

**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO GEOLÓGICO**

CADERNOS DO PROJETO AMBIENTAL ESTRATÉGICO AQUÍFEROS

Número 2

**ROTEIRO ORIENTATIVO PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREA DE
PROTEÇÃO DE POÇO**



São Paulo/2012



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
Geraldo Alckmin – Governador

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE
Bruno Covas – Secretário

INSTITUTO GEOLÓGICO
Ricardo Vedovello – Diretor Geral

Cadernos do Projeto
Ambiental Estratégico Aquíferos

Número 2

**ROTEIRO ORIENTATIVO
PARA DELIMITAÇÃO DE
ÁREA DE PROTEÇÃO DE POÇO**

2ª edição

INSTITUTO GEOLÓGICO

São Paulo, 2012

PROJETO AMBIENTAL ESTRATÉGICO AQUÍFEROS (2007-2011)

Ricardo Vedovello (IG/SMA) - Gerente
Gerônimo Albuquerque Rocha (CRHi/SMA – Sub-gerente
Rosângela Pacini Modesto (CETESB) – Subgerente
Luciana Martin Ferreira Rodrigues (IG/SMA) – Subgerente

FICHA TÉCNICA

Autores

Mara Akie Iritani – IG/SMA
Sibele Ezaki – IG/SMA

Produção Executiva

Luciana Martin Ferreira Rodrigues (IG/SMA)

Colaboração Técnica

Cláudio Luiz Dias (CETESB)
Ricardo Hirata (IGc/USP)
Ana Maciel de Carvalho (IPT)

Projeto Gráfico

Sandra Moni de Souza

AGRADECIMENTOS

A realização desta publicação foi possível graças à colaboração das pessoas abaixo relacionadas que participaram das discussões sobre o documento durante as reuniões de acompanhamento do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos (2007-2011).

Amélia João Fernandes (IG/SMA),
André Kovacs (CPLA/SMA),
Armando T. Takahashi (CPRM),
Carla Veiga da Silva (IG/SMA),
Célia Alves Surita (CRHi/SMA),
Claudia Luciana Varnier (IG/SMA),
Elzira Déa Barbour (CETESB),
Geraldo Hideo Oda (IG/SMA),
Gerônimo Albuquerque Rocha (CRHi/SMA),
Heraldo Campos (EESC/USP),
José Eduardo Campos (DAEE),
José Luiz Albuquerque Filho (IPT),
Luciana Martin Rodrigues Ferreira (IG/SMA),
Luis Sérgio Ozório Valentim (CVS),
Márcia Regina Stradioto (IGCE/UNESP),
Maria Ribeiro Giraldes de Assumpção (SMA),
Marta Teresa Deucher (SMA),
Osmar José Gualdi (DAEE),
Pilar Carolina Villar (PROCAM/USP) e
Rosângela Pacini Modesto (CETESB).

Cadernos do Projeto
Ambiental Estratégico Aquíferos

Número 2

**ROTEIRO ORIENTATIVO
PARA DELIMITAÇÃO DE
ÁREA DE PROTEÇÃO DE POÇO**

Mara Akie Iritani
Sibele Ezaki

2ª edição

INSTITUTO GEOLÓGICO
São Paulo, 2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto Geológico

I4r Iritani, Mara Akie ; Ezaki, Sibebe

Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço / Mara Akie Iritani ; Sibebe Ezaki. – 2. ed. – São Paulo : Instituto Geológico, 2012.

60 p. : il. ; 25,5 cm. - (Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos ; n.2)

ISBN 978-85-87235-13-8

1. Águas subterrâneas. Áreas de proteção de poço.
3. Roteiro orientativo. 4. São Paulo. I. Título

CDD551.49

Instituto Geológico
Av. Miguel Stéfano, 3900
Água Funda - São Paulo - SP - CEP 04301-903
Site: <http://www.igeologico.sp.gov.br>
E-mail: igeologico@igeologico.sp.gov.br

Apresentação

O *Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos* teve início em 2007 reunindo e articulando as diversas instituições envolvidas no tema no Estado de São Paulo, com o intuito de responder, com mais eficiência e eficácia, às necessidades de gestão desse recurso extremamente estratégico, sob o ponto de vista sócio-econômico e ambiental. Continuado a partir de 2011, como *Programa Aquíferos*, indica, no conjunto de suas metas e objetivos, a elaboração e implementação de instrumentos e procedimentos para a gestão, utilização e proteção das águas subterrâneas no Estado de São Paulo.

Entre as ações já desenvolvidas, o presente documento foi elaborado com o intuito de estabelecer um “Roteiro Orientativo” aos Municípios no que se refere à delimitação da Área de Proteção de Poços e Outras Captações, conforme estabelece o Decreto Estadual nº 32.955/91, que regulamenta a Lei Estadual nº 6.134/88. Atendendo a demanda, é lançada agora a sua 2ª edição, que traz revisões no texto e melhoria nas figuras.

Esta publicação enfoca a proteção de poços de abastecimento público e busca apoiar também o Programa Município Verde Azul, na sua diretiva ambiental voltada ao uso da água.

O roteiro revisto é resultado de discussões que aconteceram entre agosto e outubro de 2009 e de contribuições realizadas pelos colaboradores em 2010. Participaram dessas reuniões membros representantes das instituições no Projeto Aquíferos e convidados, para as quais a gerência e coordenação reconhece o trabalho e esforço, e registra aqui seu agradecimento.

BRUNO COVAS

*Secretário do
Meio Ambiente*

RICARDO VEDOVELLO

*Diretor do Instituto Geológico
Gerente do Projeto Ambiental
Estratégico Aquíferos*

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. PRINCÍPIO	3
3. MÉTODOS	11
4. CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS DO ESTADO DE SÃO PAULO	13
5. PROPOSTA DE PERÍMETROS DE ALERTA	15
6. INSTRUÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS	19
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
ANEXO 1 – Artigos do Decreto Estadual N° 32.955/91 relacionados ao estabelecimento de áreas de proteção	25
ANEXO 2 – Lista de atividades pontuais potencialmente poluidoras consolidada com base em CETESB (2001), São Paulo (2002), CRH (2005) e Foster <i>et al.</i> (2006).....	29
ANEXO 3 – Proposta de classificação das atividades antrópicas pontuais quanto ao seu potencial poluidor do solo e das águas subterrâneas.	33
ANEXO 4 – Exemplo de planilha para cadastro das fontes potenciais de poluição no Perímetro de Proteção de Poços	37
ANEXO 5 – Métodos para delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços	39
ANEXO 6 – Cálculo das distâncias radiais para o tempo de trânsito de 50 dias utilizando os métodos do Raio Fixo Calculado (USEPA, 1987) e de Wyssling (Wyssling, 1979) e os parâmetros médios dos aquíferos do Estado de São Paulo (Baseado em DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005; Carvalho, 2007; Carvalho e Hirata, 2012)	45
ANEXO 7 – Exemplo de cálculo do Perímetro de Alerta para poços de abastecimento localizados na porção aflorante do Sistema Aquífero Guarani, em Ribeirão Preto-SP	47

1. INTRODUÇÃO

A proposta deste Roteiro é auxiliar os municípios do Estado de São Paulo na implementação de um instrumento de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, **a delimitação de área de proteção de poços de abastecimento público**.

Esta concepção surgiu com programas governamentais da Europa e Estados Unidos, na década de 1980, com a finalidade de proteger as captações de água subterrânea (poços) destinadas ao abastecimento público da ameaça de contaminação, controlando as atividades existentes e aplicando restrições ao uso e ocupação do solo no seu entorno. Para definição desta área de proteção considera-se um perímetro no entorno da captação que delimita a Zona de Contribuição do poço, isto é, a área onde toda água de recarga que infiltra no aquífero será capturada pelo bombeamento do poço.

O Decreto Estadual nº 32.955, de 07/02/1991, que dispõe sobre a preservação de depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, em seu artigo 20, estabelece uma categoria de área voltada à proteção sanitária e microbiológica da água captada pelo poço, denominada de “Áreas de Proteção de Poços e Outras Captações” (**Anexo 1**). Estas áreas correspondem às porções da Zona de Contribuição mais próximas ao poço e são definidas, segundo os artigos 24 e 25 do referido decreto, por dois perímetros:

- **Perímetro Imediato de Proteção Sanitária**

- raio de dez metros a partir do ponto de captação, cercado e protegido com telas, devendo o seu interior ficar resguardado da entrada ou penetração de poluentes;
- este ponto de captação deverá ser dotado de laje de proteção sanitária para evitar a penetração de poluentes. A laje deve ser de concreto armado, fundida no local, envolver o tubo de revestimento, ter declividade do centro para as bordas, espessura mínima de dez centímetros e área não inferior a três metros quadrados.

- **Perímetro de Alerta**

- área de proteção interna destinada à proteção contra a contaminação microbiológica;

- toma-se por base uma distância a partir do ponto de captação, coaxial¹ ao sentido do fluxo, equivalente ao tempo de trânsito² de cinquenta dias das águas no aquífero, no caso de poluentes não conservativos³;
- no interior deste perímetro deverá haver disciplina das extrações de água, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras.

A Figura 1 ilustra esquema do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e do Perímetro de Alerta estabelecidos em relação à Zona de Contribuição de um poço.

