de Projetos Integrados de Combates às Enchentes: Detalhamento das Obras Propostas para a Bacia do Rio Joana. Relatório VI - PEC 4221 – Projeto CT-Hidro/GBH nº 520093/2003-8.

COPPETEC, 2009, **Plano Diretor de Recursos Hídricos, Recuperação Ambiental e Controle de Inundações da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí**, Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente, COPPE/UFRJ. Disponível em: < www.hidro.ufrj.br >. Acesso em: 10 mar. 2010.

D'ALTÉRIO, C.F.V., 2004, Metodologia de Cenários Combinados para Controle de Cheias Urbanas com Aplicação à Bacia do Rio Joana, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FREEMAN, P.K., 2000, Infrastructure , Natural Disasters and Poverty. In: **Managing Disaster Risk in Emerging Economies**. KREIMER, A., ARNOLD, M., (Comp.), Washington D.c.: The World Bank, 2000. Cap. 5, p. 55-61. (Disaster Risk Management).

GOLDENFUM J.A.; TASSI R.; MELLER A.; ALLASIA D.G.; DA SILVEIRA A.L.L., 2007, **Challenges for the Sustainable Urban Stormwater Management in Developing Countries**: From basic education to technical and institutional issues. In: NOVATECH 2007, Lyon. Proceedings of NOVATECH 2007. Lyon : GRAIE. p. 357-364.

HOLZ, J.; TASSI, R., 2007, **Usando Estruturas de Drenagem Não Convencionais em Grande Áreas: O Caso do Loteamento Monte Bello**. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25 a 29 de novembro de 2007, São Paulo. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, p. 1 - 19.

JACOBI, Pedro Roberto, 2006, Impactos sócio-ambientais urbanos na Região Metropolitana de São Paulo. **Veracidade**: Secretaria Municipal de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente, Salvador, BA, Salvador, v. 1, n. 1, p.10-20, dez. 2006. Disponível em: <<http://www.veracidade.salvador.ba.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2010.

JONES, J.E. et al., 2005, **Urban Storm-Water Regulations: Are Impervious Area Limits a Good Idea?**, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Reston, p. 176-179. Disponível em: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?0500783>>. Acesso em: 30 jan. 2010.

LABHID – Laboratório de Hidrologia/COPPE/UFRJ, 1996, **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Iguaçu/Sarapuí**: Ênfase no Controle de Inundações. SERLA. Rio de Janeiro.

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, 18p.

MACÊDO, R.F. et al, 2004, **Cenários de Políticas de Controle de Impactos Devido a Inundações**. I Seminário Latinoamericano de Políticas Públicas em Recursos Hídricos, Brasília, DF. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

MAGALHÃES, L.P.C. de; MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G., 2003, **Modelo Hidráulico-Hidrológico Distribuído Aplicado à Bacia do Rio Joana/RJ**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba/PR. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre/RS : Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. v. 1. p. 23-37.

MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G., 1994, Modelação de Grandes Planícies de Inundação por um Esquema de Células - Aplicação ao Pantanal de Mato-Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia (RBE)**, Caderno de Recursos Hídricos, v.12, n.2.

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/PB, Brasil, novembro de 1998.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; CAMPOS, R.O.G., 2000, **Aplicação de Um Modelo de Células para Avaliação de Diferentes Soluções Para o Problema de Enchentes Urbanas**: Estudo de Caso do Rio Maracanã/RJ. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal/RN, Brasil, novembro de 2000.

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.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; MAGALHÃES, L.P.C. de; PRODANOFF, J.H.A., 2005, **On-site stormwater detention as an alternative flood control measure in ultra-urban environments in developing countries**. IAHS-AISH Publication, v. 293, p. 196-202.

MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G., MAGALHÃES, L.P.C. de, PRODANOFF, J.H.A., 2007, **Comparison of different multifunctional landscapes approaches for flood**

control in developing countries. In: NOVATECH 2007, Lyon. Proceedings of NOVATECH 2007. Lyon : GRAIE. p. 83-90.

MARQUES, C.E.B., 2006, **Proposta de Método para a Formulação de Planos Diretores de Drenagem Urbana**, Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168p.

MIGUEZ, M., G., MASCARENHAS, F.C.B. Modelação Matemática de Cheias Urbanas Através de um Esquema de Células de Escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v.4, n.1, p. 119-140, ISSN 1414-381X, janeiro a março de 1999.

MIGUEZ, M.G., 2001, **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, L.P.C. de, 2005, **Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries**. In: Second International Conference on Sustainable Planning & Development, 2005, Bologna/Italy. Proceedings of the Sustainable Planning 2005. Southampton and Boston : WITpress - Wessex Institute of Technology.

