CÁREN IZABEL OLIVEIRA ROCHA

**PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA EM CIDADES
PLANEJADAS: PREMISSA DE ZONEAMENTO BASEADO NO RISCO
DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

**SÃO PAULO
2014**

CÁREN IZABEL OLIVEIRA ROCHA

**PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA EM CIDADES
PLANEJADAS: PREMISSA DE ZONEAMENTO BASEADO NO RISCO
DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Recursos Hídricos

Orientador:
Prof. Dr. Mario Thadeu Leme de Barros

**São Paulo
2014**

FICHA CATALOGRÁFICA

Rocha, Cáren Izabel Oliveira

**Plano diretor de drenagem urbana em cidades planejadas:
premissa de zoneamento baseado no risco de contaminação da
água subterrânea / C.I.O. Rocha. -- São Paulo, 2014.
96 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Am-
biental.**

**1.Drenagem urbana 2.Águas subterrâneas 3.Zoneamento
urbano I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-
tamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II.t.**

Aos meus pais, Marilene e Juvêncio, e meus
irmãos, Érica e João Paulo, por todo
o apoio, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por me dar tantas oportunidades nesta vida e à Nossa Senhora por sempre me mostrar o melhor caminho e me proteger.

Ao meu querido amigo e orientador Mario Thadeu Leme de Barros, pela dedicação, auxílio e acompanhamento, pela orientação, contribuição e acolhimento durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

À minha família e amigos pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP e seu corpo docente, especialmente à Mônica Ferreira do Amaral Porto e Rubem La Laina Porto, pelo aprendizado ao longo do curso.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa, Erika Naomi de Souza Tominaga, Júlio Fracarolli Canholli e Vanesca Sartorelli Medeiros.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela bolsa de estudos, que foi de grande ajuda para o desenvolvimento dessa pesquisa.

À Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), pela bolsa de estudos para a elaboração da dissertação.

Ao professor do Centro Universitário Luterano de Palmas, Carlos Spartacus da Silva Oliveira, que foi meu orientador da graduação em Engenharia Civil, pela amizade, motivação e apoio no meu aprendizado e desenvolvimento do trabalho.

Ao professor da Universidade Federal do Tocantins, João Aparecido Bazolli, pela atenção e contribuição na minha pesquisa de campo, na cidade de Palmas.

Aos amigos, aos colegas e às inúmeras pessoas de diversos órgãos e entidades que colaboraram de alguma forma com essa pesquisa, os meus sinceros agradecimentos.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão
uma gota de água no oceano. Mas o oceano
seria menor se lhe faltasse uma gota.
(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Analizando o potencial risco de contaminação das águas devido à falta de planejamento e de gestão integrada dos recursos hídricos, o trabalho desenvolvido, intitulado *“PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA EM CIDADES PLANEJADAS: Premissa de Zoneamento Baseado no Risco de Contaminação da Água Subterrânea”*, propõe que os Planos Diretores Municipais sejam elaborados visando à preservação quali-quantitativa não somente das águas superficiais, mas também das subterrâneas. Para isso, a pesquisa sugere técnicas de zoneamento urbano e adoção de alternativas de Drenagem BMPs (*Best Management Practices*) baseadas no risco de contaminação das águas subterrâneas, apresentadas como premissa na elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana para cidades planejadas. Assim, o zoneamento de áreas urbanas foi analisado de forma a minimizar a contaminação de aquíferos, tanto pelo uso direto, quanto pela poluição difusa provocada pela precipitação. Servindo, de tal modo, como premissa na determinação das alternativas estruturais e não-estruturais a serem adotadas, principalmente quanto à adoção de dispositivos de drenagem com infiltração no solo. A análise integrada do mapa de vulnerabilidade existente (CPRM, 2001) com o Mapa de Fontes Potenciais de Contaminação, desenvolvido a partir do zoneamento urbano vigente, subsidiou a elaboração do Mapa de Zoneamento Baseados no Risco à Contaminação de Águas Subterrâneas. Este, por sua vez, deu base à elaboração do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo, que analisado juntamente com os critérios de escolha das medidas de controle na fonte definidos por São Paulo (2012c), deu origem ao Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte. Neste estudo, a cidade de Palmas, capital do estado do Tocantins, é adotada como estudo de caso. A cidade surgiu em uma época em que o conceito de sustentabilidade estava em foco, contudo ela parece seguir os mesmos processos de desenvolvimento dos grandes centros urbanos, onde a urbanização não prevê impactos ambientais negativos e o adequado, portanto, pretende-se indicar soluções de drenagem adequadas para a cidade em desenvolvimento.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Zoneamento Urbano. Contaminação de Águas Subterrâneas.

ABSTRACT

Analyzing the potential risk of water contamination due to the lack of planning and integrated management of water resources, the ongoing study, “URBAN DRAINAGE MASTER PLAN FOR PLANNED CITIES: Zoning Premise Based on Risk of Groundwater Contamination”, suggests that the Municipal Master Plans are proposed to be developed aiming to preserve the quality and the amount not only of surface waters but also groundwater. The study intends to approach techniques of urban zoning based on the risk of groundwater contamination as a premise in the development of urban Drainage Master Plans for planned cities. Thus, this study analyzes zoning techniques and the adoption of alternative drainage BMPs (Best Management Practices) based on the risk of groundwater contamination as a premise in the development of Urban Drainage Master Plans for planned cities. For this, the zoning of urban areas is analyzed in order to minimize the contamination of aquifers, by direct use and by diffuse pollution. Serving as a premise in the determination of structural and nonstructural alternatives to be taken, especially regarding the adoption of drainage devices with soil infiltration. The integrated analysis of the maps gave rise to the Map of Implementation of BMPs. The Brazil capital's newest came at a time when the concept of sustainability was in focus, nevertheless it seems to follow the same processes of development of major urban centers. Being a city in full development and urbanization of areas contained in its master plan, it is intended to contribute to the elaboration of master plans of the city.

Keywords: Urban Drainage. Urban Zoning. Groundwater Contamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de aquífero quanto à pressão.....	27
Figura 2 - Tipos de aquífero quanto à geologia do material saturado.....	27
Figura 3 - Processos comuns de poluição da água subterrânea.....	33
Figura 4 - Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea.....	36
Figura 5 - Plano de infiltração.....	46
Figura 6 - Valos de infiltração.....	47
Figura 7 - Exemplo de bacia de percolação.....	48
Figura 8 - Instalação de Trincheira de infiltração.....	49
Figura 9 - Esquema do funcionamento de revestimentos permeáveis.....	50
Figura 10 - Experimentos do Laboratório de Hidráulica da EP-USP.....	51
Figura 11 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação	53
Figura 12 - Produção de Mapa de Vulnerabilidade usando o Sistema GOD.....	54
Figura 13 - Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea.....	57
Figura 14 - Metodologia de Análise Integrada dos Mapas.....	58
Figura 15 - Localização e Perímetro Urbano do Município de Palmas.....	64
Figura 16 - Mapa de Densidade Populacional de Palmas.....	65
Figura 17 - Mapa do Ordenamento do Solo Urbano de Palmas.....	66
Figura 18 - Mapa das Bacias Hidrográficas do Município de Palmas.....	68

Figura 19 - Bacias Hidrográficas em Meio Urbano – Bacia do Córrego da Prata em Destaque.....	69
Figura 20 - Províncias Hidrogeológicas do Brasil.....	70
Figura 21 - Sistemas Aquíferos da Região de Palmas.....	71
Figura 22 - Mapa de Vulnerabilidade da Região de Palmas – TO.....	74
Figura 23 - Mapa de Solos do Município de Palmas – TO.....	76
Figura 24 - Localização da Quadra na Bacia do Córrego da Prata.....	77
Figura 25 – Zoneamento Urbano da Área em Estudo – Destinação das áreas.....	78
Figura 26 - Zoneamento Baseado no Risco à Contaminação de Águas Subterrâneas.....	79
Figura 27 - Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo.....	81
Figura 28 – Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquíferos.....	30
Tabela 2 - Contaminantes comuns da água subterrânea e fontes de poluição.....	35
Tabela 3 - Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH.....	55
Tabela 4 - Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH.....	56
Tabela 5 - Fatores condicionantes para a implantação e operação das técnicas compensatórias em drenagem urbana.....	61
Tabela 6 - Matriz de aplicabilidade em relação ao uso e ocupação do solo.....	61
Tabela 7 - Matriz de aplicabilidade em relação às características locais.....	62
Tabela 8 - Matriz de aplicabilidade em relação à quantidade e qualidade.....	62
Tabela 9 - Demandas de Água Subterrânea por Bacia Previstas para 2003, 2010, 2015 e 2025.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Áreas de Proteção Ambientais
APP	Áreas de Proteção Permanentes
ARSO	Área Residencial Sudoeste
BMPs	Best Management Practices
CPA	Camada Porosa de Atrito
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos
DNAPLs	Dense Nonaqueous Phase Liquids
EPA	Environmental Protection Agency
GOD	Groundwater occurrence; Overall aquifer class; Depth
LID	Low Impact Development
OMS	Organização Mundial da Saúde
PDDUPA	Plano Diretor de Drenagem Urbana de Palmas
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PMP	Prefeitura Municipal de Palmas
POSH	Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
UHE	Usina Hidrelétrica
USP	Universidade de São Paulo
WSUD	Water Sensitive Urban Design

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FICHA CATALOGRÁFICA	10
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MEIO URBANO	19
2.1.1 Contextualização: A Urbanização e a Água	19
2.1.2 Aspectos Legais e Institucionais das Águas Subterrâneas no Brasil... ..	20
2.1.3 Aspectos Físicos dos Aquíferos	25
2.1.4 Vulnerabilidade à Contaminação de Aquíferos em Meio Urbano.....	26
2.1.5 Origem dos Poluentes	32
2.1.6 Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas	34
2.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	38
2.2.1 Zoneamento Urbano Baseado na Cartografia da Vulnerabilidade....	38
2.3 PLANOS DIRETORES DE DRENAGEM URBANA	40
2.3.1 Urbanização x Planos Diretores de Drenagem Urbana.....	40
2.3.2 Soluções de Drenagem Urbana Sustentável.....	43
2.3.2.1 Planos ou superfícies de infiltração	46
2.3.2.2 Valas e valetas de infiltração.....	47
2.3.2.3 Bacias de percolação e trincheiras de infiltração	48

2.3.2.4	<i>Pavimentos Permeáveis</i>	49
3	METODOLOGIA DE TRABALHO	52
3.1	MAPA DE VULNERABILIDADE	52
3.2	MAPAS DE FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO	55
3.3	ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DOS MAPAS ATRAVÉS DE SIG	57
3.4	CRITÉRIOS DE ESCOLHA DAS MEDIDAS DE CONTROLE NA FONTE	59
4	ESTUDO DE CASO	63
4.1	APRESENTAÇÃO	63
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	68
4.2.1	Localização da Área de Estudo e Aspectos Hidrográficos	68
4.2.1.1	<i>Hidrogeologia</i>	70
4.2.1.2	<i>Bacia do Córrego da Prata</i>	73
4.2.1.3	<i>Vulnerabilidade</i>	73
4.2.1.4	<i>Solos</i>	75
4.2.1.5	<i>Zoneamento Baseado no Risco à Contaminação da Água Subterrânea</i>	77
4.2.1.6	<i>Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo</i>	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6	RECOMENDAÇÕES	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

A falta de integração entre os planos de gestão de cidades que envolvem recursos hídricos traz muitos prejuízos à sociedade e ao meio ambiente. Atualmente, os esforços referentes à regulamentação dos instrumentos de gestão, ao desenvolvimento e divulgação dos sistemas de suporte à decisão e ao compartilhamento de experiências nos âmbitos local e regional têm ajudado na otimização dos modelos de gestão existentes, entretanto é preciso integrá-los para uma maior eficiência ao suprir as demandas da sociedade de forma sustentável.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi apresentado pela primeira vez em 1987, no relatório *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum), também conhecido como relatório Brundtland. Definindo que “desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades” (WCED, 1987, tradução nossa).

Segundo Granziera (2009), “o alcance, porém, do desenvolvimento sustentável não ocorre apenas com palavras e teorias, mas com uma transformação no modo de vida das pessoas e dos Estados, atendendo os processos de consumo e a forma de exploração de recursos naturais”.

A preocupação com a sustentabilidade envolve todos os segmentos da sociedade. Nesse contexto, as soluções adotadas para os sistemas de infraestrutura urbana também auferiram uma nova visão por parte da sociedade e dos responsáveis pela sua implantação. Para a drenagem urbana, entretanto, ainda estão sendo pouco adotadas as medidas que visam à integração e gestão da respectiva bacia hidrográfica como um todo, urgindo por uma nova abordagem e postura técnica diante dos problemas referentes à água no ambiente urbano.

Palmas (inaugurada em 1989), ao contrário de outras cidades planejadas como Belo Horizonte (inaugurada em 1897) e Brasília (inaugurada em 1960), surgiu em uma época em que a questão ambiental estava em foco e já se pensava na gestão sustentável do meio ambiente prevendo o uso racional dos recursos naturais. Contudo, as realidades atuais mostram que independentemente da época e do contexto em que as cidades surgiram, mesmo as que tiveram um plano urbanístico

inicial, as chamadas “cidades planejadas”, apresentam problemas socioambientais característicos das urbes sem planejamento *à priori*, diferenciando-se certamente na magnitude dos fatos.

Brasília é um excelente exemplo que permite confrontar a vontade planificadora inicial, dotada de grandes meios, com as realidades das práticas sociais, resultantes de conflitos entre invasões de terras, quer no perímetro do Plano Piloto, quer no Distrito Federal, levando o poder público a planejar, *a posteriori*, novos assentamentos urbanos, principalmente para os mais modestos (MATHIEU; MELLO, 2008).

A cidade de Palmas foi planejada para ser a capital do mais novo estado brasileiro, o Tocantins. Todavia, o plano inicial de ocupação do solo não foi seguido e atualmente a população se distribui de forma irregular, no perímetro urbano planejado e na sua periferia, formando grandes vazios urbanos e, assim, dificultando os processos de implantação de obras de infraestrutura, tornando ações locais e desintegradas. Desse modo, ela segue a tendência de repetir os processos de degradação ambiental comuns nos grandes centros urbanos do Brasil.

O acelerado processo de urbanização das cidades brasileiras, principalmente nas últimas décadas, com a ocupação irregular de Áreas de Proteção Ambientais (APA's), Áreas de Proteção Permanentes (APP's), áreas de mananciais, várzeas de inundação e encostas, dentre outras áreas impróprias ao uso, está relacionado aos problemas de drenagem existentes. Isso decorre do fato da urbanização alterar as condições naturais da bacia hidrográfica, principalmente a permeabilidade do solo, a capacidade de infiltração e outros parâmetros relacionados às diversas fases do ciclo da água. Vê-se a importância de se adotar práticas de drenagem adequadas que não comprometam a qualidade das águas superficiais e subterrâneas e não contaminem o subsolo.

Outro fator agravante é a inexistência de Planos Diretores de Drenagem Urbana que procurem diagnosticar e tratar os problemas de drenagem, tendo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão e prezando a integração das políticas públicas para o planejamento urbano, para o saneamento e para o manejo ambiental, que são princípios incorporados a partir da Lei Federal 9.433, de janeiro de 1997. De acordo com a minuta do Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas (PMP, 2014), o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Palmas está em fase de elaboração com prazo de implantação, plano completo, para 2017.

Os sistemas de drenagem urbana, abastecimento de água, esgotamento sanitário, coleta de resíduos sólidos e controle da poluição e de vetores constituem a infraestrutura de saneamento básico de uma cidade, prioritários em programas de saúde pública. Dessa forma, o grande desafio de um plano de águas pluviais, além de propor soluções para a redução dos riscos de inundação e de contaminação dos recursos hídricos, é promover a integração entre os serviços de saneamento, tanto no plano institucional como no técnico, com a efetiva implantação das medidas propostas.

Assim, analisando o potencial risco de contaminação das águas, devido à falta de planejamento e de gestão integrada dos recursos hídricos, e visando à preservação quali-quantitativa não somente das águas superficiais, mas também das subterrâneas, este estudo propõe que sejam abordadas técnicas de zoneamento urbano baseado no risco de contaminação das águas subterrâneas como premissa na elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana para cidades planejadas.