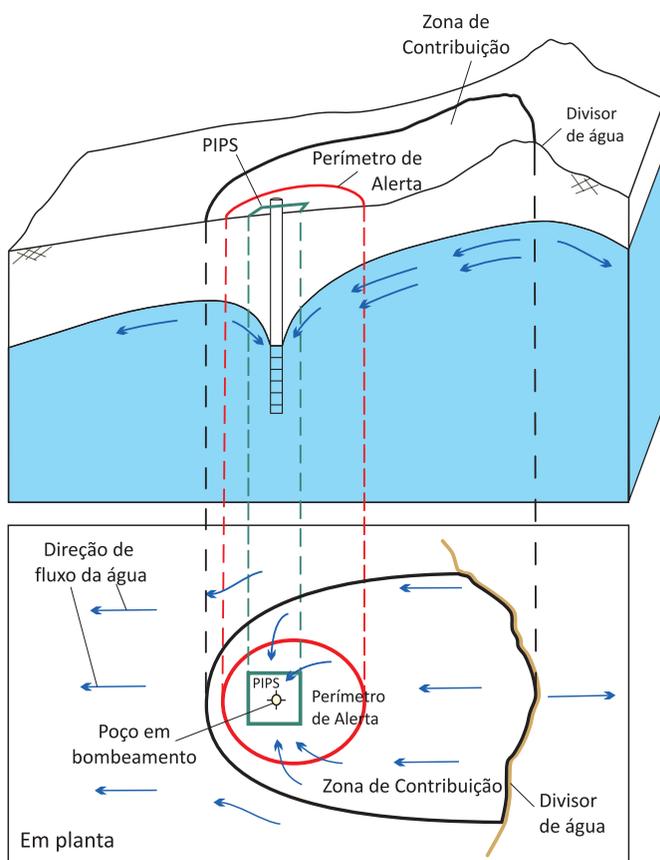


FIGURA 1. Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta estabelecidos no Decreto Estadual nº 32.955/91.

Este roteiro orientativo foi desenvolvido para auxiliar a implantação do Perímetro de Alerta dos poços públicos de abastecimento, mas também pode ser aplicado a poços particulares destinados ao consumo humano.

¹ No mesmo eixo que o fluxo da água subterrânea.

² Distância percorrida pela água num intervalo de tempo de 50 dias.

³ Contaminantes não persistentes que degradam ou se decompõem ao longo do tempo, podendo ser removidos com relativa rapidez, pela intervenção de comunidades biológicas naturais. (http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.aspx?Termo=Poluente+Conservativo)

2. PRINCÍPIO

A área de proteção das captações de água subterrânea para abastecimento humano, delimitada por um perímetro de proteção de poço (PPP), é uma área definida juridicamente, que restringe a ocupação por atividades potencialmente contaminantes.

Os PPPs são definidos ao longo da Zona de Contribuição (ZC) do poço, também denominada de Zona de Captura, ou seja, o perímetro que delimita toda área de recarga do aquífero que contribui diretamente para o poço (Figura 2). A ZC é estabelecida pelos divisores de água subterrânea que se formam pelo bombeamento do poço e pelas fronteiras ou divisores naturais de fluxo.

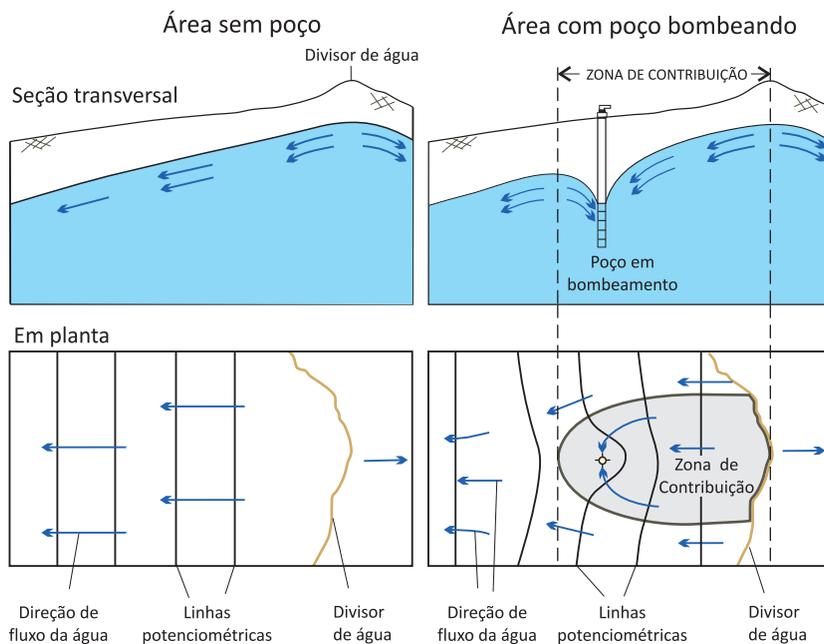


FIGURA 2. Zona de contribuição (ZC) de um poço em funcionamento.

Para uma completa proteção da captação de água subterrânea, o ideal é o estabelecimento de restrições a atividades potencialmente poluidoras em toda a Zona de Contribuição (ZC) do poço. Entretanto, em alguns casos, ela pode ser muito extensa tornando esta estratégia inviável, seja do ponto de vista econômico ou técnico. Assim, a delimitação de perímetros internos à ZC permite o estabelecimento

de zonas de proteção com controle e restrições mais rígidos quanto mais próximos à captação.

Estes perímetros de proteção, contidos na Zona de Contribuição, são estabelecidos em função de alguns critérios como: rebaixamento do nível da água causado pelo bombeamento, distância a partir da captação, tempo de trânsito que a água demora a chegar ao poço, tempo de degradação de um contaminante e, também, feições hidrogeológicas que condicionam o fluxo subterrâneo.

Em alguns casos, o rebaixamento do nível da água causado pelo bombeamento do poço pode ser utilizado para delimitar um perímetro de proteção. O perímetro que delimita a área onde ocorre o rebaixamento do nível da água é denominado de Zona de Influência (ZI), como mostra a Figura 3.

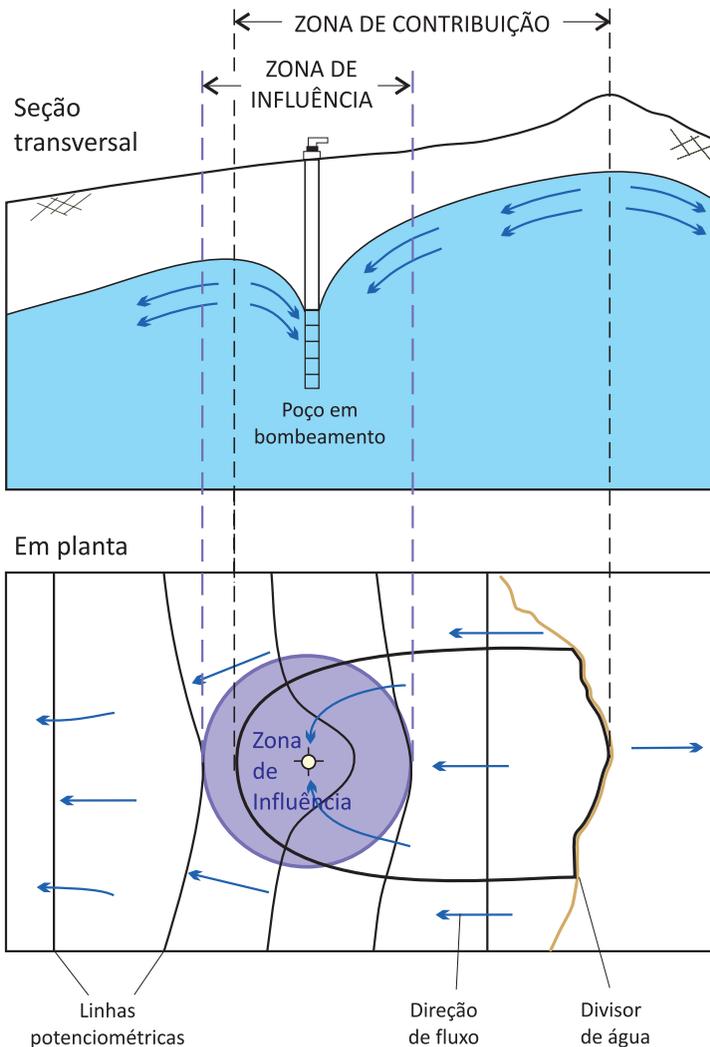


FIGURA 3 . Zona de influência (ZI) de um poço, que corresponde ao cone de rebaixamento.

Cabe, entretanto, ressaltar que em aquíferos com gradiente hidráulico inclinado, a ZI pode não estar totalmente contida na Zona de Contribuição, o que levaria à aplicação de restrições de uso do solo em áreas que não contribuem para o poço.

A distância e o tempo de trânsito são os critérios mais comuns para o estabelecimento desses perímetros de proteção em diversos países desenvolvidos.

O perímetro delimitado pelos pontos com o mesmo tempo de trânsito (isócrona) da água subterrânea no sentido montante do fluxo é denominado de Zona de Transporte (ZT). Por exemplo, a zona de transporte de 50 dias indica que qualquer partícula de água contida internamente a este perímetro atingirá o poço em um tempo máximo de 50 dias (Figura 4).