MIGUEZ, M.G., MAGALHÃES, L.P.C., 2010, **Urban Flood Control, Simulation and Management: an Integrated Approach**.

NAGEM, F.R.M., 2008, **Avaliação Econômica dos Prejuízos Causados Pelas Cheias Urbanas**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NASCIMENTO, N.O. et al., 2003, **Drenagem urbana: características econômicas e definição de uma taxa sobre os serviços**. Relatório de Projeto de Pesquisa, FINEP e CT-HIDRO, Belo Horizonte.

NASCIMENTO, N.O., BAPTISTA, M.B., 2009, **Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais**. In: RIGHETO, A.M., Manejo de Águas Pluviais Urbanas, Projeto PROSAB, Natal, RN: ABES. Cap. 4, p. 149-197

ONTARIO – Ministry of Environment and Energy, Ministry of Natural Resources, 1993, **Water Management on a Watershed Basis: Implementing an Ecosystem Approach**.

Queen's Printer for Ontario, Ontario, Canada. Disponível em: < www.mnr.gov.on.ca >. Acesso em: 06 mar. 2010.

OUERJ – Observatório Urbano do Estado do Rio de Janeiro, 2003, **Elaboração de Projetos de Macrodrenagem dos Canais: Caboclos, Calombé e Capivari**. Programa de Saneamento Ambiental e Desenvolvimento Econômico e Social do Município de Duque de Caxias – PROSADUQUE.

POMPÊO, C. A., 1999, Development of a state policy for sustainable urban drainage. *Urban Water*, v. 1, p. 155-160.

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.

RIGHETTO, A.M., MOREIRA. L.F.F., SALES, T.E.A., 2009, **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. In: RIGHETTO, A.M., **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**, Projeto PROSAB, Natal, RN: ABES. Cap. 1, p. 19-73.

RIGUETTO, J.M., MENDIONDO, E.M., 2004, **Avaliação de Riscos Hidrológicos e Propostas de Seguros Contra Enchentes**. Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, Goiânia.

RIO DE JANEIRO (Estado) – Lei Estadual 3.239, de 2 de agosto de 1999, **Política Estadual de Recursos Hídricos**, Assembléia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SALGADO, J.C.M., 1995, **Avaliação Econômica de Projetos de Drenagem e de Controle de Inundações em Bacias Urbanas**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 100 f.

SILVEIRA, A.L.L. da, 2004, **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica**. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, Cap. 2, p. 35-51.

STAHRE, P., 2005, **15 Years Experiences of Sustainable Urban Storm Drainage in the City of Malmo, Sweden**, World Water and Environmental Resources Congress, 15 a 19 de maio de 2005, Alaska. Disponível em: <<http://www.ascelibrary.org>>. Acesso em: 07 abr. 2009.

SOUZA, F.S., TUCCI, C.E.M., POMPÊO, C.A., 2005, **Diretrizes para o Estabelecimento de Loteamentos Urbanos Sustentáveis**, IV Encontro Nacional de Águas Urbanas, maio de 2005, Belo Horizonte.

TORONTO AND REGION CONSERVATION, 2006, **Water Budget Discussion Paper**, Gartner Lee Ltd, Toronto, 37p., Disponível em: <<http://www.sustainabletechnologies.ca>>. Acesso em: 30 jan. 2010.

TUCCI, C.E.M., 1995, **Controle de Enchentes**, in: Drenagem Urbana, Editora da Universidade/ABRH, Porto Alegre, Cap. 1.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L. e BARROS, M.T., 1995, **Drenagem Urbana**. UFRGS Ed. da Universidade/ABRH, Porto Alegre, 430 p.

TUCCI, C.E.M., 1997, Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5-12.

TUCCI, C.E.M., 2000, Coeficiente de escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R. L. 2001. **Storm hydrology and urban drainage**. In: Tucci, C. Humid Tropics Urban Drainage, capítulo 4. UNESCO.

TUCCI, C.E.M., 2002, Gerenciamento da Drenagem Urbana, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 7, n. 1.

TUCCI, C.E.M., BERTONI, J.C., 2003, **Inundações Urbanas na América do Sul**, Porto Alegre: ABRH, 150 p.

TUCCI, C.E.M., 2005, **Gestão das Águas Pluviais Urbanas**: Saneamento para todos. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília, DF. 197 p.

TUCCI, C.E.M., 2007, **Inundações Urbanas**,. Porto Alegre: ABRH/RHAMA. 393 p.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT, 1999, **Urban Storm Drainage Criteria Manual**, Vol. 3 - Best Management Practices, Revisão 2008, Urban Drainage and Flood Control District, Denver

URBONAS, B., STAHRÉ, P., 1993, Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management, New Jersey: Prentice Hall, 449 p.

WILKEN, P.S., 1978, **Engenharia de Drenagem Superficial**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 478p.