Isto é, analisam-se técnicas de zoneamento de áreas urbanas de forma a minimizar a contaminação de aquíferos, tanto pelo uso direto quanto pela poluição difusa provocada pela precipitação. Servindo, de tal modo, como premissa na determinação das alternativas estruturais e não-estruturais a serem adotadas, a partir de um mapeamento prévio sobre áreas que podem ou não adotar técnicas de infiltração, e promovendo, assim, a integração da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo. Neste estudo, a cidade de Palmas, capital do estado do Tocantins, é adotada como estudo de caso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma pesquisa sobre drenagem urbana sustentável em cidades planejadas, analisando-se a aplicação de premissa de zoneamento de áreas urbanas baseado no risco de contaminação da água subterrânea, através do mapeamento de vulnerabilidade e risco à contaminação dos aquíferos presentes na bacia urbana, na escolha de soluções indicadas pelas práticas de gestão sustentável, definidas por ASCE (2004), conhecidas internacionalmente pela sigla BMPs (*Best Management Practices*).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar o conceito de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos;
- b) Analisar o zoneamento urbano existente frente aos mapas de vulnerabilidade e risco à contaminação das águas subterrâneas;
- c) Analisar os métodos GOD e POSH para mapeamento e avaliação da vulnerabilidade e risco à contaminação dos aquíferos presentes na bacia;
- d) Apresentar o conceito de *Best Management Practices* (BMPs), estudando as medidas sustentáveis estruturais e não-estruturais a serem aplicadas;
- e) Desenvolver um zoneamento com áreas restritivas às soluções de drenagem com infiltração, a partir da concepção do mapa de risco à contaminação;
- f) Desenvolver um Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte, a partir da análise conjunta do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo com os critérios de escolha das medidas de controle na fonte definidos por São Paulo (2012c).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MEIO URBANO

2.1.1 Contextualização: A Urbanização e a Água

Sabe-se que a água ocupa cerca de 70% da superfície terrestre, sendo que aproximadamente 2,5% do total correspondem à água doce. A maior parcela de água doce (68,9%) forma as calotas polares, geleiras e neves eternas. Em seguida, 29,9% constituem as águas subterrâneas doces. Apenas 0,3% do total das águas doces do planeta estão nos rios e lagos (SHIKLOMANOV, 1998). Estes valores são, certamente, os mais consistentes, na medida em que foram gerados pelo *International Hydrological Programme* (REBOUÇAS et al., 2006a). No ciclo hidrológico, a água pode ser encontrada na atmosfera, na superfície ou em meio subterrâneo nos estados sólido, líquido ou gasoso a depender da região e condições climáticas em que se encontra.

A sociedade sempre interveio nos meios naturais para disponibilizar recursos para o atendimento de suas necessidades básicas e o desenvolvimento das cidades. Entretanto, este cenário comum à contemporaneidade não trouxe somente benefícios, uma vez que junto aos processos de urbanização surgiram vários problemas, principalmente os relacionados ao meio ambiente e recursos hídricos.

Por muitos anos, buscou-se suprir a demanda pela água sem a preocupação de se conservar as nascentes e seus respectivos cursos d'água, tanto na qualidade quanto na quantidade disponível. Tão importante quanto as águas superficiais estão as subterrâneas que ainda recebem menor atenção do que a dada àquelas, isto pode ser observado até mesmo nas legislações de recursos hídricos vigentes.

Em grandes centros urbanos, o uso intensivo dos recursos hídricos, com uma crescente demanda aliada à degradação da sua qualidade, os torna cada vez mais escassos agravando os conflitos pelo uso desse bem comum. Outro fator agravante é a inexistência ou ineficiência de legislação com medidas que procurem diagnosticar e tratar os problemas relacionados à presença e ao uso da água pela população, resultando em deficiência nos sistemas de abastecimento, coleta e tratamento de esgoto e de controle de cheias.

2.1.2 Aspectos Legais e Institucionais das Águas Subterrâneas no Brasil

De acordo com Lanna et al. (1998, p. 2):

No contexto desenvolvimentista brasileiro anterior à década de 50, as águas subterrâneas eram consideradas como reservas localizadas e eram utilizadas para suprir demandas domésticas e rurais de pequena escala através de fontes, poços isolados e pequenos campos de poços. Atualmente a água subterrânea tem destacada importância no cenário nacional apesar de ainda não receber por parte das autoridades competentes a devida atenção no que diz respeito a sua proteção e uso racional.

No Brasil, a primeira referência histórica de legislação de recursos hídricos é o Código das Águas - Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934 (LANNA et al., 1988). O seu Título IV trata das águas subterrâneas, inclusive quanto à sua poluição: “São expressamente proibidas construções capazes de poluir ou inutilizar para o uso ordinário a água do poço ou nascente alheia, a elas preexistentes”. Também pertinente, no Título VI: “A ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros” e no Título II: “É permitido a todos usar de quaisquer águas públicas conformando-se com os regulamentos administrativos”.

Segundo Braga et al. (2006), apesar de “ser o Código de Águas um importante marco jurídico para o país, inclusive tendo permitido a notável expansão do sistema hidrelétrico brasileiro, nunca se realizou sua efetiva implantação. As ações que o seguiram tiveram objetivos exclusivamente setoriais e nunca foram regulamentados [...]”. Os autores exemplificam com os artigos do Código referentes ao uso múltiplo e à conservação da qualidade da água.

Em 08 de agosto de 1945, é decretado o Código das Águas Minerais - Lei Federal 7.841, estabelecendo normas para o aproveitamento das águas minerais. A próxima menção histórica é 28 de Fevereiro de 1967, o Código de Mineração (ou Código de Minas) - Lei nº 227 - que reconhece as jazidas de águas subterrâneas como substância mineral dotada de valor econômico, conceito ratificado em sua regulamentação no ano seguinte. Posteriormente, o Decreto nº 78.171, de 2 de agosto de 1976, dispõe sobre o controle e a fiscalização sanitária das águas minerais destinadas ao consumo humano e, também, dos locais e equipamentos relacionados sua industrialização e comercialização.

A Política Nacional do Meio Ambiente - Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 - surge com o objetivo de assegurar a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental à vida através de princípios como a racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar, o planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais e o controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras, dentre outros.

Em 05 de outubro de 1988 é promulgada a atual Constituição brasileira. A Lei Maior compreende as águas subterrâneas como bem de caráter público, de uso comum do povo, competindo à União e aos Estados o seu domínio, enquanto gestor de bem de uso coletivo. Segundo Pompeu (1991), “a possibilidade dada pela Constituição Federal aos Estados, para, desde que autorizados por lei complementar federal, legislar sobre questões específicas relativas às águas, somente pode ser no tocante à criação do direito, uma vez que normas administrativas para a gestão de suas águas estes sempre puderam editar”.

Em 08 de Janeiro de 1997, a Lei Federal nº 9.433 regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos e criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A Lei das Águas, como também é conhecida, tem como objetivos: “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”; “a utilização racional e integrada dos recursos hídricos” e a “prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais”.

A Lei das Águas “incorpora modernos instrumentos e princípios de gerenciamento de recursos hídricos e apresenta conceitos inovadores no que concerne à organização do setor de planejamento e gestão dos recursos hídricos, nos âmbitos nacional e estadual e em termos de participação dos diferentes atores envolvidos e interessados na questão dos recursos hídricos” (BRAGA et al., 2006). Como um dos principais instrumentos de gestão de recursos hídricos¹, para

¹Os instrumentos de gestão de recursos hídricos preconizados no Capítulo IV da Lei nº 9.433/97, além da outorga de direitos de uso dos recursos hídricos, são: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de águas em classes de usos preponderantes; a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; a compensação aos municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

as águas subterrâneas, essa lei traz o regime de outorga de direitos de uso objetivando “assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água”.

“Em vários Estados, o maior número de outorgas emitidas é exatamente para exploração de águas subterrâneas. Apesar disso, os procedimentos de análise da outorga e as informações técnicas que a subsidiam são muito limitados” (BALTAR et al., 2003). É um instrumento importante para minimizar tanto os conflitos entre os diversos usuários quanto os impactos ambientais aos corpos hídricos.

A Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, conhecida como Lei dos Crimes Ambientais, trata das sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Referente aos recursos hídricos, o artigo 54 dessa lei traz como crime a ação que “causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade”. Esta lei se torna importante, uma vez que em muitas cidades brasileiras o abastecimento de água provém de manancial subterrâneo.

Em 17 de Julho de 2000, a Lei Federal nº 9.984 institui a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do SINGREH, estabelecendo regras para a sua atuação, sua estrutura administrativa e suas fontes de recursos.

A Resolução nº 5, de 10 de Abril de 2000 - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), estabelece diretrizes para a formação e funcionamento dos Comitês de Bacias Hidrográficas, de forma a implementar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, conforme estabelecido pela Lei das Águas. O CNRH estabeleceu várias outras Resoluções referentes aos recursos hídricos subterrâneos, sendo algumas:

- Res. nº 9/00 - Institui a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas;
- Res. nº 15/01 - Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas, ou aquelas que ocorrem natural ou artificialmente no subsolo;
- Res. nº 16/01 - Estabelece critérios gerais para outorga de direito de uso de recursos hídricos, como a extração de água de aquífero subterrâneo;

- Res. nº 22/02 - Estabelece diretrizes para a inserção das águas subterrâneas no instrumento Plano de Recursos Hídricos.
- Res. nº 76/07 - Estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários.
- Res. nº 91/08 - Dispõe sobre procedimentos gerais para enquadramento dos corpos e água superficiais e subterrâneos.
- Res. nº 92/08 - Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território nacional.
- Res. nº 107/10 - Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação da Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo, Quantitativo de Águas Subterrâneas.

A Lei de Saneamento - Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, regulamentada pelo Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010 - estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Apresenta os objetivos da Política Federal de Saneamento Básico, dentre eles: “minimizar os impactos ambientais relacionados à implantação e desenvolvimento das ações, obras e serviços de saneamento básico e assegurar que sejam executadas de acordo com as normas relativas à proteção do meio ambiente, ao uso e ocupação do solo e à saúde”. Também expõe, em seu artigo 4 que “a utilização de recursos hídricos na prestação de serviços públicos de saneamento básico, inclusive para disposição ou diluição de esgotos e outros resíduos líquidos, é sujeita a outorga de direito de uso”, de acordo com as leis vigentes.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) - órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), instituído pela Lei 6.938/81 - na sua Resolução nº 396, de 03 de abril de 2008, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento², prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas. Essa Resolução considera que “a prevenção e controle da poluição estão diretamente relacionados aos usos e classes de

²O Capítulo I da Resolução CONAMA nº 396, define enquadramento sendo “o estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (Classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um aquífero, conjunto de aquíferos ou porção desses, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo”.

qualidade³ de água exigidos para um determinado corpo hídrico subterrâneo”; e “a necessidade de se promover a proteção da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que poluídas ou contaminadas, sua remediação é lenta e onerosa”.

Alguns estados como São Paulo, se anteciparam à própria lei federal, modernizando sua legislação de águas e disciplinando o uso e exploração das águas subterrâneas, como a Lei Estadual 6.134/88 que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Pompeu (2002) diz que mesmo não se tratando de norma sobre a Política e os Sistemas Estaduais de Recursos hídricos, esta lei “foi pioneira em termos de disciplina do uso das águas subterrâneas, em termos estaduais e federal”, servindo de modelo para as outras unidades da Federação. Concernente às diferenças entre as leis estaduais existentes, o autor diz ainda que “é evidente que cada Estado adaptou o modelo e a estrutura das outras leis sobre a gestão de suas águas às respectivas peculiaridades”.

No estado do Tocantins, a lei que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos (Lei Nº 1.307) foi criada em 22 de março de 2002, já incorpora os objetivos definidos na Lei das Águas. A legislação estadual prevê programas permanentes de conservação e proteção dos aquíferos, e recomenda que os Planos de Bacia Hidrográfica considerem a necessidade de estudos focados nas águas subterrâneas (TOCANTINS, 2011). O seu Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH/TO) está sendo implantando e prevê a sustentabilidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Atualmente, sabe-se que a legislação brasileira referente aos Recursos Hídricos é considerada uma das mais avançadas no mundo. Entretanto, ao analisar os aspectos legais e institucionais com relação às águas subterrâneas percebe-se que ainda se carece de leis específicas protecionistas e de gestão para esse bem que tem se tornado cada vez mais valioso, em vista da escassez das águas superficiais, seja por maior demanda ou por sua degradação. A velocidade com que as cidades e as novas tecnologias para implantação de infraestrutura urbana estão se desenvolvendo, demonstra a necessidade da frequente atualização das leis e normas referente aos seus usos e impactos causados no meio ambiente.

³O Capítulo I da Resolução CONAMA nº 396, define classe de qualidade como “o conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais e futuros”.

2.1.3 Aspectos Físicos dos Aquíferos

“As condições de ocorrência das águas subterrâneas numa região resultam ser muito variadas, à medida que dependem da interação de fatores climáticos – muito irregulares no espaço e no tempo – e de fatores geológicos, cuja variabilidade também é muito grande e depende da escala do estudo da área em apreço” (REBOUÇAS et al., 2006b).

De acordo com Pedrosa e Caetano (2002), os aquíferos podem ser classificados segundo a pressão da água em livres (freáticos ou não-confinados) - mais comuns e mais explorados pela população e que, portanto, apresentam maiores problemas de contaminação - e aquíferos artesianos (confinados). Segundo a geologia do material saturado os aquíferos classificam-se em porosos - constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam e por sua ocorrência em grandes áreas - fraturados ou fissurados e cársticos.

Segundo Rebouças et al. (2006b), as águas subterrâneas têm três origens principais: meteórica, conata ou “águas de formação” e juvenil, sendo as primeiras as mais importantes constituindo 97% dos estoques de água doce que ocorrem no estado líquido nas terras emersas – continentes e ilhas; estas participam ativamente do ciclo hidrológico. Observa-se que a quantidade e o regime de ocorrência das precipitações determinam as taxas e os processos de recarga que formam os mananciais subterrâneos.

Quanto à forma de abastecimento dos aquíferos, pode ocorrer através de uma zona de recarga direta, onde a água infiltra diretamente nos aquíferos por meio de suas áreas de afloramento e de fissuras nas rochas, ou através de uma zona de recarga indireta no qual o reabastecimento se dá a partir da filtração vertical das águas da superfície e do fluxo subterrâneo indireto. Parte da água dos aquíferos é escoada na zona de descarga. “As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada” (REBOUÇAS et al., 2006b).

2.1.4 Vulnerabilidade à Contaminação de Aquíferos em Meio Urbano

“Em hidrogeologia o conceito de vulnerabilidade começou a ser usado intuitivamente a partir da década de 1970, na França (ALBINET e MARGAT, 1970⁴), e de maneira mais ampla na década de 1980 (HAERTLE, 1983⁵; ALLER et al., 1987; FOSTER e HIRATA, 1988). Embora se referisse à suscetibilidade relativa dos aquíferos à contaminação antropogênica, o termo inicialmente era usado sem nenhum objetivo de definição formal” (FOSTER et al., 2006). Desde então têm havido numerosas definições, qualificações e metodologias para a determinação da vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação, em muitos casos, com vista à sua representação cartográfica (AUGE, 2004).

A vulnerabilidade natural de um aquífero à contaminação é definida por Foster e Hirata (1988), como a sua maior ou menor suscetibilidade em ser afetado por uma carga poluidora, conceito adotado neste trabalho. Ressalta-se que as águas subterrâneas estão bem mais protegidas do que as águas superficiais, uma vez que a camada de solo sobrejacente atua como um filtro natural.

O risco de se utilizar determinada área da bacia hidrográfica para atividades potencialmente poluentes está relacionado à facilidade de um poluente atingir a água subterrânea que, de acordo com Zimbire (2000), dependerá dos seguintes fatores:

- a) *Tipo de aquífero*: Aquíferos livres ou freáticos são mais vulneráveis do que os confinados ou semiconfinados, figura 1. Aquíferos porosos são mais resistentes do que os fissurais, e estes do que os cársticos, figura 2.
- b) *Profundidade do nível estático - (espessura da zona de aeração, também denominada zona vadosa ou zona não saturada)*: Como esta zona atua como um reator físico-químico, sua espessura tem papel importante. Espessuras maiores permitirão maior tempo de filtragem, além de aumentar o tempo de exposição do poluente aos agentes oxidantes e adsorventes presentes na zona de aeração.

⁴Albinet, M. e J. Margat. 1970. “Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d’eau souterraine.” Bulletin BRGM 2nd Series 3(4): 13–22. Orleans, França.

⁵Haertle, A. 1983. “Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps.” International Association of Hydrological Sciences 142:1073–1085.