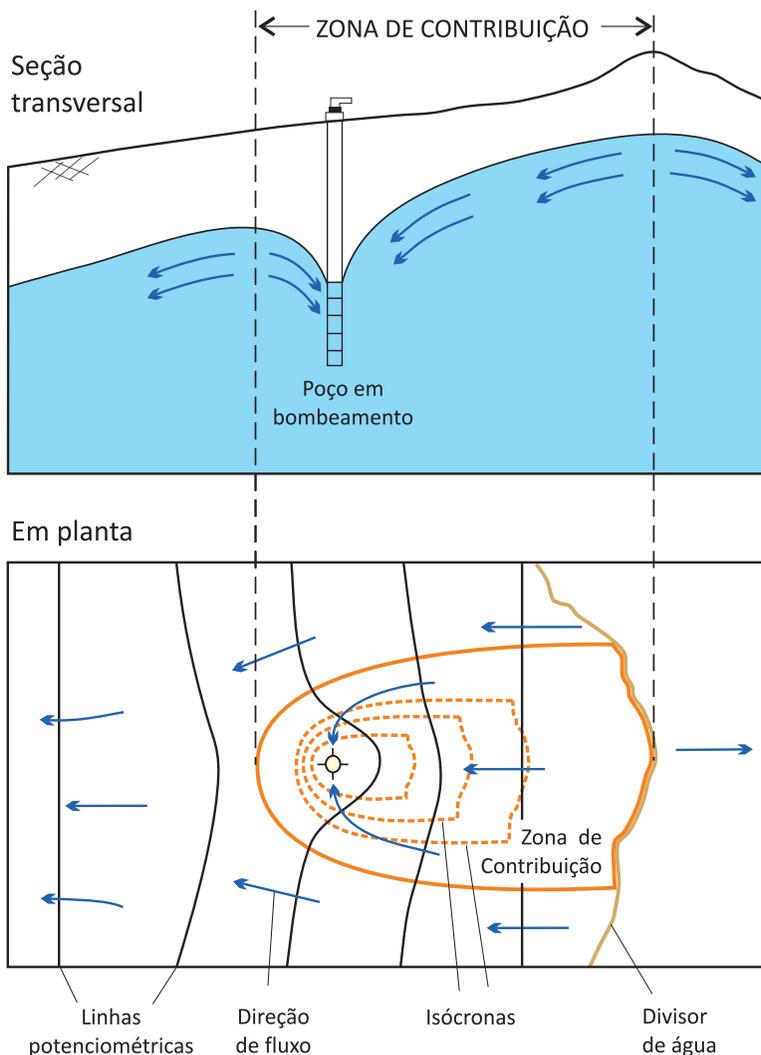


FIGURA 4. Isócronas da água subterrânea no sentido montante do fluxo para definição da Zona de Transporte (ZT) de um poço.

Alguns autores como Adams & Foster (1992), Foster & Skinner (1995) e Foster *et al.* (2006), avaliando a experiência de diversos países, sugerem o estabelecimento de 3 a 5 zonas de proteção. Foster *et al.* (2006) sugerem cinco perímetros internos à ZC baseados em distância e tempo de trânsito para a proteção do poço, como ilustra a Figura 5.

aquífero não confinado

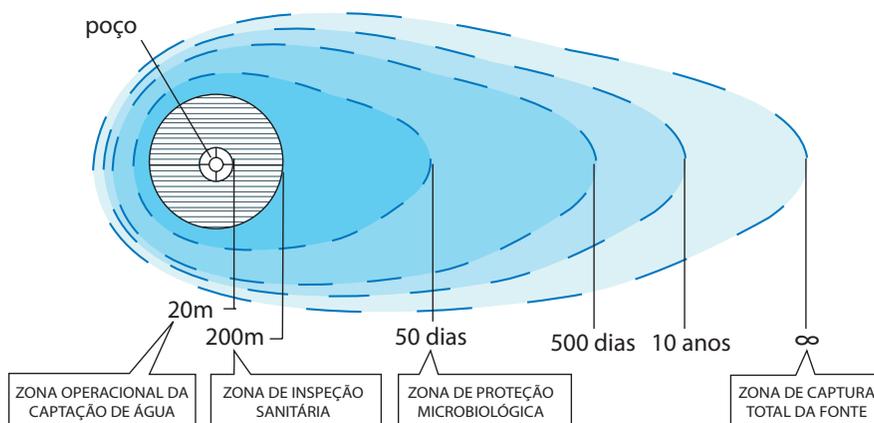


FIGURA 5. Ilustração esquemática da Zona de Contribuição de um poço e os perímetros de proteção baseados em distância e tempo de trânsito sugeridos por Foster *et al.* (2006).

Em virtude de adequações à realidade sócio-econômica e do desenvolvimento metodológico na delimitação dos perímetros de proteção, vários países definiram subdivisões da Zona de Contribuição, estabelecendo graus de restrições ao uso e ocupação do solo em função da proximidade do poço.

A Tabela 1 mostra exemplos de critérios aplicados à ZC para o estabelecimento dos perímetros de proteção de poços em aquíferos livres sedimentares adotados por alguns países e também para os perímetros de proteção estabelecidos no Estado de São Paulo pelo Decreto nº 32.955/91.

No Estado de São Paulo, o Decreto nº 32.955/91 estabelece a Área de Proteção de Poços e Outras Captações, composta por apenas duas categorias de perímetro de proteção. O primeiro, denominado **Perímetro Imediato de Proteção Sanitária**, baseia-se na distância radial de 10 metros a partir da captação; e o outro, **Perímetro de Alerta**, adota o tempo de trânsito de 50 dias a partir do poço, visando a proteção microbiológica (Tabela 1).

TABELA 1. Exemplos de critérios utilizados por diferentes países para delimitação dos perímetros de proteção de poços e aqueles estabelecidos pelo Decreto Estadual nº 32.955/91 (com base em Navarrete & García, 2003).

País	Perímetros de Proteção			
Alemanha	Zona I Raio de 20 m	Zona II Tempo de trânsito de 50 dias	Zona IIIA Distância de 2 km	Zona IIIB Zona de Captura
França	Perímetro Imediato 10 a 20 m	Perímetro Próximo 1 a 10 hectares ou 50 dias de tempo de trânsito	Perímetro Afastado 0,2 a 15 km ou critério técnico	
Reino Unido	Zona I – Proteção interior 50 m ou 50 dias de tempo de trânsito	Zona II – Proteção exterior 25% da ZC ou 400 dias de tempo de trânsito	Zona III – Captação Total Zona de Captura	Zona Z de Proteção Especial Área fora da ZC, mas que pode transmitir contaminação ao poço
Holanda	Área de Captação 50 ou 60 dias de tempo de trânsito	Área de Proteção I 10 anos de tempo de trânsito	Área de Proteção II 25 anos de tempo de trânsito	Área de Recarga 50 a 100 anos de tempo de trânsito
Itália	Zona de Proteção Absoluta Mínimo de 10 m	Zona de Respeito Mínimo de 200 metros	Zona de Proteção Zona de Captura e da Bacia	
Estado de São Paulo – Decreto nº 32.955/91	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) Raio de 10 m	Perímetro de Alerta (PA) 50 dias de tempo de trânsito		

Como observado, estes perímetros estabelecidos no Decreto Estadual estão restritos a áreas bem próximas ao poço, abrangendo apenas uma parte da Zona de Contribuição, o que não é suficiente para promover a proteção da captação de contaminantes mais conservativos (Figura 1).

Para a proteção do restante da ZC, é possível aplicar a categoria de **Área de Restrição e Controle**, conforme estabelecido no artigo 23 do Decreto nº 32.955/91 e na Deliberação CRH nº 52, de 15/04/2005, podendo-se adotar critérios específicos a cada caso para o estabelecimento de outros perímetros de proteção internos à ZC.

Um estudo realizado por SMA & StMUGV (2004) no Município de Ribeirão Preto propôs o estabelecimento de duas zonas para proteger a ZC de um poço de abastecimento: a Zona Proximal de Restrição e Controle (ZPRC), estabelecida com base no tempo de trânsito de 365 dias ou a distância de 1km; e a Zona Distal de Restrição e Controle (ZDRC), abrangendo o restante da ZC ou tempo de trânsito de 10 anos.

As restrições ao uso e ocupação do solo e as medidas de controle das atividades antrópicas são estabelecidas em função da proximidade do poço e do potencial poluidor do empreendimento, sendo mais rígidas nos perímetros mais internos. Estas restrições a serem aplicadas em cada perímetro de proteção devem ser organizadas em documento, como por exemplo, um **Catálogo de Diretrizes e Restrições**, para facilitar sua aplicação pelos órgãos de licenciamento e fiscalização.

A Tabela 2 exemplifica uma proposta de diretrizes para implantação de empreendimentos em áreas de proteção de poços de acordo com o potencial poluidor da atividade antrópica avaliada.

TABELA 2. Proposta de diretrizes para implantação de empreendimentos em área de proteção de poços de acordo com o potencial poluidor da atividade.

Potencial poluidor da atividade antrópica	Perímetros de proteção			
	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária *	Perímetro de Alerta*	Perímetro intermediário	Zona de Contribuição
Elevado	N	N	N	PN
Moderado	N	N	N ou PN	PN ou PP
Reduzido	N	PN	PP	P

* Perímetros de proteção e restrições estabelecidos pelo Decreto Estadual nº 32.955/91

N – empreendimento não permitido em quase todos os casos;

PN – provavelmente não permitido, exceto em alguns casos autorizados pelo órgão ambiental;

PP – provavelmente permitido, desde que obedeça as exigências específicas do órgão ambiental;

P – permitido se atender exigências do órgão ambiental, caso seja solicitado.

Assim, para os poços a serem construídos, a escolha do local para a perfuração deve considerar a viabilidade de proteção da sua Zona de Contribuição e aplicação de restrições de uso do solo.

Para os poços já existentes a aplicação de restrições de ocupação do solo pode ser dificultada, pois os poços estão geralmente instalados em áreas já urbanizadas e ocupadas por diferentes atividades. Para esses poços cabe a aplicação de diretrizes para a readequação e monitoramento das atividades já existentes, restrição à instalação de novos empreendimentos potencialmente poluidores ou, em casos de extremo perigo potencial, a realocação do poço de abastecimento ou até mesmo do empreendimento.

Para avaliar o risco potencial de contaminação a que um poço está sujeito, é necessário conhecer as atividades e empreendimentos existentes em sua Zona de Contribuição (ZC) e avaliar o seu potencial poluidor.

O **Anexo 2** apresenta uma lista de atividades pontuais potencialmente poluidoras, consolidadas com base nos seguintes documentos: CETESB (2001), São Paulo (2002), CRH (2005) e Foster *et al.* (2006).

Para auxiliar a avaliação do potencial poluidor, o **Anexo 3** mostra uma proposta de classificação de atividades antrópicas pontuais. Esta proposta foi elaborada tomando como base as diretrizes estabelecidas em Foster *et al.* (2006), CETESB (2001) e a experiência adquirida nos projetos de pesquisa desenvolvidos no Instituto Geológico.

As atividades existentes na ZC devem ser cadastradas e classificadas de acordo com o perigo potencial de contaminar as águas subterrâneas e as ações a serem tomadas devem ser definidas de acordo com essa periculosidade e a sua localização em relação à captação.

Assim, a existência de atividades com elevado potencial de contaminação e próximas à captação podem levar a ações de monitoramento mais frequente ou até à realocação do poço ou readequação do empreendimento.

O **Anexo 4** apresenta um modelo de planilha para cadastro das fontes potenciais de poluição e acompanhamento do programa de controle dos empreendimentos existentes.

3. MÉTODOS

Existem algumas técnicas e métodos para cálculo e delimitação das Zonas de Contribuição, de Transporte e de Influência, de forma a dar bases para a implantação dos Perímetros de Proteção de Poços. A escolha do método depende do tipo e confiabilidade dos dados disponíveis e do conhecimento sobre o aquífero explotado. Os métodos mais utilizados são:

- Raio Fixo Arbitrário (RFA)
- Raio Fixo Calculado (RFC) – Equação Volumétrica
- Método de Wyssling
- Mapeamento Hidrogeológico
- Modelo Analítico
- Modelos Numéricos – modelos matemáticos de simulação de fluxo

O **Anexo 5** explica sucintamente estes métodos e informações mais detalhadas podem ser encontradas em USEPA (1987, 1994 e 2008); Wyssling (1979), Navarrete e García (2003) e Strobl (2005).

Os métodos mais simplificados, como o raio fixo calculado (USEPA, 1987) e método de Wyssling (Wyssling, 1979), utilizam poucas informações sobre o aquífero e a captação, sendo facilmente aplicáveis. Entretanto, assim como nos modelos analíticos, assumem simplificações do sistema hidrogeológico, o que nem sempre reflete a natureza. Por essas características, os métodos mais simples são indicados para a delimitação de perímetros de proteção mais próximos ao poço, relacionados a pequenos tempos de trânsito, onde as condições de aquífero homogêneo e isotrópico prevalecem. Por outro lado, os modelos numéricos permitem considerar sistemas complexos e heterogêneos e com inúmeros poços, porém necessitam de um conhecimento mais amplo do aquífero e, por conseguinte, uma quantidade maior de informações.

A Tabela 3 ilustra as principais características dos métodos existentes e o tipo de informação necessária para sua aplicação.

TABELA 3. Quadro comparativo – Principais características dos métodos empregados para delimitar perímetros de proteção de poços em meios com porosidade intergranular (baseado em Navarrete & García, 2003)

Método	Tipo de Aquífero	Limitações	Dados Necessários										
			Q	i	K	b	n_e	S	N	V_e	Outros dados		
Raio Fixo Calculado. Equação Volumétrica	P	Fluxo bidimensional. Fluxo ambiental desprezível. Poço com alta capacidade de bombeamento	X			X							
Método de Wyssling	P	Aquífero homogêneo nas proximidades da captação. Gradiente regional uniforme	X	X	X	X	X			X			Direção de fluxo e linhas potenciométricas
Solução Analítica Simples	P	Aquífero homogêneo nas proximidades da captação	X	X	X	X							Direção de fluxo e linhas potenciométricas
Mapeamento Hidrogeológico	P,C,F	Proporciona área única para o perímetro de proteção. Esta não depende do tempo de trânsito											Limites do aquífero captado. Cartografia hidrogeológica. Direção de fluxo e linhas potenciométricas. Relação Rio-Aquífero
Modelo Matemático, ex: Visual MODFLOW Visual MODPATH	P	Considera a componente de advecção de transporte de solutos, mas não considera a difusão e dispersão											Limites hidrogeológicos da área a modelar. Condições de contorno (recarga, características dos rios e drenagens). Geometria e tipo de aquífero. Potenciometria. Valores dos parâmetros hidráulicos em cada célula (K_x, K_y, K_z, S, n_e), Q e regime de bombeamento em cada captação
LEGENDA:		Dados Necessários:											
Tipo de aquífero:		Q: Vazão bombeada											
P: Porosidade intergranular ou similar		N: Recarga											
C: Cársico		b: Espessura saturada											
F: Fissural		S: Coeficiente de Armazenamento											
		K: Condutividade hidráulica											
		V_e : Velocidade efetiva											
		i: Gradiente hidráulico											
		n_e : Porosidade efetiva											

4. CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS DO ESTADO DE SÃO PAULO

No Estado de São Paulo os aquíferos podem ser divididos em dois grandes grupos: sedimentares e fraturados.

Nos aquíferos sedimentares a água circula pelos poros formados entre os grãos das rochas. Com maior predominância em área, esta categoria é representada pelos seguintes sistemas aquíferos: Furnas, Tubarão, Guarani, Bauru, Taubaté, São Paulo e Litorâneo. Entre as unidades sedimentares com fluxo em meio poroso incluem-se também as Coberturas Cenozóicas, de expressão local e pequena espessura, muitas vezes, explotadas por poços rasos, e o Passa Dois, de baixa produtividade e por isso classificado regionalmente como Aquiclude.

Nos aquíferos fraturados a água circula pelas fraturas e outras descontinuidades geradas na rocha devido aos esforços impostos pela dinâmica e movimentação da crosta terrestre. Esta categoria é representada pelos sistemas aquíferos Cristalino e Serra Geral. Com menor expressão, existe também a unidade formada pelos Diabásios. No Sistema Aquífero Cristalino existem também porções onde predominam feições de dissolução, constituindo um aquífero cárstico.

De forma a orientar a delimitação dos perímetros de proteção de poços e outras captações, foram reproduzidas na Tabela 4 as características gerais e parâmetros hidráulicos dos principais aquíferos do Estado de São Paulo.

Estes parâmetros foram compilados de Carvalho (2007) e de Carvalho e Hirata (2012) que levantaram esses dados nos diversos estudos hidrogeológicos existentes no Estado de São Paulo.

A determinação da Zona de Contribuição e dos Perímetros de Proteção de um poço deve ser baseada nas características locais e nos parâmetros hidráulicos específicos do aquífero e da captação.

Esta tabela é apenas orientativa e seus valores devem ser utilizados somente para verificação dos dados do local estudado ou na ausência desses.

TABELA 4. Características gerais dos aquíferos do Estado de São Paulo (Dados extraídos de diversos estudos de águas subterrâneas por Carvalho, 2007 e Carvalho e Hirata, 2012).