Figura 1. Tipos de aquífero quanto à pressão
(Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al., 2004, adaptado)

Figura 2. Tipos de aquífero quanto à geologia do material saturado
(Fonte: INETI, 2003, adaptado)

- c) *Teor de matéria orgânica existente sobre o solo*: Grande capacidade de adsorver uma gama variada de metais pesados e moléculas orgânicas.
- d) *Permeabilidade da zona de aeração e do aquífero*: Uma zona de aeração impermeável ou pouco permeável é uma barreira à penetração de poluentes no aquífero. Aquíferos extensos podem estar parcialmente recobertos por camadas impermeáveis em algumas áreas enquanto em outras acontece o inverso. Estas áreas de maior permeabilidade atuam como zona de recarga e têm uma importância fundamental em seu gerenciamento. Por outro lado, alta permeabilidade (transmissividade⁶) permite uma rápida difusão da poluição.

⁶“Valor pelo qual a água é transmitida, por unidade de largura da formação aquífera, sob gradiente hidráulico unitário. Expressa pelo produto de *condutividade hidráulica* pela *espessura da parte saturada do aquífero*” (ANA, 2001, grifo nosso).

- e) *Tipo dos óxidos e minerais de argila existentes no solo*: Sabe-se que estes compostos, por suas cargas químicas superficiais, têm grande capacidade de reter diversos elementos e compostos. Um poluente após atingir o solo, poderá passar por uma série de reações químicas, bioquímicas, fotoquímicas e inter-relações físicas com os constituintes do solo antes de atingir a água subterrânea. Estas reações poderão neutralizar, modificar ou retardar a ação poluente. Em muitas situações a biotransformação e a decomposição ambiental dos compostos fitossanitários pode conduzir à formação de produtos com uma ação tóxica aguda mais intensa.

As águas doces vêm sendo poluídas de tal maneira que impossibilita o seu consumo, tornando-as um recurso escasso para seus principais usos. Conforme Porto et al. (1991), a contaminação de aquíferos é um fenômeno muito mais preocupante do que o das águas superficiais, visto que estas rapidamente se renovam e se recuperam depois que o lançamento de efluentes é interrompido. No caso dos lençóis subterrâneos, a recuperação pode ser tão demorada que muitas vezes o aquífero é considerado perdido.

De acordo com Foster et al. (2006), “a classificação das atividades potencialmente poluentes segundo sua distribuição espacial fornece uma impressão direta e visual do tipo de ameaça de contaminação subterrânea que apresentam e das medidas de controle que provavelmente serão necessárias”. Assim, as fontes de poluição podem ser classificadas em:

- a) *Pontuais*: quando é possível identificar o local no qual a contaminação está penetrando no aquífero (TUCCI; CABRAL, 2003). Uma vez que atingem o aquífero através de um ponto concentradamente. Geralmente produzem plumas claramente definidas e mais concentradas, o que facilita sua identificação e possível controle (FOSTER et al., 2006). Exemplos: sumidouros de esgotos domésticos e fossas sépticas, aterros sanitários ou lixões e vazamentos em postos de combustíveis. Além do esgoto ligado clandestinamente, a rede de drenagem transporta águas de lavagem das bacias, isto é, águas das primeiras chuvas que conduzem quantidades significantes de resíduos sólidos e substâncias potencialmente poluentes, tanto para os corpos hídricos receptores

quanto para os aquíferos, no caso de vazamento na rede e infiltração no solo.

- b) *Lineares*: são provocadas pela infiltração de águas superficiais de rios e canais contaminados. A possibilidade de ocorrência dependerá do sentido de fluxo hidráulico existente entre o curso d'água e o aquífero subjacente (ZIMBRE, 2000). Exemplos: rios com elevado nível de contaminação por esgoto doméstico.
- c) *Difusas*: ocorrem quando a contaminação é distribuída por uma superfície extensa, onde não é possível identificar individualmente cada carga (TUCCI; CABRAL, 2003). Essas fontes não geram plumas de contaminação claramente definidas, mas normalmente afetam uma área (e, portanto, um volume) muito maior do aquífero (FOSTER et al., 2006). Entende-se, assim, que a poluição proveniente das fontes difusas se caracteriza por ser de baixa concentração e atingir grandes áreas, entretanto é extremamente crítica em termos de potencial de contaminação e de remediação mais complexa do que a pontual. Exemplos: a contaminação por pesticidas na agricultura, os vazamentos que ocorrem nas redes de esgoto e pluvial de uma cidade.

Diante da complexidade que envolve os recursos hídricos subterrâneos, presencia-se a crescente conscientização dos usuários e dos responsáveis pela gestão das águas subterrâneas. Resultado disso é o desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquíferos como uma ferramenta de gestão. “A cartografia de vulnerabilidade tem servido à racionalização de ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas e a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo à qualidade das águas subterrâneas” (HIRATA, 2001).

Conforme Hirata (2004), pelas características de uma ou de outra técnica de zoneamento de aquíferos, o mapa da vulnerabilidade é mais aplicável a estudos regionais e semi-regionais (escalas 1:250.000 e 1:100.000). Desta forma, a cartografia de vulnerabilidade, associada à determinação da carga contaminante potencial, seria mais aplicada primariamente ao planejamento territorial, quando do zoneamento das áreas, políticas de desenvolvimento e conscientização pública.

Na tabela 1 são apresentados os principais métodos para a determinação da vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquíferos.

Tabela 1. Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquíferos

MÉTODO	AVALIAÇÃO DE	FATORES ANALISADOS	REFERÊNCIA
Surface Impoundment Assessment	Sistemas de disposição de águas servidas. Avaliação de perigo.	Zona não-saturada; importância do recurso; qualidade de águas subterrâneas; periculosidade do material.	Le Grand (1964)
Poluição dos Lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade geral.	Geologia (litologia e estrutura).	Taltasse (1972)
Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, novos e em operação. Avaliação de perigo.	Solo; característica hidráulica; sorção e tamponamento químico; hidrodinâmica do aquífero; ar; população próxima.	Hagerty et al. (1973)
Waste-Soil Interaction matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	Efeitos na saúde; característica do produto químico; comportamento do produto; capacidade de atenuação do solo; hidrogeologia característica do local.	Philips et al. (1977)
Site Ranking Methodology	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	Receptor-população/uso da água/uso local/ degradação ambiental; caminhos, nível e tipo de contaminação; profundidade do nível d'água; pluviometria; permeabilidade do solo; característica do resíduo - toxicidade, persistência; prática de manejo - aspectos operacionais e construtivos.	Kulfs et al. (1980)
Brine Disposal Methodology	Águas de formação em campos de petróleo e gás. Avaliação de perigo.	Método de disposição; volume; geologia densidade de poços de petróleo; proximidade de postos de água.	Western Michigan University (1981)
Pesticide Index	Pesticidas, uso normal. Avaliação do perigo.	Característica físico-química de pesticida; clima de perfil do solo; cultura.	Rao et. al. (1985)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral.	D - profundidade de água subterrânea R- recarga A - meio aquífero S - solo T - topografia I - impacto no aquífero C - condutividade hidráulica	Aller et al. (1985)
GOD	Vulnerabilidade geral.	G - tipo de aquífero O - litologia zona não-saturada D - profundidade da água	Foster, Hirata (1988)
Groundwater Vulnerability Map for Nitrate	Potencial de lixiviação de nitrato. Vulnerabilidade a contaminante específico.	Tipo de solo; característica hidráulica e litológica do aquífero.	Carter et al. (1987)
SINTACS	Vulnerabilidade geral.	Igual ao DRASTIC, com pesos diferentes.	Civita et al. (1990)
(sem nome)	Vulnerabilidade geral.	Característica litológica e de permeabilidade; profundidade da água.	Adams & Foster (1992)

Fonte: Adaptado de HIRATA; REBOUÇAS, 1999

Entre os métodos apresentados na tabela 1, os mais usados no Brasil e na América Latina são o método GOD (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988) e o método DRASTIC (ALLER et al., 1987). “Nestes métodos, a cada parâmetro é atribuído um valor e o resultado do conjunto representa o índice de vulnerabilidade” (TUCCI; CABRAL, 2003). O método GOD foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças à sua simplicidade conceitual e de aplicação, tornou-se um método bastante difundido (FOSTER et al., 2006). Os demais métodos são menos difundidos, porém não menos importantes, representando uma busca crescente por métodos mais adequados a cada tipo de área e peculiaridades específicas da região estudada.

Para Auge (2004), a escolha do método para avaliar a vulnerabilidade da água subterrânea em uma região depende de vários fatores, como:

- a) *O conhecimento e a difusão da metodologia* - existem regiões, países ou continentes em que alguns métodos são mais difundidos que outros, por exemplo, o método DRASTIC é o mais utilizado na América do Norte, o método GOD é muito difundido nos países latino-americanos, na Espanha e Inglaterra, já na maioria dos países europeus o método SINTACS (que é uma derivação do DRASTIC) é o mais empregado.
- b) *Informações disponíveis* - as informações existentes na fase preliminar e as informações necessárias para o desenvolvimento (na tabela 1 - “fatores analisados”), a princípio, determinam o método a ser escolhido. Por exemplo, o método DRASTIC utiliza-se de sete parâmetros, enquanto o método GOD é baseado em três. Logicamente, quando se reduz o número de parâmetros considerados se simplifica a avaliação, contudo se perde em definição.
- c) *Abrangência da avaliação* - O grau de detalhamento da avaliação depende do objetivo pretendido, por exemplo, em estudos semi-regionais e regionais que normalmente tem finalidade de planejamento para conservação e uso adequado dos recursos naturais, são mais práticos os métodos que requerem menos parâmetros como o GOD, enquanto que em estudos mais detalhados, é alcançada uma melhor definição da vulnerabilidade com DRASTIC e SINTACS.

- d) *Validação dos resultados* - a representatividade dos estudos de vulnerabilidade pode ser verificada nas áreas onde há contaminação das águas subterrâneas. Nestes casos, à vulnerabilidade intrínseca deve ser adicionada a carga e o tipo de poluente para obter um mapa de risco. Portanto, para validar a representatividade das cartas de vulnerabilidade, diferentes metodologias podem ser aplicadas a fim de se verificar a mais adequada. A maior representatividade de um ou outro método em áreas afetadas torna-se difícil, devido, entre outras coisas, à lentidão com que se dão os processos de contaminação nos sistemas hidrológicos subterrâneos.

2.1.5 Origem dos Poluentes

De acordo com a “Declaração Universal dos Direitos da Água”, documento publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 22 de março de 1992, a água é a seiva do nosso planeta e condição essencial da vida. A ONU diz ainda que os recursos naturais de transformação da água em água potável são lentos, frágeis e muito limitados. Assim, ela deve ser manipulada com racionalidade, precaução e parcimônia. A água não deve ser desperdiçada, nem poluída, nem envenenada. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não se chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.

As atividades antrópicas no meio ambiente modificam suas condições naturais, podendo poluí-lo de diversas formas e níveis provocando desequilíbrios ecológicos. De tal modo, os impactos das ações humanas sobre a qualidade da água alcançam todos os usuários em menor ou maior escala, podendo ser ou não nocivos a alguns usos e espécies de seres vivos. A poluição das águas prejudica o seu uso de forma direta por meio de ingestão e higiene pessoal e, de forma indireta, quando as tornam causa da proliferação de doenças causadas por vetores que se reproduzem em meio hídrico, por exemplo.

De acordo com a literatura, os elementos poluidores da água podem ter duas origens: a natural, referente aos agentes danosos presentes na crosta terrestre que, na maioria das vezes, não provocam grandes concentrações na água, e a antrópica

que alude aos contaminantes oriundos das atividades humanas, os quais podem ser muito mais prejudiciais que a natural devido às suas altas quantidades e/ou elevado potencial contaminante.

Uma das maiores dificuldades de um programa de proteção de águas subterrâneas é estabelecer quais são as atividades humanas que demandam maiores cuidados ambientais. O grande número e a complexidade das atividades existentes em uma área, juntamente com o alto custo de investigações detalhadas e monitoramento hidrogeológico, exige órgãos de controle ambiental para realizar uma estratégia de identificação das atividades ou áreas de maior risco de contaminação para os aquíferos (HIRATA, 2002).

Segundo Foster et al. (2006), a maior parte da água subterrânea se origina a partir do excesso de chuva que se infiltra (direta ou indiretamente) na superfície do solo. Como consequência, as atividades desenvolvidas na superfície podem ameaçar a qualidade da água subterrânea. A poluição dos aquíferos ocorre nos pontos em que a carga contaminante gerada no subsolo por emissões e lixiviados produzidos pela atividade humana (derivadas de atividades urbanas, industriais, agrícolas e de mineração) é inadequadamente controlada e, em certos componentes, excede a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura (Figura 3).

O autor ressalta ainda que “a atividade humana na superfície do terreno modifica os mecanismos de recarga dos aquíferos e introduz outros, alterando a taxa, a frequência e a qualidade da recarga do aquífero [...]. Entender esses mecanismos e fazer o diagnóstico dessas alterações são fundamentais para a avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea”.

Figura 3 - Processos comuns de poluição da água subterrânea
(Fonte: FOSTER et al., 2006, adaptado)

Assim como a rede de esgoto, o sistema de drenagem de águas pluviais pode contaminar os solos e as águas subterrâneas através de perdas de volume no seu transporte e até por entupimento de trechos da rede que pressionam a água contaminada para fora do sistema de condutos (TUCCI, 2005). Isto, além das soluções de drenagem que se utilizam do processo de infiltração das águas pluviais, principalmente as águas das primeiras chuvas que conduzem quantidades significantes de resíduos sólidos e substâncias potencialmente poluentes.

2.1.6 Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas

“A proteção dos aquíferos envolve o conceito de perigo de contaminação, que pode ser definido pela interação e associação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em subsuperfície” (FOSTER; HIRATA, 1988). Além da proteção do aquífero como um todo, também é importante proteger as captações. Os perímetros de proteção das captações são bastante utilizados em todo o mundo, adotando-se a ideia de evitar os elevados custos e dificuldades associados à remediação de aquíferos (TUCCI; CABRAL, 2003).

Segundo Foster (2006), o conceito de perímetro de proteção é delimitar uma área envolvendo um poço ou bateria de poços destinados ao abastecimento humano, onde atividades potencialmente poluidoras da água subterrânea são limitadas, proibidas ou regulamentadas de forma progressiva. Sendo assim, impõe restrições ao uso do solo e todas as atividades que envolvem ou implicam risco de contaminação.

O perigo de contaminação da água subterrânea pode ser definido como a probabilidade de um aquífero sofrer impactos negativos decorrentes de determinada atividade humana, a tal nível que sua água subterrânea se torne imprópria para consumo, segundo os valores-guias estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a qualidade da água potável (FOSTER et al., 2006).

A Tabela 2 apresenta os tipos mais comuns de atividades capazes de causar contaminação significativa à água subterrânea e de compostos contaminantes encontrados com mais frequência.

Tabela 2 - Contaminantes comuns da água subterrânea e fontes de poluição

ORIGEM DA POLUIÇÃO	TIPO DE CONTAMINANTE
Atividade agrícola	Nitrato; amônio; pesticidas; organismos fecais
Saneamento in situ	Nitrato; hidrocarbonetos halogenados; microorganismos
Garagens e postos de serviço	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados; benzeno; fenóis
Disposição de resíduos sólidos	Amônio; salinidade; hidrocarbonetos halogenados; metais pesados
Indústrias metalúrgicas	Tricloroetileno; tetracloroetileno; hidrocarbonetos halogenados; fenóis; metais pesados; cianureto
Pintura e esmaltação	Alquilbenzeno; hidrocarbonetos halogenados; metais; hidrocarbonetos aromáticos; tetracloretileno
Indústrias de madeira	Pentaclorofenol; hidrocarbonetos aromáticos; hidrocarbonetos halogenado
Limpeza a seco	Tricloroetileno; tetracloroetileno
Indústria de pesticida	Hidrocarbonetos halogenados; fenóis; arsênico
Despejo de lodo do esgoto	Nitrato amônio; hidrocarbonetos halogenados; chumbo; zinco
Curtumes	Cromo; hidrocarbonetos halogenados; fenóis
Extração/exploração de gás e petróleo	Salinidade (cloreto de sódio); hidrocarbonetos aromáticos
Mineração de carvão e metalíferos	Acidez; metais pesados; ferro; sulfatos

(Fonte: FOSTER et al. 2006)

Um dos métodos de classificação das fontes potenciais de carga contaminante do subsolo e das águas subterrâneas é o sistema POSH - *Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically* (FOSTER; HIRATA, 1988) - que se baseia na probabilidade da presença de contaminantes e na existência de uma sobrecarga hidráulica capaz de gerar o transporte advectivo (não dispersivo) dos contaminantes para os sistemas aquíferos.