Sistema Aquífero	Aquífero	Espessura média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Transmissividade (m ² /d)	Coefic. de armazenamento	Porosidade Efetiva / Total	Condutividade Hidráulica (m/d)	Gradiente Hidráulico
Bauri	Coberturas Cenozóicas	30	1 – 30	0,1 – 5,0	-	-	10 ⁻³ – 0,1	0,01 – 4,66	
	Litorâneo	100	3 – 20	0,1 – 3,0	1 – 200	-	0,15 (total)		
	São Paulo	300	9 – 15	0,5 – 1,0	15 – 70	0,06			
	Taubaté	500	15 – 200	0,01 – 2,0	0,5 – 100	1x10 ⁻⁴ – 1,0	-	0,01 – 1,0	
	Marília	180	5 – 10	-	-	-	-	2x10 ⁻³ – 3,66	
	Adamantina	190	8 – 30	0,5 – 1,0	30 – 50	1x10 ⁻⁴ – 0,01	1x10 ⁻³ – 0,15	0,1 – 0,3	8 – 10 (montante)
	Santo Anastácio	80	20 – 50	1,0 – 2,0	50 – 100	50 – 100	0,1 – 0,25	0,3 – 1,0	3 – 5 (jusante)
	Caiuá	200	50 – 150	2,0 – 5,0	100 – 200	100 – 200	0,1 – 0,15	<3,0	
	Serra Geral	150	5 – 70	0,01 – 10,0	1 – 700 ou 10 ⁻⁵ – 8x10 ⁻³ m ² /s	-	0,01 – 0,05	Horizontal: 4,3x10 ⁻² – 4,3 Vertical: 0,86 – 8,6	-
	Guarani	Botucatu/Pirambóia (livre)	250	10 – 100	0,03 – 17,0		1x10 ⁻³ – 0,2	0,2 – 0,25 (total)	0,2 – 4,0
Botucatu/Pirambóia (confinado)		500	50 – 600	0,01 – 26,0		10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁴	0,16 – 0,24 (total)	0,5 – 4,6	1
Botucatu			10 – 200	-			0,17 – 0,30	2x10 ⁻¹ – 4,6	
Pirambóia			3 – 100	-			0,14 – 0,24	10 ⁻² – 4,6	
Botucatu/Pirambóia (SAG)			10 – 600	4x10 ⁻⁵ – 2x10 ⁻⁴	3,9x10 ⁻¹ – 10 ³ ou 4,5x10 ⁻⁴ – 1,2x10 ² m/s	-	0,1 – 0,15 (total)	1,7x10 ⁻¹ – 1,6x10 ²	
Tubarão	Passa Dois	120	3 – 10	5x10 ³ – 1,0		1x10 ⁻⁴ – 0,02	0,1 (total) 1x10 ⁻⁴ – 0,02	7x10 ⁻²	
	Aquidauana		3 – 30	5x10 ⁻³ – 8,5		1x10 ⁻⁴ – 0,05	10 ⁻⁴ – 0,05		
	Itararé	1000	10 – 50	0,2 – 1,0		0,3 – 200	0,15 (total)	2x10 ⁻³ – 0,7	
	Furnas	200	5 – 30	1x10 ³ – 7,0		0,1 – 200	0,2	-	
	Cristalino	200	5 – 30	1x10 ³ – 7,0		0,1 – 200	0,15	0,84 – 0,0084	

5. PROPOSTA DE PERÍMETROS DE ALERTA

O Perímetro de Alerta baseado no tempo de trânsito de 50 dias abrange uma pequena parte da Zona de Captura ao redor do poço e pode ser calculado por métodos simples como do Raio Fixo Calculado (USEPA, 1987) e de Wyssling (Wyssling, 1979), que utilizam pouca informação hidrogeológica e são fáceis de calcular (**Anexo 5**).

Buscando orientar e estimular a implementação do Perímetro de Alerta para os poços de produção municipais, conforme estabelecido pelo Decreto Estadual nº 32.955/91, são propostos na Tabela 5 e Figura 4, os raios para delimitação deste perímetro considerando as características médias dos principais aquíferos do Estado de São Paulo.

TABELA 5. Vazão de poço e distância radial (R) propostas para delimitação do Perímetro de Alerta para os aquíferos do Estado de São Paulo.

Unidade Hidrogeológica	Vazão do poço	Distância radial (R) proposta para Perímetro de Alerta
Aquífero Furnas		40 m
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 metros de espessura de basalto)	Até 40 m ³ /h	30 m
	Acima de 40 m ³ /h	50 m
Sistema Aquífero Bauru	Até 20 m ³ /h	30 m
	Acima de 20 m ³ /h	60 m
Aquífero Taubaté	Até 40 m ³ /h	30 m
	Acima de 40 m ³ /h	50 m
Aquífero São Paulo	Até 20 m ³ /h	30 m
	Acima de 20 m ³ /h	50 m
Aquífero Litorâneo		30 m
Coberturas Cenozóicas		60 m
Sistema Aquífero Serra Geral e Diabásio	Até 30 m ³ /h	40 m
	Acima de 30 m ³ /h	70 m
Sistema Aquífero Cristalino	Até 15 m ³ /h	30 m
	Acima de 15 m ³ /h	50 m
	Cárstico	100 m

O Sistema Aquífero Guarani, em sua porção confinada, possui uma proteção natural exercida pelos basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral, cuja espessura pode chegar a várias centenas de metros. Apenas onde a espessura dos basaltos é pequena sua natureza fraturada pode permitir a percolação de contaminantes que coloquem em risco a qualidade da água do Sistema Aquífero Guarani. Dessa forma, na Tabela 5 sugere-se a implantação do Perímetro de Alerta no Sistema Aquífero Guarani apenas nos poços onde a espessura do basalto sobre os arenitos é inferior a 50 metros.

O Aquíclode Passa Dois é regionalmente uma unidade hidrogeológica de pouca importância ao abastecimento público devido à baixa produtividade dos poços. Por esse motivo, este documento não contemplou o cálculo da distância radial para essa unidade e, caso necessário, o usuário pode calcular o perímetro de proteção utilizando os dados específicos do poço e as fórmulas descritas no **Anexo 5**.

Assim, o Perímetro de Alerta deve ser delimitado ao redor do poço, considerando a distância radial calculada com os dados produtivos da captação e do aquífero explorado ou utilizando os valores sugeridos na Tabela 5, conforme mostra a Figura 6.

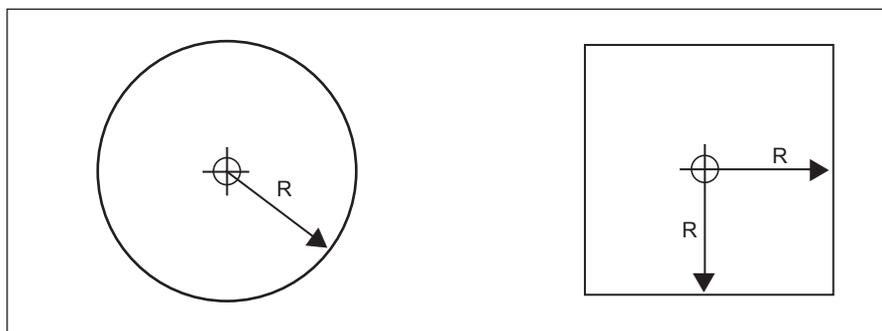


FIGURA 6. Delimitação do Perímetro de Alerta a partir das distâncias (R) propostas na Tabela 5

As distâncias radiais (R) propostas na Tabela 5 foram baseadas no cálculo da distância percorrida pela água em um tempo de trânsito de 50 dias, utilizando os métodos do Raio Fixo Calculado (RFC) (USEPA, 1987) e de Wyssling (Wyssling, 1979) (**Anexo 6**). Estes métodos foram selecionados devido a sua facilidade de aplicação e por apresentarem resolução aceitável para pequenos tempos de trânsito.

Estas distâncias (R) foram calculadas considerando os parâmetros compilados de Carvalho (2007) e Carvalho e Hirata (2012) na Tabela 4, informações dos aquíferos levantados pelo IG em estudos anteriores e também os dados e valores de vazão provável discriminados no Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE, IG, IPT, CPRM 2005).

Os resultados obtidos pelos dois métodos são bastante próximos, como mostra a Tabela 6, e serviram de base para a proposição das distâncias radiais (R) discriminadas na Tabela 5.

TABELA 6. Comparação das distâncias calculadas pelos métodos do Raio Fixo Calculado (RFC) e de Wyssling e a proposta de distância radial (R) a ser aplicada para cada aquífero na delimitação do Perímetro de Alerta.

Unidade Hidrogeológica	Vazão	Método			Proposta do Roteiro Orientativo sobre PPP
		RFC	Wyssling		Perímetro de Alerta (m)
		R (m)	S _o (m)	S _u (m)	
Sistema Aquífero Cristalino	Q < 15 m ³ /h	23,94	30,68	18,68	30
	Q > 15 m ³ /h	43,70	50,11	38,11	50
	Cárstico	-	-	-	100
Aquífero Furnas		30,90	37,78	25,28	40
Sistema Aquífero Tubarão		20,89	24,11	18,11	25
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 metros de espessura de basalto)	Q < 40 m ³ /h	26,06	30,56	22,22	30
	Q > 40 m ³ /h	45,14	49,49	41,16	50
Aquífero Serra Geral	Q < 30 m ³ /h	30,90	41,67	22,92	40
	Q > 30 m ³ /h	61,80	71,89	53,14	70
Sistema Aquífero Bauru	Q < 20 m ³ /h	23,03	30,12	17,62	30
	Q > 20 m ³ /h	51,50	58,13	45,63	60
Aquífero Taubaté	Q < 40 m ³ /h	24,24	30,69	19,15	30
	Q > 40 m ³ /h	41,99	48,15	36,61	50
Aquífero São Paulo	Q < 20 m ³ /h	27,64	36,14	21,14	30
	Q > 20 m ³ /h	43,70	51,84	36,84	50
Aquífero Litorâneo		30,90	31,69	30,13	30
Coberturas Cenozóicas		50,46	58,52	43,52	60

No **Anexo 7** é apresentado um exemplo de cálculo dos raios para delimitação do Perímetro de Alerta, utilizando dados de poços em Ribeirão Preto.

6. INSTRUÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS

A implementação das Áreas de Proteção de Poços é uma ação que envolve forte articulação dos órgãos municipais e a necessária conscientização por parte do nível político da Prefeitura e da Câmara de Vereadores, quanto a sua co-responsabilidade pela qualidade da água que serve aos seus municípios.

As etapas e responsabilidades para a implantação das áreas de proteção (Figura 7) são:

- 1) A Empresa de abastecimento público (autarquia ou concessionária) desenvolve **Estudo Técnico** para a definição dos limites da área de proteção que pode ser feita para um poço ou conjunto de poços.
- 2) A Equipe Técnica da Prefeitura Municipal, com o apoio da CETESB, cadastra e classifica as fontes potenciais de poluição instaladas nas Áreas de Proteção dos Poços existentes, implantando um programa de controle e monitoramento dos empreendimentos existentes e restrições a novas instalações.

O **Anexo 4** deste Roteiro apresenta um exemplo de planilha para cadastro das fontes potenciais de poluição

- 3) A Equipe Técnica da Prefeitura Municipal incorpora as Áreas de Proteção de Poços e Outras Captações no Plano Diretor e estabelece um **Catálogo Orientativo** de diretrizes e restrições de uso do solo (urbano e rural) a ser aplicado nas áreas de proteção dos novos poços que eventualmente forem construídos.

Os órgãos licenciadores municipais que atuam sobre o parcelamento do uso do solo e estaduais de licenciamento ambiental (CETESB – Agência Ambiental do Estado de São Paulo) e de saúde (CVS – Centro de Vigilância Sanitária) levam em consideração as diretrizes estabelecidas no Catálogo Orientativo de Diretrizes e Restrições em cada zona delimitada.

O órgão de outorga de uso dos recursos hídricos (DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica) exige e avalia a de-

limitação da Área de Proteção de Poços conforme consta no artigo 25 do Decreto Estadual nº 32.955/91 no ato da outorga dos poços destinados ao sistema público de abastecimento humano.

- 4) Esta delimitação é encaminhada pela Prefeitura aos órgãos gestores de recursos hídricos e ao Comitê de Bacia para conhecimento.

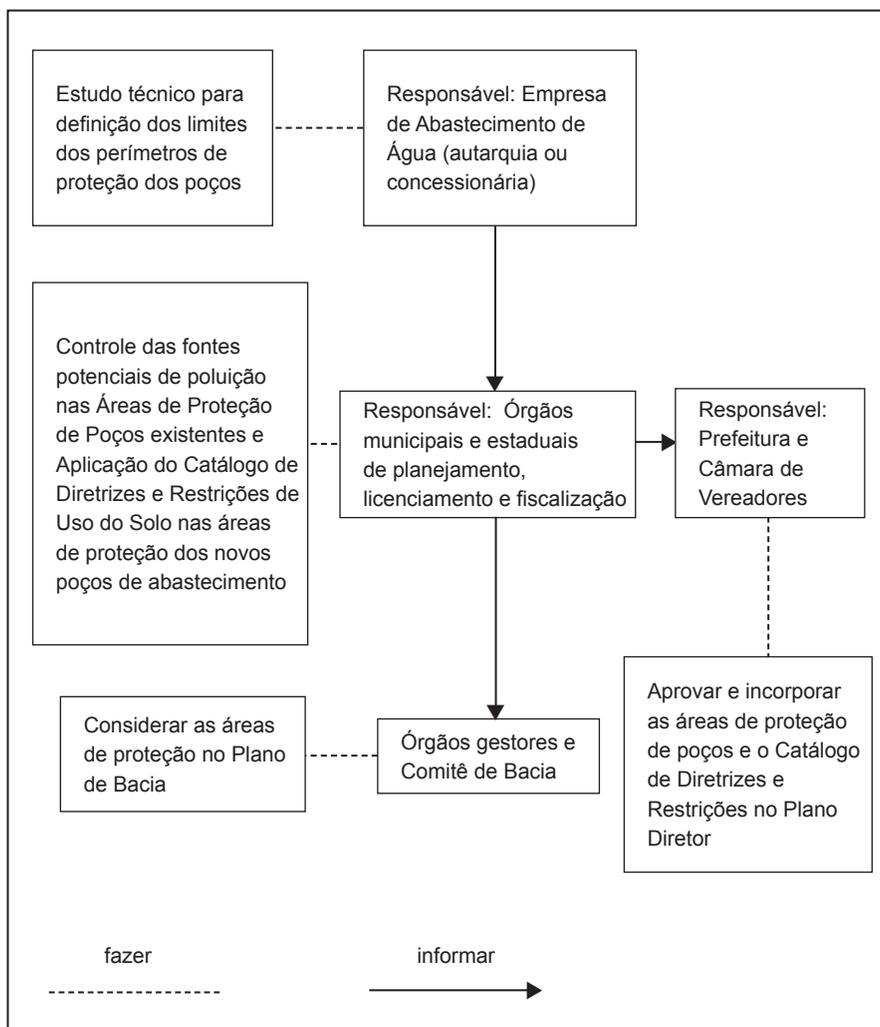


FIGURA 7. Ações e responsabilidades no processo de implantação dos perímetros de proteção de poços

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, B.; FOSTER, S. S. D. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal of Institution of Water and Environmental Management*, v. 6, p. 312-320. 1992.
- CARVALHO, A. M. Proteção das áreas de abastecimento de água subterrânea no Estado de São Paulo. Monografia de Trabalho de Formatura, São Paulo. Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. 2007.
- CARVALHO, A.M.; HIRATA, R. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. *Geol. USP, Série cient.* [online]. vol.12, n.1, p. 53-70, 2012, <http://dx.doi.org/DOI:10.5327/Z1519-874X2012000100005>.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Capítulo 3101. CETESB, São Paulo, 2001.
- CRH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação CRH nº 52, de 15 de abril de 2005. Institui no âmbito do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SIGRH diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas.
- DAEE, IG, IPT, CPRM. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. 2005.
- FOSTER, S. S. D.; SKINNER, A. C. Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning. *International Association of Hydrological Sciences*, 225, p. 471-482. 1995.
- 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. Banco Mundial, Washington, D.C. 2006.
- IRITANI, M .A. Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1999.
- MERINO, L. M.; NAVARRETE, C. M. Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas. IGME. Madrid, 289 p. 1991.

- NAVARRETE, C.M; GARCÍA, A.G. Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS. IGME. Madrid, 2003. 273 p. ISBN: 84-7840-496-1
- SÃO PAULO. Lei Estadual nº 6.134, de 02 de junho de 1988. Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, e dá outras providências. São Paulo, 1988.
- SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 32,955, de 07 de fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 2 de junho de 1988. São Paulo, 1991.
- SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 47.397-02, de 4 de dezembro de 2002. Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os Anexos 9 e 10 ao Regulamento da Lei 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto ° 8.468 de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e controle da poluição do meio ambiente. São Paulo, 2002.
- SMA/São Paulo & StMUGV/Baviera Projeto “Sistema de Informação para o Gerenciamento Ambiental do Recurso Hídrico Subterrâneo no Afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo”. Cooperação Técnica entre a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (Brasil) e a Secretaria de Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor do Estado da Baviera (Alemanha) - CD-ROM (Relatório Técnico), São Paulo, 2004.
- STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Review of U. S. EPA – recommended and German wellhead protection area delineation methods. *Journal of Environmental Hydrology*, v. 13, paper 3, p. 1-19, 2005.
- STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Comparison of several EPA-recommended US and German well-head protection area delineation methods in agricultural settings. *Water SA*, v. 32, n. 4, p. 507-517, 2006.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. EPS-440/6-87-010. USEPA, Office of Groundwater Protection, Chicago, 174 p. 1987.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. Handbook ground water and wellhead protection. EPA/625/R-94/001.

-
- USEPA, Office of Research and Development, Cincinnati, 269 p. 1994.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. A systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems. EPA/600/R-08/003. USEPA, Ground Water and Ecosystems Restoration Division, Ada, Oklahoma, 38 p. 2008.
- WYSSLING, L. Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, v. 72/2, p. 401-406, 1979.

ANEXO 1

ARTIGOS DO DECRETO ESTADUAL Nº 32.955/91 RELACIONADOS AO ESTABELECIMENTO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO

CAPÍTULO III

Das Áreas de Proteção

SEÇÃO I

Do Estabelecimento de áreas de Proteção

Art. 19 - Sempre que, no interesse da conservação, proteção e manutenção do equilíbrio natural das águas subterrâneas, dos serviços de abastecimento de água, ou por motivos geotécnicos ou geológicos, se fizer necessário restringir a captação e o uso dessas águas, o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE e a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental proporão ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos a delimitação de áreas destinadas ao seu controle.

§ 1º - Nas áreas a que se refere este artigo, a extração de águas subterrâneas poderá ser condicionada à recarga natural ou artificial dos aquíferos.