Segundo Foster et al. (2006), o método POSH produz três níveis qualitativos de “potencial para gerar uma carga contaminante no subsolo”: reduzido, moderado e elevado. Frequentemente se torna necessário trabalhar com suposições

simplificadoras, como associar a probabilidade da presença de substância poluente com o tipo de atividade desenvolvida e estimar a provável sobrecarga hidráulica com base no uso da água pela atividade em questão.

O método POSH tem a finalidade de prover orientações gerais para os usuários, mas é importante que, ao ser aplicado a qualquer projeto de avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea, seja adaptado às realidades e às peculiaridades locais.

Conforme pode ser visualizado na Figura 4, o perigo de contaminação de um aquífero pode ser determinado analisando-se a interação entre a carga contaminante que é, será ou poderá ser aplicada ao subsolo como resultado de atividades antrópicas e a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, o que depende das características naturais dos estratos que o separam da superfície do solo.

Figura 4 - Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Fonte: FOSTER et al., 2006)

Dentro do conceito de perigo ou risco à contaminação de aquíferos, os métodos existentes para avaliação da geração de cargas poluidoras (método POSH, por exemplo) se associam com o mapeamento de vulnerabilidade (métodos GOD e DRASTIC), uma vez que mapeadas as atividades potencialmente poluentes e comparadas com as áreas de maior ou menor vulnerabilidade para uma mesma área, figura 4.

Para Foster et al. (2006), nessa integração dos mapas, pode-se apresentar alta vulnerabilidade, mas nenhum perigo de poluição, por causa da ausência de carga contaminante expressiva, e vice-versa. Na prática, as duas condições são perfeitamente compatíveis. Ao mesmo tempo, a carga contaminante pode ser controlada ou modificada, porém a vulnerabilidade do aquífero é essencialmente determinada pelo contexto hidrogeológico natural.

Para as metodologias de mapeamento de vulnerabilidade, Foster et al. (2006) ressalva que eles servem apenas para avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea associado às descargas de substâncias que ocorrem na superfície do terreno em fase líquida dissolvida. Não devem ser empregados, a rigor, para avaliar o perigo de:

- a) contaminantes despejados abaixo do subsolo (como os casos de vazamentos de grandes tanques de armazenagem subterrâneos, de lixiviação de aterros de resíduos sólidos sob a camada de solo e com retirada da zona vadosa, de descargas efluentes em pedreiras e minerações etc.)
- b) derramamento de solventes orgânicos sintéticos imiscíveis (DNAPLs - *Dense Nonaqueous Phase Liquids*).

Os dois exemplos acima certamente resultarão em alto risco de contaminação, qualquer que seja a vulnerabilidade do aquífero. A única coisa a considerar, em tais circunstâncias, será a intensidade e a provável duração da carga. O índice e o mapa de vulnerabilidade do aquífero à contaminação mantêm sua validade técnica desde que se esclareça que esses tipos de carga contaminante não são considerados pelo método proposto e que tais práticas necessitam de controle específico, referente às condições do campo (FOSTER et al., 2006). Outro caso citado pelo autor é quando o aquífero apresenta água subterrânea de

qualidade naturalmente baixa (em geral salina) não necessitando, à princípio, de proteção.

Considerando que a cartografia de vulnerabilidade seja utilizada para estudos regionais com a finalidade de apresentar a vulnerabilidade ao longo de sua distribuição espacial, conclui-se que o método é adequado para adoção das medidas de controle e ações de proteção dos aquíferos.

2.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

2.2.1 Zoneamento Urbano Baseado na Cartografia da Vulnerabilidade

O artigo 182 do segundo capítulo da Constituição brasileira de 1988 institui a Política de Desenvolvimento Urbano, executada pelo Poder Público municipal, com o objetivo de ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem estar de seus habitantes. Estabelece o plano diretor como instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana, facultando ao Poder Público municipal exigir o adequado aproveitamento do solo urbano, mediante lei específica.

Regulamentado pelo Estatuto da Cidade - Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001 - estabelece diretrizes gerais da política urbana como a ordenação e controle do uso do solo, de forma a evitar a deterioração das áreas urbanizadas, a poluição e a degradação ambiental, dentre outros. Dos instrumentos da política urbana para o planejamento municipal, referente ao zoneamento urbano destacam-se o plano diretor, a disciplina do parcelamento, do uso e da ocupação do solo e o zoneamento ambiental.

De acordo com Hirata (2004), em vários países se têm adotado o controle do uso da terra a partir do zoneamento do solo baseado no estabelecimento de perímetro de proteção de poços ou na cartografia da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos. O primeiro tem como foco a proteção da captação ou do manancial, delimitando várias zonas ao redor do poço. O segundo, mais amplo e voltado ao aquífero, define a sua suscetibilidade em ser degradado por um evento antrópico de contaminação.

Desde que surgiram, as práticas que vêm sendo aplicadas por diversos países têm sido o uso independente de uma ou outra técnica. Mais recentemente, alguns autores (FOSTER et al. 1998, HIRATA; REBOUÇAS 1999, FOSTER et al. 2002) vêm avaliando o uso conjunto das duas técnicas, em uma tentativa de superar as deficiências de cada uma delas.

No Brasil, segundo Tucci e Bertoni (2003), observa-se que no zoneamento relativo ao uso do solo não tem sido contemplado pelos municípios os aspectos de águas urbanas como esgotamento sanitário, resíduos sólidos, drenagem e inundações. O que tem sido observado são legislações restritivas quanto à proteção de mananciais e ocupação de áreas ambientais. A legislação muito restritiva somente produz reações negativas e desobediência. Portanto, não atingem os objetivos de controle ambiental.

Observa-se, também, que as leis de uso e ocupação do solo nos municípios não fazem menção à preservação das águas superficiais e subterrâneas como premissa no macrozoneamento de áreas. No meio urbano, ações relacionadas à preservação das águas subterrâneas devem estar presentes quando da elaboração dos planos diretores, de desenvolvimento e de saneamento municipais, uma vez que muitas intervenções humanas podem comprometê-las.

Considerando a importância da disponibilidade hídrica para o desenvolvimento urbano, urge a necessidade de se ter um zoneamento urbano que a preserve através de medidas restritivas e mitigatórias. Isso principalmente nas áreas mais vulneráveis, com proteção das áreas de recarga dos aquíferos subterrâneos, controle da ocupação em locais com lençol freático alto e preservação da cobertura vegetal do solo, dentre outras ações que garantam a preservação quali-quantitativa das águas para o abastecimento da população, a sustentabilidade de suas atividades econômicas, a saúde e o bem estar social e a proteção do meio ambiente.

2.3 PLANOS DIRETORES DE DRENAGEM URBANA

2.3.1 Urbanização x Planos Diretores de Drenagem Urbana

No meio urbano, os sistemas de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto sanitário, drenagem urbana, coleta e disposição de resíduos sólidos e controle da poluição e de vetores compõem a infraestrutura de saneamento básico, prioritários em programas de saúde pública. Todos os sistemas são interdependentes e essenciais às cidades e ao seu desenvolvimento sustentável.

Neste contexto, a bacia hidrográfica deve ser entendida como unidade básica de planejamento e gestão na integração das políticas públicas para o gerenciamento urbano, para o saneamento e para o manejo ambiental, os quais são princípios incorporados a partir da Lei Federal nº 9.433, de janeiro de 1997.

A tendência tradicional de regionalizar as questões urbanas pode ser visualizada no texto de Gontijo (2003):

Instrumento básico da política urbana, o Plano Diretor deve estabelecer o conjunto de regras ou normas para organizar e gerir a ação dos agentes públicos e privados na produção do espaço e da vida urbanos. Até a década de 80, os planos diretores eram em sua maioria, elaborados sem uma visão sistêmica, predominando a tendência de regionalizar as questões urbanas. A Constituição de 1988 definiu como exigência aos municípios com população superior a 20 mil habitantes a elaboração destes Planos. Entretanto, poucos são aqueles que chegaram a ser implementados e, quando elaborados, muitos foram construídos dentro de uma metodologia conservadora e tradicional com a imposição de critérios técnicos e econômicos sobre a vida da cidade.

O mesmo acontece com os Planos Diretores de Drenagem Urbana quando não se considera a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, pois tendem a restringir as soluções para locais isolados na bacia, adotando técnicas conservadoras que muitas das vezes apenas transfere o problema para outro ponto dentro da bacia sem prever os respectivos impactos.

Segundo Tucci (2001), a origem dos impactos devidos à drenagem urbana que ocorrem na maioria das cidades brasileiras são as seguintes:

- *princípio dos projetos*: a drenagem urbana tem sido desenvolvida com base no princípio equivocado de que “A melhor drenagem é a que retira a

água excedente o mais rápido possível do seu local de origem”.

- *não consideram a bacia como sistema de controle*: todos os impactos gerados em cada projeto são transferidos de um ponto a outro dentro da bacia através de condutos e canalizações.

As novas concepções de gerenciamento de recursos hídricos devem reconsiderar as soluções tradicionais frente às atuais condições de incerteza, a partir de um novo entendimento dos múltiplos fatores que influenciam em como a água é usada e gerenciada e da capacidade adaptativa das obras e da população aos eventos. Buscando-se um planejamento integrado, diversos autores concordam que o conceito de “*controle de cheias*” deve ser mudado para o de “*conviver com as cheias*”.

De acordo com São Paulo (2012a), a ideia de planejar uma bacia urbana com vistas à questão das inundações nasce da percepção de que tanto existem problemas a serem resolvidos quanto oportunidades a serem exploradas. Existe hoje a convicção, baseada principalmente em experiências estrangeiras e algumas nacionais, de que a forma mais racional, econômica e sustentável de equacionar estas questões é por meio de uma abordagem ampla e integrada no tempo e no espaço. A realização prática desta abordagem são os Planos de Drenagem Urbana.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) tem o objetivo de criar os mecanismos de gestão da infraestrutura urbana relacionado com o escoamento das águas pluviais e dos rios na área urbana da cidade. Este planejamento visa evitar perdas econômicas, melhoria das condições de saúde e meio ambiente da cidade dentro de princípios econômicos, sociais e ambientais definidos pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (TUCCI; BERTONI, 2003). Ainda segundo os autores, devido à interferência que a ocupação do solo tem sobre a drenagem existem elementos do Plano de Drenagem que são utilizados para regulamentar os artigos do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.

Os municípios devem elaborar seus planos diretores de drenagem de acordo com suas necessidades e características peculiares, utilizando-se de princípios que tratam do controle do escoamento urbano. Entretanto, o que se tem percebido é que as soluções de drenagem têm sido reproduzidas de uma cidade para outra e, em muitas das vezes, adotadas em detrimento de outras mais eficientes para a bacia hidrográfica em questão.

As propostas de intervenção devem contemplar medidas pautadas em estudos específicos, como a integração entre meio ambiente e desenvolvimento dos planos políticos, de planejamento e de manejo, preservação dos recursos naturais, utilização de tecnologias sustentáveis e inserção social na definição dos critérios para tomada de decisão.

Um bom exemplo de Plano de Drenagem Urbana que adota esses princípios é o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de São Paulo. O manual reconhece que as ações e os processos decisórios, a respeito dos problemas causados pela presença da água no meio urbano, devem ser baseados em informações suficientes e confiáveis, pois acabam sendo influenciados pelo ambiente, região ou país onde são desenvolvidos (SÃO PAULO, 2012a).

De acordo com a minuta do Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas (PMP, 2014), o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Palmas (PDDUPA) está em fase de elaboração com prazo de implantação, plano completo, para 2017. Analisando o desenvolvimento do plano, vê-se a preocupação em equacionar os problemas de drenagem urbana sob o ponto de vista da bacia hidrográfica, através de mecanismos legais e administrativos eficientes. Neste plano, o programa de estudos e projetos de drenagem urbana prevê medidas estruturais e não estruturais com o objetivo de minimizar os danos à conservação do ciclo hidrológico. Também, reconhece a complexidade do ambiente urbano e, a partir daí, a necessidade do sistema de drenagem estar articulado com os demais sistemas.

O PDDUPA traz ainda no seu texto a percepção da deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea devido à lavagem das ruas, ao transporte do material sólido e às ligações clandestinas de esgoto cloacal e pluvial. Porém, como ainda está em desenvolvimento, não é possível avaliar a adoção de técnicas favoráveis à manutenção da qualidade das águas.

2.3.2 Soluções de Drenagem Urbana Sustentável

Nos últimos anos, um conceito de controle estrutural alternativo ao convencional tem se difundido no cenário da drenagem urbana brasileiro, as BMPs (*Best Management Practices*), que são técnicas com foco na não-transferência dos problemas para jusante pelo controle do escoamento na bacia, isto é, mais próximo de sua fonte e não no curso d'água (CRUZ et al., 2007).

Este conceito foi desenvolvido pela agência norte-americana EPA (*Environmental Protection Agency*). De acordo com a USEPA (2011), durante as últimas três décadas, a agência vem desenvolvendo e estabelecendo programas para lidar com a presença da água no meio urbano, principalmente quanto ao controle do excesso de escoamento superficial. Tendo em vista a sustentabilidade da bacia hidrográfica, utilizando-se das melhores práticas de gestão (i.e. BMPs) combinando técnicas estruturais e não-estruturais de forma a mitigar os efeitos negativos do escoamento, através de dispositivos de interceptação, detenção ou filtração das águas pluviais. De acordo com a literatura, historicamente, engenheiros e gestores do governo adotavam soluções para o controle do volume do escoamento superficial e só recentemente foram incluídas considerações quanto à qualidade da água.

Segundo Tucci (2005), as medidas de controle do escoamento podem ser classificadas, de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, em:

- *distribuída ou na fonte*: é o tipo de controle que atua sobre o lote, praças e passeios;
- *na microdrenagem*: é o controle que age sobre o hidrograma resultante;
- *na macrodrenagem*: é o controle sobre os principais riachos urbanos.

O autor ainda diz que as medidas de controle podem ser organizadas, de acordo com a sua ação sobre o hidrograma em cada uma das partes das bacias mencionadas acima, em:

- *Infiltração e percolação*: normalmente, cria espaço para que a água tenha maior infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial;
- *Armazenamento*: através de reservatórios que podem ocupar espaços

abertos ou fechados. O efeito do reservatório é o de reter parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo;

- *Aumento da eficiência do escoamento*: através de condutos e canais, drenando áreas inundadas. Esse tipo de solução tende a transferir enchentes de uma área para outra, mas pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com reservatórios de retenção;
- *Diques e estações de bombeamento*: solução tradicional de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento da inundação.

Concordando com ASCE (2004), existem muitos tipos de BMPs estruturais disponíveis, para controle do escoamento superficial e medidas de armazenamento, e novos dispositivos de tratamento vem sendo introduzidos frequentemente; no entanto, há uma compreensão limitada da sua eficácia, do seu custo benefício, das técnicas apropriadas para projetar e posicioná-lo dentro da bacia ou o seu impacto no corpo receptor após a instalação. O entendimento sobre BMPs não-estruturais é ainda mais limitado.

Recentemente novas abordagens, mais abrangentes, no tocante às águas urbanas, vêm sendo adotadas, destacando-se os conceitos “*Sustainable Urban Drainage Systems*” (SUDS), no Reino Unido, o “*Water Sensitive Urban Design*” (WSUD), na Austrália e “*Low Impact Development*” (LID), na América do Norte (URRUTIAGUER et al., 2010 apud BAPTISTA et al. 2011). Todas estas abordagens são perfeitamente compatíveis e incorporam as tecnologias compensatórias em suas soluções (BAPTISTA et al. 2011).

O LID é particularmente eficaz em áreas urbanas e está se tornando bem aceito para o controle de impactos devido à presença de água em áreas urbanizadas. Essas técnicas envolvem a integração de práticas de baixo custo de gestão a nível local, como infiltração e armazenamento, para minimizar os efeitos do desenvolvimento e tentar simular uma condição de pré-desenvolvimento. Estas técnicas, segundo Baptista et al. (2011), visam o rearranjo temporal das vazões e, eventualmente, a redução do volume escoado, diminuindo a probabilidade de inundações e possibilitando ganhos na qualidade das águas pluviais.

No grupo de pesquisa em que este trabalho foi desenvolvido, encontram-se as dissertações intituladas: *Urbanização e Cheias: Medidas de Controle na Fonte*, de Tominaga (2013), e *Medidas de Controle “in Situ” do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas: Análise de Aspectos Técnicos e Legais*, de Canholi (2013). O primeiro trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de modelagem matemática, o efeito que a implantação de medidas controle na fonte pode proporcionar no abatimento dos picos de cheia em áreas urbanas densamente ocupadas.

De acordo com Tominaga (2013), foram selecionadas medidas de controle na fonte que se adequam a locais com baixa disponibilidade de espaço, como pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva. Os cenários analisados consideraram a situação atual sem implantação de medidas de controle e a implantação individual e combinada das medidas de controle na fonte. Uma análise geral dos resultados da modelagem permitiu apontar que o amortecimento dos picos de cheia foi verificado em todos os cenários, em maior ou menor intensidade, e o melhor desempenho no abatimento do pico de cheia foi verificado nos cenários que consideraram a implantação de pavimentos permeáveis.

Os resultados da modelagem e os baixos custos de implantação dos pavimentos permeáveis sugerem que esta medida, dentre as três analisadas, é a que apresenta melhor custo-benefício. Contudo sabe-se que a implantação de pavimento asfáltico permeável em 100% da área disponível pode não ser viável. Logo a implantação conjunta com outras medidas de controle pode melhorar o desempenho de um sistema de controle de cheias (TOMINAGA, 2013).

Já o trabalho desenvolvido por Canholi (2013), avaliou quatro diferentes cenários de ocupação para um grande empreendimento da RMSP (Região Metropolitana de São Paulo), com análise do desempenho tanto na fonte quanto na bacia do empreendimento e na bacia de ordem superior. Entre os cenários incluíram-se situações com a instalação de microrreservatórios e jardins de chuva. Os resultados mostraram que, utilizando a “lei das piscininhas” aplicável ao município e ao estado de São Paulo (Lei municipal 41.814/02 e Lei estadual 12.526/07), foi possível abater o pico de cheia em 20% nas áreas diretamente controladas, e entre 11% e 9% no empreendimento e sua bacia. Sendo observada uma piora em 0,4% no pico na bacia de ordem superior.

Alterando a localização dos microrreservatórios foi possível dobrar sua eficácia. Os resultados para os “jardins de chuva” foram piores para os eventos pouco frequentes, porém, estes dispositivos conseguem diminuir em 64% o número de eventos com geração de escoamento superficial para as áreas controladas, eventos ligados

fortemente à qualidade das águas. Concluiu-se que a lei vigente hoje na RMSP atende apenas parcialmente seu objetivo de controle de cheias. Considerando que essa lei apresenta boa oportunidade para aumentar a eficácia do sistema de drenagem, seu conteúdo deve ser revisto, à luz dos resultados obtidos nesta pesquisa. Além disso, é uma lei que permite controlar a poluição difusa, fator de degradação dos rios urbanos (CANHOLI, 2013).

Para atender aos objetivos deste trabalho, neste capítulo se dará enfoque às medidas estruturais de infiltração e percolação, visto que são essas estruturas que levam as águas superficiais para o subsolo podendo atingir os aquíferos e, por conseguinte, contaminá-los. Existem diversos tipos de estruturas de infiltração, definidos a seguir, que de acordo com a sua disposição local podem fazer parte das técnicas para controle na fonte - como os poços, as valas e as valetas - ou das técnicas lineares - como as valas e trincheiras construídas junto aos sistemas viários, além dos chamados pavimentos porosos dotados de mecanismos de infiltração.

2.3.2.1 Planos ou superfícies de infiltração

Os planos ou superfícies de infiltração são um dos tipos de técnicas compensatórias constituídas por depressões escavadas no solo, com o objetivo de recolher, armazenar e favorecer a infiltração das águas pluviais que podem ir para o subsolo ou serem conduzidas para local apropriado quando possuir camada impermeável. Caracterizam-se por sua estrutura com dimensões longitudinais e transversais semelhantes e de pequena profundidade, com cobertura em gramado. Podem ser associadas a outros tipos de estruturas como valos para condução das águas (figura 5).

Figura 5 – Plano de infiltração
(Fonte: Adaptado de TUCCI, 2005)

Durante chuvas intensas, essas áreas podem ficar submersas, se a sua capacidade for muito inferior à intensidade da precipitação. Caso a drenagem transporte muito material de granulometria pequena, a capacidade de infiltração pode ser reduzida, necessitando de limpeza do plano para manter seu bom funcionamento (TUCCI, 2005).

2.3.2.2 Valas e valetas de infiltração

Valas ou valos de infiltração são dispositivos de drenagem que possuem dimensões longitudinais significativamente maiores que as transversais, quando a seção transversal é muito pequena denominam-se valetas de infiltração. Frequentemente utilizados paralelos às vias de tráfego, estacionamentos e conjuntos habitacionais, dentre outros (Figura 6).

Figura 6 – Valos de infiltração
(Fonte: URBONAS; STHARE, 1993 apud Tominaga, 2013)

As valas concentram o fluxo das áreas adjacentes e criam condições para uma infiltração ao longo do seu comprimento. Esse dispositivo funciona, também, como um reservatório de detenção, à medida que a drenagem que escoar para o valo é superior à capacidade de infiltração. Reduzindo, também, a quantidade de poluição transportada à jusante (TUCCI, 2005).

Baptista et al. (2005) lembra que “as valas e valetas requerem manutenção preventiva permanente, sob pena de se transformarem em depressões invadidas por

vegetação ou esgoto a céu aberto, fontes de maus odores e de proliferação de insetos”.

2.3.2.3 *Bacias de percolação e trincheiras de infiltração*

Constituem dispositivos de percolação com a função de aumentar a recarga e reduzir o escoamento superficial. De acordo com Tucci (2005), o armazenamento é realizado na camada superior do solo e depende da porosidade e da percolação. Portanto, o lençol freático deve ser baixo, criando espaço para armazenamento. Para áreas de lençol freático alto, esse tipo de dispositivo não é recomendado.

A estrutura das bacias de percolação se caracteriza pela remoção do solo original, substituindo-o por cascalho ou seixo. Desta forma, criando ambiente para o armazenamento podendo ou não ter dispositivo de drenagem e condução da água, quando a mesma não puder ser infiltrada (figura 7).

Figura 7 – Exemplo de bacia de percolação
(Fonte: URBONAS e STHARE, 1993 apud TUCCI e GENS, 1995)

Trincheira ou vala permeável é um caso especial de bacia de percolação e consiste de uma caixa com cascalho e filtro por onde passa um conduto poroso ou perfurado (TUCCI, 2005). Sua estrutura consiste de um tubo perfurado de forma contínua em uma inclinação mínima em uma trincheira de pedra (figura 8).

Figura 8 – Instalação de Trincheira de infiltração
(Fonte: PENNSYLVANIA STORMWATER BEST MANAGEMENT (b) - 2005)

De acordo com o manual Pennsylvania Stormwater Best Management (2005b), as bacias de infiltração podem ser incorporadas a novos empreendimentos. Idealmente, a vegetação existente pode ser preservada e utilizada como área de infiltração do escoamento superficial. O escoamento das construções adjacentes e superfícies impermeáveis podem ser direcionados para essa área, que “alimentarão” a vegetação, aumentando a evapotranspiração, além de permitir a infiltração.

2.3.2.4 Pavimentos Permeáveis

Em áreas urbanas, as áreas destinadas ao sistema viário e às áreas de estacionamento podem ocupar espaços significativos e quando impermeáveis aumentam o volume do escoamento superficial gerando os problemas de drenagem conhecidos. De acordo com Baptista et al. (2011), visando o controle da produção do escoamento superficial no próprio sistema viário existem os pavimentos permeáveis e os pavimentos porosos (figura 9).

Figura 9 – Esquema do funcionamento de revestimentos permeáveis
(Fonte: Adaptado de Azzout et al., 1994 apud Tominaga, 2013)

Segundo Tucci (2005), esse tipo de pavimento pode ser de bloco vazado, concreto ou de asfalto. As vantagens desse tipo de alternativa podem ser as seguintes: redução do escoamento superficial previsto com relação à superfície impermeável; redução dos condutos da drenagem pluvial; redução de custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina de água de estacionamentos e passeios. As desvantagens são: a manutenção do sistema para evitar que fique colmatado com o tempo; maior custo direto de construção (sem considerar o benefício de redução dos condutos); contaminação dos aquíferos.

A simples adoção de pavimentos com superfície permeável ou semi-permeável, por si só, não representa um ganho significativo para os sistemas de drenagem. Sua combinação com uma estrutura de pavimento porosa, permitindo a

reservação temporária das águas pluviais, com possibilidades de infiltração, pode melhorar significativamente o controle da produção de escoamento em zona urbana (BAPTISTA et al., 2011).

Algumas pesquisas com essas alternativas de drenagem estão sendo desenvolvidas no âmbito acadêmico e até sendo implantadas, para avaliação, citadamente a pesquisa do Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade de São Paulo (CTH-USP) com a prefeitura municipal paulista sobre pavimento poroso, de asfalto ou concreto, com o objetivo de absorver parte da água do escoamento superficial com ou sem infiltração no solo.

A pesquisa objetivou uma Especificação Técnica (ETS-03/2011) com critérios de dimensionamento e execução de pavimentos permeáveis com revestimento em Concreto Asfáltico Poroso – CPA (Camada Porosa de Atrito) para vias públicas submetidas a Tráfego Leve sob a jurisdição da Prefeitura do Município de São Paulo. Sendo a primeira norma técnica de pavimentos permeáveis do país.

Segundo a norma ETS-03/2011, para utilização nas vias públicas submetidas ao tráfego de veículos da Cidade de São Paulo, a especificação técnica deverá contemplar dispositivo de restrição de infiltração da água no subleito, como membranas impermeáveis ou outra solução comprovadamente eficaz.

Figura 10 - Experimentos do Laboratório de Hidráulica da EP-USP
(Fonte: Virgiliis, 2009 apud Tominaga, 2013)

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 MAPA DE VULNERABILIDADE

De acordo com Foster et al. (2006), o índice de vulnerabilidade GOD (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988) caracteriza a vulnerabilidade do aquífero à contaminação considerando os seguintes parâmetros (*input*):

- G (*Groundwater occurrence - tipo de aquífero*) - o confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero em questão;
- O (*Overall aquifer class - litologia da cobertura*) - os estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante;
- D (*Depth - profundidade da água ou do aquífero*) - a profundidade até o lençol freático ou até o teto do aquífero confinado.

Assim, a metodologia empírica proposta para estimar-se a vulnerabilidade do aquífero à contaminação envolve estágios distintos:

- primeiro, identificação do grau de confinamento da água subterrânea, com a posterior indexação desse parâmetro na escala de 0 a 1 - índice G;
- segundo, especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero quanto ao grau de consolidação (possível presença ou ausência de permeabilidade por fissuras) e caracterização litológica (porosidade indiretamente dinâmico-efetiva¹, permeabilidade² e teor de umidade da zona vadosa ou retenção específica³). A ocorrência de estratos de

¹Parâmetro que mede a percentagem do volume de um solo ou formação aquífera disponível para armazenamento temporário de água (INETI, 2003).

²Corresponde à propriedade de um meio, permitir a passagem de água ou outro fluido, em maior ou menor vazão por unidade de área. Esta propriedade depende das características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas) e das propriedades do fluido (viscosidade e peso específico) (INETI, 2003).

³Percentagem de água existente no solo, expressa em relação ao peso do solo seco ou ao volume. Parâmetro que mede a capacidade de um solo para reter a água (INETI, 2003).

cobertura é pontuada numa escala de 0,4 a 1,0 - índice O; e

- terceiro, estimativa da profundidade até o lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6 a 1,0 - índice D.

O índice final de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros, isto é, os índices G, O e D são multiplicados entre si, resultando em um diagrama de saída (*output*) com vulnerabilidade que varia de 0 (insignificante) a 1 (extrema). Na figura 11 é representado um diagrama do método GOD para qualificar a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação.

Figura 11 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação

(Fonte: FOSTER, 2006)

Para áreas urbanas, observa-se que o solo com frequência é modificado durante o processo de construção das edificações e demais infraestruturas e em escavações (como poços, valas ou lagos), a carga poluente no subsolo é aplicada abaixo de sua base, razão na qual, de acordo com o método, se deve admitir que a zona do solo é ausente e utilizar a vulnerabilidade hidrogeológica não corrigida.

A criação do mapa de índices de vulnerabilidade GOD segue os procedimentos exemplificados na figura 12. Isso pode ser feito manualmente ou através tecnologia do SIG (Sistema de Informações Geográficas).

Figura 12 - Produção de Mapa de Vulnerabilidade usando o Sistema GOD
(Fonte: FOSTER, 2006)

Neste trabalho foi utilizado o mapa de vulnerabilidade, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 2001), elaborado através do Método GOD.

3.2 MAPAS DE FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO

No sistema POSH (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER et al., 2002) é conveniente classificar as fontes potenciais de carga contaminante de subsolo e das águas subterrâneas com base em duas características:

- a probabilidade da presença de contaminantes, que, segundo se sabe ou se espera, são persistentes e móveis no subsolo, podendo ser necessárias suposições para associar a probabilidade da presença de substância poluente com o tipo de atividade humana (Tabelas 3 e 4)
- a existência de uma carga hidráulica associada (sobrecarga) capaz de gerar o transporte dos contaminantes para os sistemas aquíferos, podendo-se estimar a provável sobrecarga hidráulica com base no uso da água pela atividade em questão.

Tabela 3 - Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH

POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE DE SUBSOLO	FONTE DE CONTAMINAÇÃO	
	saneamento <i>in situ</i>	práticas agrícolas
Elevado	cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha	culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados
Moderado	intermediário entre elevado e reduzido	
Reduzido	cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha	rotação das culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semi-áridas

(Fonte: FOSTER et al., 2006)

No método POSH, as fontes potenciais de contaminação são classificadas em três níveis qualitativos: reduzido, moderado e elevado, conforme tabela 3. Em áreas urbanas, é comum encontrar pequenas indústrias de manufatura e de serviços (como oficinas de automóveis, postos de gasolina etc.) que manuseiam produtos químicos tóxicos (como solventes clorados, hidrocarbonetos aromáticos etc.).

Nesse caso, é importante mapear as áreas em que essas atividades podem estar despejando os efluentes não tratados diretamente no solo, em vez de recorrer aos meios de disposição ou reciclagem corretos (FOSTER et al., 2006), configurando fontes pontuais de contaminação, tabela 4. Mapeiam-se também as regiões, principalmente com alto índice de urbanização e impermeabilização do solo, nas quais o escoamento superficial tem maior potencial poluente quando infiltrado no solo.

Tabela 4 - Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH

POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	deposição de resíduos sólidos	áreas Industriais*	lagoas de águas residuais	outras (urbanas)	mineração e exploração de petróleo
Elevado	resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos	todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial) se a área >5 ha		operações em campos de petróleo, mineração de metais
Moderado	chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	indústria tipo 2	esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo	postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1	indústria tipo 1	águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agro-industriais e de mineração de não metálicos	cemitérios	
<p>* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria</p> <p>Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos</p> <p>Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão</p> <p>Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal</p>					

(Fonte: FOSTER et al., 2006)

Neste trabalho foram analisadas as fontes potenciais de contaminação a partir do zoneamento urbano existente, o que pode ser visualizado no estudo de caso apresentado no próximo capítulo.

3.3 ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DOS MAPAS ATRAVÉS DE SIG

Através das metodologias GOD e POSH, respectivamente, a vulnerabilidade classifica-se de insignificante à extrema, e as fontes pontuais e difusas de contaminação são qualificadas em reduzida a elevada. O risco de contaminação decorrente destas fontes de poluição fica condicionado às classes de vulnerabilidade, sendo maior quanto mais alta a vulnerabilidade do aquífero e mais elevada a carga de contaminante, conforme esquema conceitual da figura 13.

Figura 13 - Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Fonte: FOSTER et al., 2006)

A análise integrada do mapa de vulnerabilidade existente com o Mapa de Fontes Potenciais de Contaminação, desenvolvido a partir do zoneamento urbano vigente, subsidiou a elaboração do Mapa de Zoneamento Baseados no Risco à Contaminação de Águas Subterrâneas. Este, por sua vez, subsidiou a elaboração de um o Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo.

A restrição para utilização de dispositivos de infiltração é feita nos casos de fontes potencialmente poluentes em áreas de maior vulnerabilidade. Para isso, foi analisada a empregabilidade de dispositivos de infiltração *in loco* ou estruturas de infiltração com base impermeável para condução das águas superficiais para local apropriado. A sequência para a elaboração e análise dos mapas está esquematizada na figura 14.