§ 2º - As áreas de proteção serão estabelecidas com base em estudos hidrogeológicos pertinentes, ouvidos os municípios e demais organismos interessados.

SEÇÃO II

Da Classificação das Áreas de Proteção

Art. 20 - Para os fins deste Decreto, as áreas de proteção classificam-se em:

I - Área de Proteção Máxima: compreendendo, no todo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público;

II - Área de Restrição e Controle: caracterizada pela necessidade de disciplina das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras; e

III - Área de Proteção de Poços e Outras Captações: incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção. (*grifo nosso*)

SEÇÃO III

Das Áreas de Proteção Máxima

Art. 21 - Nas áreas de Proteção Máxima não serão permitidos:

I - a implantação de indústrias de alto risco ambiental, pólos petroquímicos, carboquímicos e cloroquímicos, usinas nucleares e quaisquer outras fontes de grande impacto ambiental ou de extrema periculosidade;

II - as atividades agrícolas que utilizem produtos tóxicos de grande mobilidade e que possam colocar em risco as águas subterrâneas, conforme relação divulgada pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e Secretaria de Agricultura e Abastecimento; e

III - o parcelamento do solo urbano sem sistema adequado de tratamento de efluente ou de disposição de resíduos sólidos.

Art. 22 - Se houver escassez de água subterrânea ou prejuízo sensível aos aproveitamentos existentes nas Áreas de Proteção Máxima, o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, e a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de acordo com as respectivas atribuições poderão:

I - proibir novas captações até que o aquífero se recupere, ou seja, superado o fato que determinou a carência de água;

II - restringir e regular a captação de água subterrânea, estabelecendo o volume máximo a ser extraído e o regime de operação;

III - controlar as fontes de poluição existentes, mediante programa específico de monitoramento; e

IV - restringir novas atividades potencialmente poluidoras.

Parágrafo único - Quando houver restrição à extração de águas subterrâneas, serão prioritariamente atendidas as captações destinadas ao abastecimento público de água, cabendo ao Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE estabelecer a escala de prioridades, segundo as condições locais.

SEÇÃO IV

Das Áreas de Restrição e Controle

Art. 23 - Nas Áreas de Restrição e Controle, quando houver escassez de água subterrânea ou prejuízo sensível aos aproveita-

mentos existentes, poderão ser adotadas as medidas previstas no artigo 22 deste Decreto.

SEÇÃO V

Das Áreas de Proteção de Poços e Outras Captações (grifo nosso)

Art. 24 - Nas Áreas de Proteção de Poços e Outras Captações, será instituído Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, abrangendo raio de dez metros, a partir do ponto de captação, cercado e protegido com telas, devendo o seu interior ficar resguardado da entrada ou penetração de poluentes.

§ 1º - Nas áreas a que se refere este artigo, os poços e as captações deverão ser dotados de laje de proteção sanitária, para evitar a penetração de poluentes.

§ 2º - As lajes de proteção, de concreto armado deverão ser fundidas no local, envolver o tubo de revestimento, ter declividade do centro para as bordas, espessura mínima de dez centímetros e área não inferior a três metros quadrados.

Art. 25 - Serão estabelecidos, em cada caso, além do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, Perímetros de Alerta contra poluição, tomando-se por base uma distância coaxial ao sentido do fluxo, a partir do ponto de captação, equivalente ao tempo de trânsito de cinquenta dias de águas no aquífero, no caso de poluentes não conservativos.

Parágrafo único - No interior do Perímetro de Alerta, deverá haver disciplina das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras.

ANEXO 2

LISTA DE ATIVIDADES PONTUAIS POTENCIALMENTE POLUIDORAS CONSOLIDADA COM BASE EM CETESB (2001), SÃO PAULO (2002), CRH (2005) E FOSTER *ET AL.* (2006).

Tipo de atividade	Tipologia	Atividades	Principais contaminantes
Mineração	Minerais Metálicos	Extração e beneficiamento de minerais metálicos ferrosos e não ferrosos	Ferro, chumbo, alumínio, cobre, cromo, cádmio, estanho, níquel, manganês, vanádio, antimônio
	Minerais Não Metálicos	Extração e beneficiamento de minerais não metálicos (fosfatos, baritas, piritas, nitratos, potássio, fósforo, enxofre, amianto, talco, grafite natural)	Alumínio, ferro, manganês bário, berílio, nitratos, sulfatos, fluoretos, asbestos
	Petróleo, Gás Natural, Carvão Mineral.	Extração de petróleo cru, gás natural, xisto, carvão, areias betuminosas, linhito, turfa, antracito, hulha.	Hidrocarbonetos, fenóis, ácidos e bases
Produção industrial	Refino de Petróleo, Coque, Combustíveis Nucleares e Álcool.	Fabricação de: produtos do refino do petróleo (butano, GLP, metano, propano, gasolina, nafta, gás natural, querosene comum e de aviação); óleos (diesel, combustível, gasóleo); produtos aromáticos; ceras minerais; parafina; hexano vaselina; aguarrás; lubrificantes; asfalto; coque e alcatrão de petróleo; alcatrão e gás de hulha; combustíveis nucleares (urânio e tório).	Hidrocarbonetos, fenóis, ácidos e bases, potássio, nitrato, sulfato, vanádio, antimônio, bário, berílio, tálio, mercúrio, selênio, resíduos radioativos, hidrocarbonetos policíclicos-PAH
		Fabricação de álcool anidro e hidratado	Ácidos e bases
	Produtos Minerais Não Metálicos	Fabricação de canos, manilhas, ladrilhos, azulejos, tubos, conexões, mosaicos, pastilhas, artefatos de cré, material sanitário, porcelana, faiança e misturas betuminosas	Chumbo, cobre, cromo, níquel, cádmio, antimônio, bário, alumínio, tálio, silicatos
	Material Refratário	Fabricação de materiais aluminosos, silicosos, silicoaluminosos, grafitosos, pós-exotérmicos e refratários	Chumbo, cobre, cromo, níquel, silicatos, alumínio
	Metalurgia Básica - Processamento de metais	Produção de ferro e aço; galvânica (tempera, cementação, cromação, zincagem, niquelação, anodização estanhagem e douração)	Ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, bário níquel, antimônio, cianetos, asbestos, bifenilas policloradas-PCB, solventes halogenados, hidrocarbonetos, tintas, óleos e graxas
		Produção de fundidos, laminados, forjados, soldas e ânodos; metalurgia de metais preciosos	Ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, bário níquel, antimônio, cianetos, asbestos, hidrocarbonetos, óleos e graxas
	Máquinas e Equipamentos	Fabricação de máquinas, equipamentos e acessórios em geral	Ferro, alumínio, chumbo, cobre, cromo, cádmio, níquel, vanádio, antimônio, tungstênio, cianetos, hidrocarbonetos, óleos e graxas, solventes

ANEXO 2

LISTA DE ATIVIDADES PONTUAIS POTENCIALMENTE POLUIDORAS CONSOLIDADA COM BASE EM CETESB (2001), SÃO PAULO (2002), CRH (2005) E FOSTER *ET AL.* (2006). (Continuação)

Tipo de atividade	Tipologia	Atividades	Principais contaminantes	
Produção industrial	Material Elétrico e Eletrônico	Fabricação de: materiais equipamentos e acessórios para produção, transmissão e distribuição de energia elétrica de alta e baixa tensão; pilhas, baterias e lâmpadas	Ácidos, bases, fenóis, hidrocarbonetos, chumbo, cobre, cromo, níquel, cádmio, mercúrio, antimônio, bário, solventes, óleos e graxas	
	Equipamentos de Transporte	Fabricação e montagem de veículos (rodoviários e ferroviários), reboques, carrocerias, máquinas, motores e turbinas; construção e reparação de embarcações e aeronaves, incluindo peças e acessórios	Ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, berílio, níquel, cianetos, hidrocarbonetos, tintas e solventes	
	Produtos de Madeira	Peças e artefatos de madeira com tratamento a base de produtos químicos, preservação e imunização da madeira	Fabricação de peças e artefatos de madeira sem tratamento a base de produtos químicos	Hidrocarbonetos, chumbo, cobre, cromo compostos organoclorados
	Celulose e Papel	Fabricação de: celulose, pasta mecânica, polpa de madeira, papel, papelão e cartolina	Óleos e graxas, ácidos, bases; bário, alumínio, chumbo, cádmio, cromo, sulfetos, cloretos	
	Borracha	Beneficiamento de borracha natural e produção de borracha sintética	Selênio, hidrocarbonetos, cianetos	
	Couros e Peles	Preparação de Couros e Fabricação de Artefatos de Couro, Artigos de Viagem e Calçados; secagem, salga, curtimento e outras preparações de couros e peles, inclusive subprodutos	Cromo, níquel, cádmio, bário, cianeto, fluoretos, ácidos, óleos e graxas, sódio, corantes	
	Química	Fabricação e manuseio de produtos químicos, petroquímicos e agroquímicos. Recuperadoras de solventes e óleos	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos	
	Farmacêutica e Veterinária	Fabricação de medicamentos	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos	
	Perfumaria	Fabricação de produtos de perfumaria e cosméticos	Óleos e graxas, glicerina, chumbo zinco	
	Sabões e Detergentes	Fabricação de sabões, detergentes e domissanitários	Fluoretos, surfactantes	
	Têxtil	Beneficiamento e acabamento de fios e tecidos	Chumbo, cobre, cromo, cianetos, hidrocarbonetos, corantes	
	Alimentícia	Abatedouros, matadouros, frigoríficos	Alimentos e bebidas	Sódio
	Plástico	Fabricação de monômeros e polímeros	Fabricação de produtos plásticos	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos
Destilarias de açúcar e álcool	Fabricação de açúcar e produção de álcool	Ácidos e bases, potássio, nitrato, sulfato		