Figura 14 - Metodologia de Análise Integrada dos Mapas

Para a elaboração, adaptação, análise e integração dos mapas apresentados neste trabalho foram utilizados os softwares: ArcVIEW® 9.3.1 e SPRING 5.1, de informação geográfica (SIG). Para as adaptações nos desenhos dos mapas, também foi utilizado o programa AutoCAD® Civil 3D 2012, da Autodesk. A integração dos mapas foi feito através da simples sobreposição de imagens para mapas de mesma escala, e por comparação para diferentes escalas.

3.4 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DAS MEDIDAS DE CONTROLE NA FONTE

De acordo com São Paulo (2012c), a escolha dos tipos de técnicas de medidas de controle na fonte a serem adotadas em uma bacia ou sub-bacia é dependente de fatores urbanísticos, sociais, econômicos e ambientais. Estas podem ser utilizadas em diversas situações, no entanto, devem levar em consideração algumas características da bacia estudada para que suas potencialidades sejam efetivas.

Dentre os fatores que condicionam as medidas de controle na fonte podem ser citados (SÃO PAULO, 2012c):

- Área de drenagem - Normalmente utilizada como parâmetro para o cálculo hidrológico e hidráulico das obras;
- Capacidade de infiltração do solo - Característica utilizada para o dimensionamento de dispositivos de infiltração, podendo viabilizar ou inviabilizar a sua aplicação. Por exemplo, em solos argilosos, a capacidade de infiltração é reduzida quando em comparação com solos arenosos;
- Nível do lençol freático - O nível elevado do lençol freático pode reduzir a capacidade de infiltração no solo, acarretando as mesmas restrições citadas para a capacidade de infiltração;
- Declividade do terreno - A declividade determina a condição de escolha das estruturas, podendo inviabilizar estruturas de infiltração, pois terrenos de elevada declividade produzem escoamento com alta velocidade;
- Disponibilidade de área - Conforme a disponibilidade de área pode-se optar, segundo o tamanho e a disposição, pelos dispositivos mais adequados;
- Instalações subterrâneas - A presença de instalações subterrâneas pode inviabilizar certos tipos de dispositivos;
- Poluição por esgoto - A poluição proveniente do sistema de esgotamento sanitário, por via de descargas irregulares acaba despejando poluentes no sistema de águas pluviais.

- Sedimentos - Assim como ocorre com a afluência de poluentes, alguns dispositivos não operam bem com um aporte de sedimentos, como é o caso das bacias de retenção e detenção.
- Sistema viário adjacente e intensidade de tráfego - O sistema viário adiciona restrições na instalação de canais e galerias. A instalação de dispositivos de infiltração também é restringida pela dimensão das vias.
- Poluição difusa - A poluição difusa é gerada pelo escoamento superficial, em áreas urbanas e rurais, proveniente da deposição de poluentes, de maneira esparsa, sobre a área contribuinte da bacia hidrográfica. Elas aderem aos corpos d'água ao longo de sua extensão.

De acordo com Baptista et al. (2011), o processo de escolha das técnicas de drenagem com medidas de controle está ligado a dois aspectos distintos, o primeiro corresponde à fase de estudo denominada *eliminação*, onde são identificadas as soluções viáveis, o segundo refere-se à fase de *decisão*, que é a escolha entre as diversas soluções admissíveis, baseadas em um conjunto de critérios de comparação.

Neste trabalho, foram avaliadas as técnicas referentes às soluções de drenagem com infiltração no solo apresentadas: planos ou superfícies de Infiltração, valas e valetas de infiltração; bacias de percolação e trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis.

Essas tecnologias podem assumir múltiplas formas, permitindo sua utilização em diferentes escalas, desde pequenas parcelas até o projeto de sistemas de drenagem para grandes áreas. Elas podem ainda integrar-se ao meio ambiente e ao tecido urbano, comportando usos associados, por exemplo, áreas para lazer, parques, etc. Também, podem ser aplicados diferentes tipos de soluções em uma mesma localidade, possibilitando a potencialização dos efeitos positivos delas decorrentes (BAPTISTA et al., 2011).

Para indicação das soluções de drenagem, serão utilizadas as tabelas apresentadas no Plano Municipal de Gestão do Sistema de Águas Pluviais de São Paulo (SÃO PAULO, 2012c): a tabela 5 sintetiza os fatores que orientam a análise das técnicas mais adequadas para o manejo de águas pluviais, as tabelas 6, 7 e 8, apresentam as matrizes de aplicabilidade das medidas de controle na fonte.

Tabela 5 - Fatores condicionantes para a implantação e operação das técnicas compensatórias em drenagem urbana

Medidas de controle na fonte	Áreas Contribuintes Adequadas	Capacidade de Infiltração no Solo Adequadas (mmh ⁻¹)	Freio a escoamento	Aquífero em risco	Solo frágil à água	Subsolo impermeável	Dedividade alta	Ausência de exortório	Restrição de área disponível	Presença de instalações subterrâneas	Restrição de urbanização	Afluência poluída	Afluência com alta taxa de sedimentos	Risco sanitário por falha de operação	Risco sedimentológico por falha de operação	Esforço e tráfego intensos	Flexibilidade de desvio	Limite na altura da MC
Pavimento poroso	< 10 ha	7,0 a 200,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Trincheira de infiltração	< 6 ha	7,0 a 200,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Vala de infiltração	< 6 ha	7,0 a 200,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Poço de infiltração	< 6 ha	4,0 a 200,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Faixa gramada	< 6 ha	1,0 a 200,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● = viabilidade de implantação; ● = viabilidade dependente de condição específica; ● = inviável, a princípio

Tabela 6 - Matriz de aplicabilidade em relação ao uso e ocupação do solo

Grupo	Técnica	Baixa Densidade	Residência	Ruas	Comércio	Indústria	Construção	Zonas Industriais em Reurbanização	Área Contaminada
Infiltração	Trincheira de infiltração	●	●	● ¹	● ²	●	●	●	● ⁴
	Bacia de infiltração	●	●	● ¹	● ²	●	●	●	● ⁴
	Sumidouro	●	●	● ¹	● ²	●	●	●	● ⁴
	Vala comum	●	●	● ¹	● ²	● ²	● ³	●	● ²
Canais Abertos	Vala seca	●	●	● ¹	● ²	● ²	● ³	●	● ²
	Vala úmida	●	●	● ¹	● ²	● ¹	● ³	●	● ²
	Telhado verde	●	●	●	● ²	●	●	●	●
Controle na Fonte	Cisterna	●	●	●	● ²	●	●	●	●
	Pavimento poroso	●	●	●	● ²	● ¹	●	●	● ²

● = sim; ● = não ; ¹ pode necessitar de mais um estágio de tratamento; ² pode necessitar de mais dois estágios de tratamento; ³ pode necessitar de reabilitação após a construção; ⁴ o projeto de inibir a movimentação dos contaminantes

(Fonte: Tabelas 5 e 6: SÃO PAULO, 2012c – adaptado)

Tabela 7 - Matriz de aplicabilidade em relação às características locais

Grupo	Técnica	Solo		Área de drenagem		Prof. do lençol		Declividade		Carga hidráulica		Espaço disponível	
		Impermeável	Permeável	0 a 2 ha	>2 ha	0-1 m	>1 m	0 - 5 %	>5 %	0 - 1 m	1 - 2 m	Pouco	Muito
Infiltração	Trincheira de infiltração	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Bacia de infiltração	●	●	●	● ⁵	●	●	●	●	●	●	●	●
	Sumidouro	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Canais Abertos	Vala comum	●	●	●	●	●	●	●	●	●	● ³	●	●
	Vala seca	●	●	●	●	●	●	●	●	●	● ³	●	●
	Vala úmida	● ²	● ⁴	●	●	●	●	●	●	●	● ³	●	●
Controle na Fonte	Telhado verde	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Cisterna	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Pavimento poroso	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● = sim; ● = não ;¹ com manta impermeável; ² com provável vazão base; ³ a não ser que siga curvas de nível; ⁴ com manta impermeável a vazão base; ⁵ possível, mas não recomendado; ⁶ com desvio das vazões mais altas

Tabela 8 - Matriz de aplicabilidade em relação à quantidade e qualidade

Grupo	Técnica	Qualidade					Quantidade		
		Sólidos Totais	Metais	Nutrien-tes	Bactérias	Sedimentos finos e poluentes	Redução de volu-me	Período de retorno adequado	
								1 – 2 anos	25 anos
Infiltração	Trincheira de infiltração	●	●	●	●	●	●	●	●
	Bacia de infiltração	●	●	●	●	●	●	●	●
	Sumidouro	●	●	●	●	●	●	●	●
	Vala comum	●	●	●	●	●	●	●	●
	Vala seca	●	●	●	●	●	●	●	●
Canais Abertos	Vala úmida	●	●	●	●	●	●	●	●
	Telhado verde	-	-	-	-	●	●	●	●
	Cisterna	●	●	●	●	-	●	●	●
Controle na Fonte	Pavimento poroso	●	●	●	●	●	●	●	●

● = alto; ● = médio; ● = baixo

(Fonte: Tabelas 7 e 8: SÃO PAULO, 2012c – adaptado)

4 ESTUDO DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO

A partir da revisão bibliográfica acerca dos temas principais do estudo, como contaminação das águas subterrâneas, drenagem urbana sustentável, zoneamento urbano e cidades planejadas, realizou-se a seleção e avaliação das informações obtidas de forma a atender os objetivos da pesquisa. À princípio, uma cidade planejada tem a vantagem de possuir no seu plano diretor inicial áreas com usos e ocupação do solo pré-definidos, com o zoneamento da área municipal, possibilitando um planejamento mais adequado.

Desta forma, a cidade de Palmas, capital do estado do Tocantins, foi adotada para realização do estudo de caso por ser uma cidade ainda em desenvolvimento e adensamento do plano diretor principal com diversas áreas ainda não urbanizadas às quais pode ser implantado o princípio de drenagem sustentável, considerando as premissas e soluções indicadas pelas melhores práticas de gestão (*Best Management Practices* - BMPs).

Palmas é a última cidade brasileira completamente planejada do século XX, sendo inaugurada em maio de 1989. O seu plano diretor inicial foi delineado através de quadras com uso e ocupação do solo pré-definidos, isto é, com zoneamento definido desde seu planejamento. A área urbana da cidade está inserida entre a Área de Proteção Ambiental Serra do Lajeado (A.P.A. Serra do Lajeado) e o reservatório da Usina Hidrelétrica Luiz Eduardo Magalhães (UHE Lajeado), conforme figura 15.

O sítio urbano de Palmas tem limites bastante definidos e apresenta forte identidade paisagística. O sítio é formado por uma faixa de terra com baixas declividades, estendendo-se por uma distância média de 15 km entre a margem direita do Rio Tocantins e a encosta da Serra do Lajeado. O rio, posteriormente o lago, e a serra estão alinhados no sentido norte-sul. A barreira natural formada pela serra está protegida da ocupação por uma reserva ecológica estadual, atingindo altitudes máximas que ultrapassam 600 metros em relação ao nível do mar. A altitude média da área do sítio indicado para a construção da cidade é de 260 metros. O lago formado pela Usina Hidrelétrica do Lajeado inundou uma significativa faixa de terra até a cota estimada de 212 metros (TEIXEIRA, 2009).

De acordo com a Lei Municipal nº 155/07 que dispõe sobre a Política urbana do Município de Palmas, a cidade fica dividida em áreas urbanas, de urbanização específica, de urbanização de interesse turístico e rural por meio da delimitação do

perímetro urbano. A divisão distrital do Município de Palmas, além do plano diretor principal e das regiões de Taquaralto e dos Aurenys, também chamados bairros satélites, inclui dois Distritos denominados Taquaruçu e Buritirana, figura 15. Os limites extremos do município de Palmas estão situados entre as coordenadas UTM (zona 22 e 23) 851099m e 782700m em X e 8840105m e 89322061m em Y.

Figura 15 – Localização e Perímetro Urbano do Município de Palmas
(Fonte: WIKIPÉDIA, 2011 e SIGPALMAS 2011 – adaptado)

Mesmo sendo uma cidade planejada, com quadras e viários definidos, o plano inicial de implantação de Palmas não foi seguido e atualmente a população se distribui de forma desordenada, no perímetro urbano planejado e na sua periferia, formando grandes vazios urbanos que dificultam os processos de implantação de obras de infraestrutura, tornando ações locais e desintegradas.

No Mapa de Densidade Populacional de Palmas, figura 16, observa-se que a maioria da população se concentra na periferia do município e as áreas centrais apresentam menor densidade populacional, inclusive com grandes vazios urbanos, consequência da ocupação irregular do solo urbano, causada principalmente pela falta de integração entre projeto e implantação da cidade planejada.

Figura 16 – Mapa de Densidade Populacional de Palmas
(Fonte: SIGPALMAS 2011 – adaptado)

Na figura 17 é apresentado o Mapa do Ordenamento do Solo Urbano com áreas de ocupação prioritárias e preferenciais, bem como as áreas comerciais, de serviço e de lazer e cultura. Observa-se que o presente cenário dificulta uma visão integradora das políticas públicas e soluções adotadas no planejamento urbano, principalmente as referentes aos sistemas de saneamento básico. Por outro lado, essa ampla área ainda sem ocupação permite que sejam tomadas medidas estratégicas para que o seu desenvolvimento tenha integração entre os interesses da sociedade e a preservação dos recursos hídricos e meio ambiente em geral.

Analisando-se o mapa das bacias hidrográficas do município de Palmas, figura 18, observa-se que a Bacia do Córrego da Prata situa-se totalmente dentro do perímetro urbano da cidade. Visando atender os objetivos deste trabalho, esta bacia é utilizada como estudo de caso.

A partir da análise dos dados existentes e conforme metodologia de análise dos mapas, as áreas foram analisadas quanto à vulnerabilidade e classificadas quanto ao risco de contaminação, subsidiando a elaboração do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo.

Portanto, visando identificar soluções tanto para a proteção do meio ambiente e recursos hídricos como para atender às demandas intrínsecas ao desenvolvimento sustentável da sociedade, o Zoneamento Urbano baseado no Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas e o Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo, idealmente, poderão ser integrados aos processos de planejamentos da bacia hidrográfica em que estão inseridos, estabelecendo diretrizes que garantam a preservação dos recursos hídricos, dando base para elaboração e/ou revisão dos Planos Diretores Municipais e tendo a proteção das águas subterrâneas como uma importante premissa nos processos de decisão inerentes ao planejamento urbano.

De acordo com o Mapa das Bacias Hidrográficas do Município de Palmas, Figura 18, as bacias hidrográficas presentes no plano diretor principal urbanizado são: Bacia Córrego Almescão, Bacia Ribeirão Água Fria, Bacia Ribeirão Taquaruçu Grande, Bacia Rio das Balsas, Bacia Ribeirão São Silvestre, Bacia Ribeirão São João, Bacia Ribeirão Piabanha, Bacia Ribeirão Lajeado, Bacia Ribeirão Jaú, Bacia Córrego da Prata, Bacia Córrego Barreiro e Ribeirão São João.

Figura 19 - Bacias Hidrográficas em Meio Urbano – Bacia do Córrego da Prata em Destaque
(Fonte: SIGPALMAS 2011 – adaptado)

Analisando o mapa da figura 19, vê-se que as bacias presentes no meio urbano do município de Palmas são: Bacia Ribeirão Água Fria, Bacia do Córrego Brejo Comprido, Bacia do Córrego da Prata (estudo de caso), Bacia Ribeirão Taquaruçu Grande e a Bacia do Córrego Taquari. Trata-se de bacias hidrográficas que, na sua grande maioria, tem suas nascentes desenvolvendo-se a partir de uma área de proteção ambiental (APA Serra do Lajeado); concentram grande atividade antrópica, em função da presença da cidade. São bacias que contribuem diretamente ao reservatório da UHE Luiz Eduardo Magalhães (UHE Lajeado).

4.2.1.1 Hidrogeologia

Quanto à hidrogeologia, as bacias hidrográficas do entorno de Palmas estão inseridas em dois amplos compartimentos hidrogeológicos, a Província Hidrogeológica do Parnaíba e a Província Hidrogeológica do Escudo Central. A figura 20 apresenta as províncias hidrogeológicas brasileiras.

Figura 20 - Províncias Hidrogeológicas do Brasil
(Fonte: SEPLAN, 2004)

De acordo com a CPRM (2011), a Província Escudo Central é formada por rochas pré-cambrianas (granitos, gnaiss-granito e gnaisses, migmatitos, quartizitos, xistos e arenitos) cobertas por depósitos cenozóicos (ao longo dos rios) e rochas paleozóicas. Essa Província atinge parte dos estados de Rondônia, Mato Grosso, Amazonas, Pará e Tocantins. Já a Província Parnaíba corresponde à bacia sedimentar do Parnaíba com extensão de 600.000 km².

Os principais aquíferos, Serra Grande, Cabeças e Piauí são compostos, principalmente, por arenitos do paleozóico. Com alternância de camadas mais e menos permeáveis o mesmo aquífero em função de seu posicionamento na Bacia pode apresentar-se livre, confinado e até com águas artesianas. Essa Província atinge parte dos estados do Pará, Tocantins, Maranhão e Piauí.

As áreas de recarga dos aquíferos estão localizadas nas porções mais elevadas e nas serras, como a Serra do Lajeado, e as áreas de descarga são o rio Tocantins e seus afluentes. O sistema mais explorado é o Aquífero Intergranular, definido pelas rochas sedimentares da Formação Serra Grande e a base da Formação Pimenteiras, os quais são explorados principalmente por meio de poços tubulares profundos (SEPLAN, 2004). A Bacia do Córrego da Prata está situada na Formação Pimenteiras, conforme pode ser visualizado na figura 21.

Figura 21 – Sistemas Aquíferos da Região de Palmas
(Fonte: SEPLAN 2004 – adaptado)

No Plano das Bacias Hidrográficas do Entorno de Palmas-TO (SEPLAN, 2004), a análise da qualidade das águas subterrâneas das bacias foi efetivada com base nos dados do Projeto Hidrogeologia do Tocantins (FRASCA; ARAÚJO, 2001), resultando em boa potabilidade, compatíveis com os padrões do Ministério da Saúde e da Organização Mundial de Saúde. Os dados analisados indicam ainda que as águas subterrâneas da região, de modo geral, não apresentam problemas para o consumo animal e podem ser utilizadas na irrigação da maioria das culturas.

O Plano também fez um estudo das demandas e disponibilidades de água subterrânea para os cenários atual e futuro. Na tabela 9 são apresentadas as demandas supridas por águas subterrâneas nestes cenários e para cada uma das bacias que estão inseridas no plano urbano do município de Palmas.

Tabela 9 - Demandas de Água Subterrânea por Bacia Previstas para 2003, 2010, 2015 e 2025

Bacia	Área	Demanda Água Subterrânea (mm/ano)			
	(km²)	2003	2010	2015	2025
02-Córrego Taquari	59.40	0.91	1.40	1.92	4.01
03-Ribeirão Taquaruçu Grande 1	186.42	0.07	0.06	0.06	0.06
04-Ribeirão Taquaruçu Grande 2	274.95	0.30	0.54	0.88	2.44
05-Córrego Prata	21.59	0.82	1.34	1.76	3.59
06-Córrego Brejo Comprido	62.14	16.70	24.54	30.29	49.21
07-Ribeirão Água Fria	91.35	0.09	0.12	0.17	0.42
Total	1812.61	0.72	1.05	1.33	2.34

Fonte: Adaptado de SEPLAN, 2004

4.2.1.2 Bacia do Córrego da Prata

A Bacia do Córrego da Prata possui área de 21,59 km². Está localizada ao norte do Ribeirão Taquaruçu Grande e a sua bacia de contribuição encontra-se totalmente disposta na zona urbana de Palmas (SEPLAN, 2004).

O Córrego da Prata caracteriza-se como um córrego urbano que tem seu uso intenso pela micro e macrodrenagem da região Centro-Sul de Palmas. Futuramente, com o crescimento da população e da densidade urbana de Palmas, este córrego poderá ter sérios problemas caso suas estruturas de dissipação de energia e os picos de volumes escoados que podem estar acima da sua capacidade não sejam devidamente mantidos, haja vista as condições de impermeabilização urbana (PMP, 2014).

No prognóstico elaborado para o Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas (PMP, 2014), foi feita a análise preliminar dos incrementos de vazões máximas nas bacias urbanas de Palmas. Foram estimadas as vazões atuais e futuras para cada bacia levando-se em consideração a urbanização futura. A bacia do Córrego da Prata está entre as que sofreram maiores incrementos de vazão, pois há um grande percentual de área a ser ocupada (maior taxa de impermeabilização).

4.2.1.3 Vulnerabilidade

Neste trabalho foi utilizado o mapa de vulnerabilidade, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 2001), elaborado através do Método GOD, no Projeto Hidrogeologia no Tocantins (Folha SC.22-Z-B Palmas).

Sobrepondo o Mapa de Bacias Hidrográficas no Mapa de Vulnerabilidade, figura 22, vê-se que a Bacia do Córrego da Prata possui áreas com alta vulnerabilidade na região que contorna o lago UHE Lajeado e baixa vulnerabilidade nas demais regiões. Entretanto o mapa original da CPRM (2001), foi desenvolvido na escala 1:250.000, e para analisar a vulnerabilidade há necessidade de se analisar os demais aspectos da área, como por exemplo o tipo de solo e as atividades permitidas, no atual zoneamento, na região.

Figura 22 - Mapa de Vulnerabilidade da Região de Palmas - TO
(Fonte: CPRM, 2001 – adaptado)

4.2.1.4 Solos

De acordo com o estudo de Guarda (2006) e com o Mapa de Solos do Município (Figura 23) são descritas a seguir as principais características dos solos encontrados na região:

- a) Latossolos - São solos envelhecidos, geralmente ácidos (à exceção dos eutróficos) e boa drenagem, além de serem hidromórficos e apresentarem um horizonte B latossólico em um perfil profundo;
 - Latossolo Vermelho-Amarelo - São solos que apresentam um horizonte A fraco ou moderado e um B latossólico, possuindo perfis profundos e fertilidade natural e saturação por bases baixas nos solos distróficos. São solos acentuadamente drenados, muito permeáveis, porosos e com elevado grau de intemperização;
 - Latossolo Vermelho-Escuro - são solos bem drenados e profundos, possuindo um horizonte A moderado e pouca diferença entre os perfis. São porosos, bastante permeáveis, com horizontes espessos e pouca diferenciação entre si;
- b) Solos Concrecionários - são rasos a medianamente profundos, variando de bem a moderadamente drenados. Sua característica principal é a quantidade de concreções ferruginosas o que geralmente limita o uso agrícola, pois ocupam a camada agricultável do solo ou todo o perfil acarretando a diminuição significativa do volume real de terra. Apresentam-se sob cobertura vegetal de savana em relevo que varia de suave a ondulado a forte ondulado, e com material originário vindas de rochas do Pré-Cambriano e Paleozóico;
- c) Solos Litólicos - são minerais, poucos desenvolvidos e rasos. Geralmente o horizonte A está diretamente sobre a rocha matriz ou sobre o horizonte C tendo ainda um B incipiente. Originados da decomposição de rochas do Pré-Cambriano e são encontrados sob vegetação de savana, com relevo variando de forte ondulado a montanha com escarpas. Estão associados aos solos concrecionários litólicos e afloramentos rochosos;

- d) Areias Quartzosas – agrupam-se nesta classe solos arenoquartzosos constituídos de 95% ou mais da fração de areia por quartzo e/ou outros minerais de intemperização difícil. O perfil apresenta pouco desenvolvimento com sequencia de horizontes do tipo A e C e classes textuais areia e areia franca. Drenados excessivamente, muito suscetíveis à erosão e com profundidades superiores a 150 cm geralmente. Possuem baixa fertilidade natural e alta saturação com alumínio;
- e) Solos Hidromórficos Gleizados - sob a influência do lençol freático próximo a superfície são solos pouco desenvolvidos, pouco permeáveis e imperfeitamente a mal drenados. Encontram-se cobertos por vegetação de savana em relevo plano.

Figura 23 - Mapa de Solos do Município de Palmas - TO
(Fonte: SIGPALMAS, 2011 – adaptado)

Analisando o mapa de solos do município, o solo da Bacia do Córrego da Prata é do tipo latossolo vermelho-amarelo que se caracteriza por ser acentuadamente drenado, muito permeável, poroso e com elevado grau de intemperização. Essas características aumentam o grau de vulnerabilidade da área, pois quanto mais permeável é o solo, mais facilidade os poluentes têm de atingir as camadas mais profundas do subsolo e, conseqüentemente, o aquífero.

4.2.1.5 Zoneamento Baseado no Risco à Contaminação da Água Subterrânea

Para a elaboração do mapeamento das atividades e áreas com maior potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas, foram utilizados os seguintes mapas existentes do município: mapa de solos e mapa de zoneamento de áreas. Os mapas foram analisados de forma integrada e de acordo com a lei de uso e ocupação do solo, no que diz respeito à destinação das áreas para atividades potencialmente poluentes.

Figura 24 – Localização da Quadra Dentro da Bacia do Córrego da Prata
(Fonte: SIGPALMAS, 2011 – adaptado)

Para uma análise do risco de contaminação, foi escolhida a quadra 905 Sul (ARSO 92), localizada na Bacia do Córrego da Prata, conforme figura 24. Esta quadra ainda não foi urbanizada e o zoneamento atual é apresentado na figura 25.

Figura 25 – Zoneamento Urbano da Área em Estudo – Destinação das áreas
(Fonte do mapa: SIGPALMAS, 2011 – adaptado)

As áreas definidas no Zoneamento Urbano da Área em Estudo foram classificadas conforme o sistema POSH de classificação, isto é, foram associadas a

Na figura 26, observa-se que para a quadra 905 Sul (Antiga Área Residencial Sudoeste – ARSO – 92) têm-se os índices de risco de contaminação das águas subterrâneas: baixo, moderado e elevado. Na confecção do mapa foram feitas as seguintes considerações:

- a) Analisando o Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação, figura 22, a localização da área em estudo a classifica como área de baixa vulnerabilidade;
- b) De acordo com o Mapa de Solos da região, figura 23, o tipo de solo predominante na Bacia do Córrego Prata, latossolo vermelho-amarelo, aumenta a sua vulnerabilidade, pois se caracteriza por ser poroso, bem drenado e muito permeável;
- c) Mesmo sendo a área vulnerável à contaminação, devido ao tipo de solo, os lotes destinados aos usos residenciais e institucionais não representam fonte potencial de contaminação, classificando-se como áreas de baixo risco;
- d) As áreas destinadas ao comércio foram consideradas de risco moderado, sendo que o risco pode variar de acordo com as características das atividades a serem desenvolvidas no local;
- e) A área destinada ao posto de combustível representa elevado risco de contaminação devido à natureza dos seus produtos e efluentes;
- f) Para elaboração do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo, as áreas verdes, viário e calçadas receberam a classificação das áreas adjacentes;

4.2.1.6 Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo

A partir do Zoneamento Baseado no Risco à Contaminação de Águas Subterrâneas, foram definidas áreas de restrição para utilização de soluções de drenagem com infiltração no solo. Essas áreas são apresentadas no mapa da figura 27 a seguir.

Figura 27 – Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo
(Fonte do mapa: SIGPALMAS, 2011 – adaptado. Fonte restrições: autor)

Para a definição das soluções de drenagem na fonte a serem adotadas, analisou-se o Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo, figura anterior, com os critérios de escolha das medidas de controle na fonte

apresentados nas tabelas 5 a 8 deste trabalho. Assim para a elaboração do Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte, foram considerados os seguintes fatores:

- a) Quanto aos fatores condicionantes para a implantação e operação das técnicas:
 - Capacidade de Infiltração - foi considerando que a capacidade de infiltração no solo é adequada, isto é, entre 7,0 a 200,0 mmh⁻¹;
 - Condições solo-aquífero - foram consideradas boas, com lençol freático não muito alto e subsolo permeável (essas características, quando da implantação da obra deverão ser verificadas *in loco* através de estudos específicos);
 - Condições de localização - de acordo com a planialtimetria da área, o local apresenta baixa declividade, muitas áreas verdes e, como ainda não foi urbanizada, não apresenta interferências por presença de instalações subterrâneas;
 - Condições Sanitárias e Sedimentológicas – além dos fatores apresentados na tabela 5, foi analisado o Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo na verificação do potencial de geração de escoamento contaminado;
 - Restrições Estruturais e de Desenho – as condições de tráfego são de vias locais e secundárias, o tráfego arterial só se dá nas avenidas que contornam a quadra. O desenho limita-se às áreas já pré-definidas no zoneamento, isso que não impossibilita o poder público de comprar ou liberar alguma área para realização das obras.
- b) Quanto ao uso e ocupação do solo:
 - A área é classificada como de baixa densidade, possui lotes residenciais e comerciais – características favoráveis à implantação de técnicas com infiltração no solo;
- c) Quanto às características locais:
 - Para efeitos de elaboração do mapa, o solo foi considerado com boa permeabilidade;
 - Áreas de drenagem de 0 a 2 ha;

- Profundidade do lençol maior que 1,00 m de profundidade (deverá ser verificado *in loco*);
 - Declividade entre 0 e 5% - fator verificado através da planialtimetria local;
 - Carga hidráulica entre 0 e 1 m;
 - Bom espaço disponível.
- d) Quanto à quantidade e qualidade:
- As técnicas compensatórias podem incorporar sistemas de filtração e melhorar a qualidade do volume infiltrado;
 - As técnicas compensatórias reduzem o volume de escoamento superficial;
 - O período de retorno adequado é de até 25 anos para trincheiras de infiltração, pavimento poroso, de até 100 anos para valas e bacias de infiltração.

Analisando as características locais descritas acima, a área apresenta-se favorável à utilização de técnicas com infiltração, sendo que nas áreas com restrição de infiltração *in loco*, o volume total escoamento deverá ser conduzido para a rede de águas pluviais ou para estrutura de tratamento adequado antes de ser infiltrado no solo.

Para efeito de mapeamento, são indicadas as seguintes estruturas:

- a) Superfícies de infiltração – para as áreas abertas com pouca declividade – no zoneamento são as áreas verdes e áreas destinadas ao sistema de lazer e recreação;
- b) Valas e valetas de infiltração – nos canteiros centrais dos principais viários, referentes às avenidas no entorno da quadra;
- c) Trincheiras de infiltração – para as áreas destinadas às calçadas, sugere-se a adoção de uma faixa para implantação da trincheira de infiltração com revestimento em grama, e pavimento permeável na parte destinada ao deslocamento de pedestres; Para as áreas com restrições não foram adotadas calçadas com trincheiras de infiltração;
- d) Pavimentos permeáveis – indicados para o viário interno da quadra que receberão somente o tráfego local e áreas de estacionamento – nas áreas com restrição de infiltração foram indicados pavimentos permeáveis com

manta impermeável, no qual o escoamento pode ser infiltrado superficialmente, armazenado temporariamente na estrutura e encaminhado para a rede de drenagem ou tratamento prévio antes do lançamento ou infiltração no solo.

Assim, o Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte é apresentado na figura 28 a seguir.

Figura 28 – Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte
(Fonte do mapa: SIGPALMAS, 2011 – adaptado. Fonte escolha das técnicas: autor).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a importância da disponibilidade hídrica para o desenvolvimento urbano e o crescente desenvolvimento de técnicas de drenagem no lote, com infiltração do escoamento superficial no solo, observou-se a urgente necessidade de se ter um zoneamento urbano que preserve as águas superficiais e subterrâneas através de medidas restritivas e mitigatórias. Isso principalmente nas áreas mais vulneráveis, com proteção das áreas de recarga dos aquíferos subterrâneos, redução e controle da ocupação em locais com lençol freático, dentre outras ações que garantam a sua preservação quali-quantitativa.

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de uma pesquisa sobre drenagem urbana sustentável em cidades planejadas, analisando-se a aplicação de premissa de zoneamento de áreas urbanas baseado no risco de contaminação da água subterrânea, através do mapeamento de vulnerabilidade e risco à contaminação dos aquíferos presentes na bacia urbana, na escolha de soluções indicadas pelas práticas de gestão sustentável, definidas por ASCE (2004), conhecidas internacionalmente pela sigla BMPs (*Best Management Practices*).

O conceito de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, apresentado neste trabalho, diz respeito a sua maior ou menor suscetibilidade em ser afetado por uma carga poluidora. Assim, foi utilizado o mapa de vulnerabilidade desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2001), elaborado através do Método GOD.

Foram apresentadas as metodologias GOD avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea e o método POSH de classificação, adaptado às peculiaridades locais, do potencial para gerar uma carga contaminante no subsolo (FOSTER; HIRATA, 1988).

Considerando que neste estudo, a cartografia de vulnerabilidade é indicada para estudos regionais com a finalidade de apresentar a vulnerabilidade ao longo de sua distribuição espacial para adequação das medidas de controle e ações de proteção dos aquíferos, a carta de vulnerabilidade da CPRM (2001) foi utilizada principalmente objetivando uma base para classificação da vulnerabilidade e risco à contaminação.

A análise integrada do mapa de vulnerabilidade existente com o Mapa de Fontes Potenciais de Contaminação, desenvolvido a partir do zoneamento urbano

vigente, subsidiou a elaboração do Mapa de Zoneamento Baseados no Risco à Contaminação de Águas Subterrâneas. Este, por sua vez, subsidiou a elaboração do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo.

A cartografia de vulnerabilidade, associada à determinação do tipo de solo e da carga contaminante potencial, seria aplicada principalmente no planejamento territorial, quando do zoneamento das áreas, políticas de desenvolvimento e conscientização pública.

As medidas de controle na fonte apresentam um novo paradigma para a cidade, que é a convivência com as suas águas. Elas apresentam soluções que melhoram as condições gerais de uma região, uma vez que, em geral, elas produzem impactos inferiores àqueles gerados pelas medidas estruturais (SÃO PAULO, 2012c).

Neste trabalho, foi analisada uma quadra da Bacia do Córrego da Prata pertencente à cidade de Palmas-TO, como estudo de caso. Foram considerados os aspectos hidrográficos, hidrogeológicos, tipo de solo, vulnerabilidade e risco à contaminação de aquíferos, para, enfim, se determinar as áreas restritivas e as medidas de controle mais adequadas.

Os dados obtidos quanto aos aquíferos, tipos de solos e águas subterrâneas e as informações geradas através do mapeamento foram comparados e legitimados permitindo, assim, a confecção do Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo, dividindo-se em área permitida e restrita à implantação dessas soluções.

A partir dessa premissa podem-se adotar técnicas de drenagem que infiltrem *in loco* ou que possuam alguma proteção à infiltração, como mantas impermeáveis na base das estruturas e encaminhamento para galerias de águas pluviais ou locais adequados. Neste trabalho, foi apresentado o conceito de *Best Management Practices* (BMPs – ASCE, 2004), estudando as soluções de drenagem com infiltração para a área estudada.

Para a definição das soluções de drenagem na fonte adotadas, analisou-se o Mapa de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo juntamente com os critérios de escolha das medidas de controle na fonte definidos por São Paulo (2012c). Deste modo foi elaborado o Mapa de Implantação de Técnicas de Controle na Fonte, indicando as soluções técnicas indicadas para cada área.

Através das BMPs, o controle do escoamento superficial é realizado o mais próximo possível do local onde a precipitação alcança o solo (controle de escoamento na fonte). A redução do volume ocorre pela infiltração do excesso de água no subsolo, pela evaporação e evapotranspiração, e pelo armazenamento temporário, possibilitando a infiltração e recarga do solo, o aumento do tempo de concentração, e um descarte lento após a chuva, ou reúso desta água retida.

O ideal seria manter na área alterada pela ocupação, um comportamento similar às condições hidrológicas de pré-desenvolvimento, condicionando maior tempo de concentração, menor escoamento superficial, menores níveis de erosão e de poluição das águas e, conseqüentemente, menores investimentos para a mitigação de impactos a jusante (BRASIL, 2006).

A partir da análise do estudo de caso, ressalta-se a importância da implementação de um programa de drenagem urbana sustentável, em articulação com as políticas de desenvolvimento urbano, que promova a adoção de medidas não-estruturais e estruturais dirigidas à prevenção, ao controle e à minimização dos impactos provocados pela urbanização da bacia. Propõe-se, assim, a priorização de propostas que atendam os princípios de sustentabilidade das intervenções de drenagem.

Desta forma, conclui-se que a cartografia de vulnerabilidade, associada à determinação da carga contaminante potencial, é uma importante premissa quando do planejamento territorial, quando do zoneamento de áreas, políticas de desenvolvimento e conscientização pública.

6 RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento da pesquisa notou-se a dificuldade em encontrar dados referentes, principalmente, às águas subterrâneas. As leis e normas existentes já se mostram preocupadas com as águas superficiais, sua preservação e manutenção quali-quantitativa, porém o mesmo não é verdadeiro para as águas subterrâneas. A falta de um banco de dados que caracterize os aquíferos regionais traz prejuízos para o mesmo, podendo ser poluído ou explorado sem o devido controle. Recomenda-se a criação de um banco de dados que permita a análise contínua dessas águas. O Mapa de Risco à Contaminação das Águas Subterrâneas deveria ser elaborado pelos municípios como premissa na elaboração de Planos Municipais de Saneamento e demais planos que interfiram no meio ambiente e recursos hídricos.

Para dar prosseguimento aos resultados alcançados nesta pesquisa, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos, no que diz respeito a:

- a) Mapeamento de áreas de risco de contaminação dos aquíferos no âmbito municipal para subsidiar futuras obras, sejam elas preventivas, mitigatórias ou de remediação;
- b) Desenvolvimento de técnicas de sistematização de dados e desenvolvimento de sistemas de auxílio à tomada de decisão;
- c) Análise mais aprofundada dos resultados obtidos com as técnicas compensatórias em drenagem urbana;
- d) Utilização das técnicas de controle na fonte integradas com planos municipais de saneamento;
- e) Desenvolvimento de Mapas de Restrição às Soluções de Drenagem com Infiltração no Solo no âmbito da bacia hidrográfica;
- f) Análise da capacidade de amortização do pico de cheias com a utilização das premissas apresentadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Glossário de Termos Hidrológicos**, Programa versão 1.1. Brasília DF, 2001.

AGRITEMPO. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Dados Meteorológicos – Tocantins (INMET). 2009. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>>. Acesso em: 18 de nov. de 2011.

ALLER, L. BENNET, T., LEHR, J. H., PETTY, R. J. E HACKETT, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. Environmental Protection Agency Report (EPA), 600/2-85/018, Washington, D.C., 1987.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **BMP Technology in Urban Watersheds: Current and Future Directions**. BMP Technology Symposium: Current and Future Directions, EWR World Water and Environmental Congress, Salt Lake City, Utah, at July, 2004. American Society of Civil Engineers. US, 2004.

AUGE, M. **Vulnerabilidad de acuíferos**. Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, n. 4, p. 85-103. 2004.

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N. e ALFAKIH, E. **Techniques Alternatives en Assainissement Pluvial**. Ed. Technique et Documentation. Lavoisier. Paris, França. 372 p., 1994.

BALTAR, A.; AZEVEDO, L. G. T.; RÊGO, M.; PORTO, R. L. L. **Sistemas de Suporte à Decisão para a Outorga de Direitos de Uso da água no Brasil**. Brasília: Banco Mundial, 2003 (Série Técnica).

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª ed rev. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318 P.

BARROS, M. T. L.; TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. V. 1. 428 p.

BARROS, M. T. L. (Org.). **Plano de Bacia Urbana, Relatório Final**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BARROS, R. T. V. et al. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**, 2. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1995.

BAZOLLI, J. A. **Os Efeitos dos vazios urbanos no custo de urbanização da Cidade de Palmas – TO**. Dissertação de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente – Universidade Federal do Tocantins, 2007. 154 p.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; DA ROSA FILHO, E. F. **O Aquífero Guarani**. 2004. Disponível em: <www.oaquiferoguarani.com.br>. Acesso em: 18 de nov. de 2011.

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C. E. M. **Monitoramento de quantidade e qualidade das águas**. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G.(org.). Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. 3.ed., São Paulo: Escrituras Editoras, 2006. cap.5, p.145-160.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.

_____. Decreto-Lei Nº 24.643 de 10 de julho de 1934. **Código de Águas**. Rio de Janeiro, 1934.

_____. Decreto-Lei Nº 7.841 de 08 de agosto de 1945. **Código das Águas Minerais**. Rio de Janeiro, 1945.

_____. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a **Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília, DF: Senado, 1997.

_____. Decreto-Lei Nº 227 e 28 de fevereiro de 1967. **Código de Minas**. Brasília, DF: 1967.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Conjunto de Normas Legais: Recursos Hídricos**. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. 7ª ed. Brasília, DF: 2011. 644 p. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/>>. Acesso em: 28 de jan. de 2014.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Programa Drenagem Urbana Sustentável: Manual para apresentação de propostas**. Brasília, DF: 2006. 23 p.

CANHOLI, J. F. **Medidas de Controle "in situ" do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas: Análise de Aspectos Técnicos e Legais**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 183 p, 2013.

CETESB. **Relatório de Qualidade de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo, 2004-2006**. CETESB, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 18 de nov. de 2012.

CRUZ, M. A.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. **Controle de drenagem urbana: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade**. In: XVIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2007, São Paulo. Controle de drenagem urbana: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade, 2007.

DAEE/CETESB. **"Drenagem Urbana: Manual de Projeto"**. 3ª ed. São Paulo, CETESB, 477 p., 1986.

EMBRAPA. **Plano de informação de geologia** – escala 1:250.000 (folhas SC.22-Z-B e SC.22-X-D). SEPLAN, Palmas, TO, 1997.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM Serviço Geológico Nacional. 412p. 2001.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. CEPIS/PAHO/WHO. Lima, 1988, 78 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies**. 1. ed. Washington: World Bank Group, 2002. v. 1. 103 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Washington: Banco Mundial, 2006. 104 p.

FOSTER, S.; LAWRENCE, A.; MORRIS, B. **"Groundwater in urban development: assessing management needs and formulating policy strategies"**. World Bank Technical Paper 390. Washington: Banco Mundial, 1988.

FRASCA, A. A. S.; ARAÚJO, V. A.; MONSORES, A. L. M. **Projeto Hidrogeologia no Tocantins** – Folha – SD.22-Z-B-TO-Tocantins. Goiânia. CPRM, 2001.

GONTIJO JR, W. C. **Metodologia para elaboração de projetos de drenagem urbana, considerados os aspectos relativos à sustentabilidade hidrológica e ambiental**. 103 p. - Monografia (especialização) - Universidade Federal de São Carlos - UFSCar e Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento - IBEAS. Brasília, 2003. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 28 de abr. de 2010.

GRANZIERA, M. L. M. **Direito Ambiental**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2009. v. 1. 666 p.

GUARDA, S. D. M. **Expansão Urbana do Entorno do Lago do Município de Palmas – TO (1990, 1993, 1999, 2002, 2005): acompanhamento por dados de sensoriamento remoto**. 2006. 129p. Dissertação de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2006.

Gestão da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. In: Simpósio Nacional sobre o Uso da Água na Agricultura, 2004, Passo Fundo, 2004.

HIRATA, R. **Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade À poluição de aquíferos**. In: Protección de acuíferos frente a la contaminación: Seminario - Taller de vulnerabilidad de acuíferos, Toluca, 2001.

HIRATA, R.; REBOUÇAS, A. **La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de aquíferos**. Boletín. Geol. Minero. Vol. 110 (4): 423-436, 1999.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Contagem Populacional 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 29 de out. de 2013.

INSTITUTO GEOLÓGICO E MINEIRO (IGM). **Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro**. Instituto Geológico e Mineiro, Portugal, 2001. Disponível em: <http://e-geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm>. Acesso em: 18 de nov. de 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (INETI). **Léxico de Termos Hidrogeológicos**. Portugal, 2003. Disponível em: <http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/glossario.aspx>. Acesso em: 18 de nov. de 2012.

LANNA, A.; FREIRE, C.; PEREIRA, J.; KIRCHEIM, R.; RIBEIRO, R. **Aspectos legais da gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Brasil**. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul, 1998, Santa Fé. II Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul, 1998.

MATHIEU, M. R. A.; MELLO, N. A. de. **Gestão ambiental urbana, diferente em cidades planejadas? O caso de três cidades brasileiras**. Confins (Paris), v. 4, p. número 4-en ligne, 2008.

ONU. **Declaração Universal dos Direitos da Água**. 1992

PEDROSA, A. C.; CAETANO, F. A. **Águas subterrâneas**. Agência Nacional de Águas - ANA, Superintendência de Informações Hidrogeológicas - SIH. Brasília, 2002. 85 p. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 25 de mar. de 2011.

PENNSYLVANIA STORMWATER BEST MANAGEMENT practices manual DRAFT (a) – January 2005 "**Section 5 - Structural BMPs**". Disponível em: <<http://www.lowimpactdevelopment.org>>. Acesso em: 18 de nov. de 2011.

_____. (b) "**Section 6 - Comprehensive Stormwater Management: Structural BMPs**". Disponível em: http://www.lowimpactdevelopment.org/raingarden_design. Acesso em: 18 de nov. de 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS (PMP). **Minuta do Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas-TO** (em andamento). Secretaria Municipal de Assuntos Jurídicos, 2014. V. III. 137 p. Disponível em: <<http://portal.palmas.to.gov.br>> Acesso em: 17 de jan. de 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 2005. V. 6. 167 p. Disponível em: <<http://www.fcth.br>>. Acesso em: 29 de abr. de 2010.

POMPEU, C. T. **Direito de Águas no Brasil** (Curso de curta duração ministrado - Aperfeiçoamento). 2002. Disponível em: < <http://www.comitepcj.sp.gov.br> >. Acesso em: 25 de mar. de 2011.

POMPEU, C. T. **Recursos hídricos na Constituição de 1988**, Revista de Direito Administrativo, v. 186, p. 10-25, Ed. RENOVAR/FGV, RJ, out-dez 1991.

PORTO, R. L. L. (Org.). **Hidrologia Ambiental**. São Paulo: ABRH, 1991. v. 1. 414 p.

SÃO PAULO (CIDADE). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana**. São Paulo: SMDU, 2012a. 168p. v.1.

_____. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos**. São Paulo: SMDU, 2012b. 220p. v.2.

_____. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; diretrizes para projetos**. São Paulo: SMDU, 2012c. 128p. v.3.

SEPLAN - RELATÓRIO FINAL. **Plano das Bacias Hidrográficas do Entorno de Palmas-TO**. Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente, Diretoria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Palmas: Seplan, 2004.

SEPLAN. **SIGPALMAS**. Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente do Estado do Tocantins. Disponível em: <<http://www.seplan.to.gov.br>>. Acesso em: 25 de mar. de 2011.

SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st Century**. In: INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME – UNESCO.1998, 37p.

SILVA, V. C. P. **Palmas, a última capital projetada do século XX: uma cidade em busca do tempo**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2010.

TEIXEIRA, L. F. C. **A formação de Palmas - dossiê CIDADES PLANEJADAS NA HINTERLÂNDIA**. Revista UFG/Junho 2009 / Ano XI nº 6 (p.p, 91-99).

TOCANTINS. Lei nº 1.307, de 22 de março de 2002. Dispõe sobre a **Política Estadual de Recursos Hídricos**, e adota outras providências. Lex: Disponível em: [http://www.perh.hpg.ig.com.br/TO/LeiTO1307-02\(Politica%20estadual\).doc](http://www.perh.hpg.ig.com.br/TO/LeiTO1307-02(Politica%20estadual).doc) Acesso em: 21 de outubro de 2004.

TOCANTINS. Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMADES). **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins: Relatório Final**. Rev. 1. Tocantins: 2011. Disponível em: <<http://www.to.gov.br/>> Acesso em: 19 de nov. de 2011.

TOMINAGA, E. N. S. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 137 p, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Aspectos Institucionais do Controle das Inundações Urbanas. Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Curso de Gestão das Inundações Urbanas**. . Porto Alegre: UNESCO – Global Water Partnership South America - Asociación Mundial Del Agua, 2005.

TUCCI, C. E. M. et al. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1995.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J. C. (Org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. ABRH, Porto Alegre - RS, 150 p, 2003.

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. J. S. P.. **Prospecção Sobre Qualidade da Água Subterrânea**. (Consultoria). Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Anexo II-b. Curitiba, 2003.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT. **Urban Storm Drainage Criteria Manual**. Vol. 1 rev. Denver, 2008. Disponível em: <<http://www.udfcd.org>>. Acesso em: 21 de fev. de 2010.

USEPA. **History about EPA**. United States Environment Protection Agency, Washington, 2011. Disponível em: <<http://www.epa.gov/aboutepa/history>> Acesso em: 19 de nov. de 2011.

VIRGILIIS, A. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. EPUSP (Dissertação de Mestrado). São Paulo. 2009.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our Common Future**. Oxford, UK: Oxford University Press, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net>>. Acesso em: 25 de mar. de 2011.

ZIMBRES, Eurico. **Guia avançado de águas subterrâneas**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/aguasubterranea.htm>>. Acesso em: 29 de abr. de 2010.

ZOBY, J.L. G.; HIRATA, R.; OLIVEIRA, F. R. **Recursos hídricos: uma visão estratégica (água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial?)**. 2006. 17p. IBGE. Censo Agropecuário. Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-815.pdf>> Acesso em: 29 de out. de 2013.