ANEXO 2

LISTA DE ATIVIDADES PONTUAIS POTENCIALMENTE POLUIDORAS CONSOLIDADA COM BASE EM CETESB (2001), SÃO PAULO (2002), CRH (2005) E FOSTER *ET AL.* (2006). (Continuação)

Tipo de atividade	Tipologia	Atividades	Principais contaminantes	
Disposição e tratamento de resíduos e efluentes	Aterro sanitário ou controlado	Disposição adequada ou controlada de resíduos domiciliares	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos; materiais orgânicos, bacteriológicos	
	Lixão e queima ao ar livre	Deposição de lixo a céu aberto, sem controle de origem do resíduo		
	Aterro industrial	Disposição de resíduos industriais		
	Incinerador	Unidades de queima de resíduos sólidos		
	Unidades de reciclagem	Reciclagem de resíduos sólidos, sucatas metálicas e não metálicas		
	ETE e ETA	Estações de tratamento de água e esgotos		
Comércio e Serviços	Cemitérios	Cemitérios	Nitrato, microbiológicos	
	Energia e gás	Produção e distribuição de energia elétrica de alta e baixa tensão e Gás	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos	
	Comércio de combustíveis	Postos revendedores	Bases de distribuição, TRR (transportadores revendedores retalhistas), postos de abastecimento	Amônia, solventes, hidrocarbonetos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos- PAH, asbestos
		Garagens e transportadoras		
	Oficinas de manutenção	Funilarias	Oficinas mecânicas	
		Lavanderia		
	Gráfica	Serviços de impressão em geral, excetuando serviços de computação gráfica e utilização de meios digitais	Chumbo, cádmio, cromo, solventes	

ANEXO 3

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS PONTUAIS QUANTO AO SEU POTENCIAL POLUIDOR DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.

Tipo de atividade	Tipologia	Classificação		
		Elevado	Moderado	Reduzido
Mineração	Minerais Metálicos	Extração e beneficiamento de minerais metálicos ferrosos e não ferrosos		
	Minerais Não Metálicos		Extração e beneficiamento de minerais não metálicos	
	Petróleo, Gás Natural, Carvão Mineral.	Extração de petróleo cru, gás natural, xisto, carvão, areias betuminosas, linhito, turfa, antracito, hulha.		
Indústria de transformação	Refino de Petróleo, Coque, Combustíveis Nucleares	Fabricação de: produtos do refino do petróleo (butano, GLP, metano, propano, gasolina, nafta, gás natural, querosene comum e de aviação); óleos (diesel, combustível, gasóleo); produtos aromáticos; ceras minerais; parafina; hexano vaselina; aguarrás; lubrificantes; asfalto; coque e alcatrão de petróleo; alcatrão e gás de hulha; combustíveis nucleares (urânio e tório).		
	Álcool			Usinas de álcool e açúcar
	Produtos Minerais Não Metálicos			Fabricação de canos, manilhas, ladrilhos, azulejos, tubos, conexões, mosaicos, pastilhas, artefatos de cré, material sanitário, porcelana, faiança e misturas betuminosas
	Material Refratário			Fabricação de materiais aluminosos, sílicos, sílico aluminosos, grafitosos, pós-exotérmicos e refratários
	Metalurgia Básica - Processamento de metais	Processamento de metais e fabricação de produtos de metal, em especial aqueles que manipulem ou gerem produtos, resíduos e efluentes perigosos em quantidade superior a 100 kg/dia ou 100 litros/dia	Produção de artefatos metálicos de serralheria	
	Máquinas e Equipamentos	Fabricação de máquinas, equipamentos e acessórios em geral		

ANEXO 3

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS PONTUAIS QUANTO AO SEU POTENCIAL POLUIDOR DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. (Continuação)

Tipo de atividade	Tipologia	Classificação		
		Elevado	Moderado	Reduzido
Indústria de transformação	Material Elétrico e Eletrônico	Fabricação de: materiais, equipamentos elétricos e eletrônicos; e acessórios em geral		
	Equipamentos de Transporte	Fabricação e montagem de veículos, construção e reparação de embarcações e aeronaves, incluindo peças e acessórios		
	Produtos de Madeira		Produção de madeira reconstituída, preservação e imunização da madeira	Fabricação de peças e artefatos de madeira
	Celulose e Papel		Fabricação de: celulose, pasta mecânica, polpa de madeira, papel, papelão e cartolina	Produção de embalagens de papel e papelão
	Borracha		Beneficiamento de borracha natural e produção de artefatos de borracha	
	Couros e Peles	Preparação de Couros, especialmente curtimento	Fabricação de Artefatos de Couro	
	Química	Fabricação e manuseio de produtos químicos, petroquímicos e agroquímicos. Recuperadoras de solventes e óleos	Fabricação de fertilizantes	
	Farmacêutica e Veterinária	Fabricação de medicamentos		
	Perfumaria		Fabricação de produtos de perfumaria e cosméticos	
	Sabões e Detergentes		Fabricação de sabões, detergentes e domossanitários	
	Têxtil		Beneficiamento e acabamento de fios e tecidos	
	Alimentícia			Alimentos e bebidas
	Plástico		Fabricação de monômeros e polímeros	Fabricação de artefatos plásticos
Resíduos e efluentes	Disposição e tratamento de resíduos e efluentes	Lixão, queima ao ar livre, aterro controlado, aterro industrial, aterro em vala, disposição de resíduos de origem desconhecida	Aterro sanitário com resíduo urbano ou aterro de resíduo inerte ou agroindustrial	
		Recuperação de óleo, solvente ou resíduos contendo produto químico ou perigoso	Reciclagem de sucatas metálicas e não metálicas, ETE, ETA	

ANEXO 3

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS PONTUAIS QUANTO AO SEU POTENCIAL POLUIDOR DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. (Continuação)

Tipo de atividade	Tipologia	Classificação		
		Elevado	Moderado	Reduzido
Comercio e Serviços	Cemitérios			Cemitérios
	Energia		Produção e distribuição de energia elétrica e gás	
	Comércio de combustíveis e produtos químicos	Depósito e comércio atacadista de combustíveis, produtos químicos	Postos revendedores (postos de combustíveis)	
	Terminais de carga, garagens e transportadoras		Garagens de veículos de transporte coletivo, transportadoras	
	Oficinas de manutenção		Oficinas mecânicas e funilarias	
	Lavanderia		Lavanderias a seco	
	Gráfica			Serviços de impressão em geral, excetuando serviços de computação gráfica e utilização de meios digitais

ANEXO 4

EXEMPLO DE PLANILHA PARA CADASTRO DAS FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO NO PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS.

Nº Poço:		Identificação do Poço:		Endereço:			Coordenadas UTM (m) e Datum:	
Zona de Proteção	Nº de identificação do empreendimento	Identificação e endereço do empreendimento	Pessoa de contato e telefone	Coordenadas UTM (m) e Datum	Distância do poço de abastecimento (m)	Ações a serem tomadas	Periodicidade / Prazo	
Perímetro Imediato de Proteção Sanitária *								
Perímetro de Alerta *								
Perímetro Intermediário								
Zona de Captura								

* Perímetros de proteção definidos no Decreto Estadual nº 32.955/91

ANEXO 5

MÉTODOS PARA DELIMITAÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇOS

1. RAIO FIXO ARBITRÁRIO (RFA)

Este é um método simplificado, arbitrário, que não utiliza uma equação ou dados numéricos da captação, do aquífero ou dos contaminantes potenciais para o cálculo do perímetro de proteção.

Fixa arbitrariamente um raio de proteção ao redor do poço, considerando questões operacionais e hidrogeológicas genéricas associado ao conhecimento tácito profissional (USEPA, 1987).

Um exemplo de aplicação deste método é o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, estabelecido pelo Decreto Estadual nº 32.955 de 07/02/1991.

2. RAIO FIXO CALCULADO (RFC)

Também consiste em um método simples, baseado na equação volumétrica de fluxo, utilizado para determinação de áreas circulares ao redor da captação, através da qual a água subterrânea transitará por determinado período de tempo (USEPA 1987, 1994).

Esta técnica considera um poço bombeando a uma vazão (Q) constante em aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, com espessura saturada (b) também constante e gradiente hidráulico zero, com fluxo horizontal radial ao poço. Este método calcula um cilindro cujo volume de água contido na matriz porosa corresponde à vazão bombeada em um determinado período de tempo. Assim, o raio (r) corresponde a uma isócrona de tempo de trânsito (t), ou seja, a partícula que entrar neste cilindro demorará, no máximo, o tempo t para chegar ao poço (Figura A). É melhor aplicado em meios porosos para pequenos tempos de trânsito onde as condições do aquífero próximo ao poço podem ser consideradas homogêneas e isotrópicas.

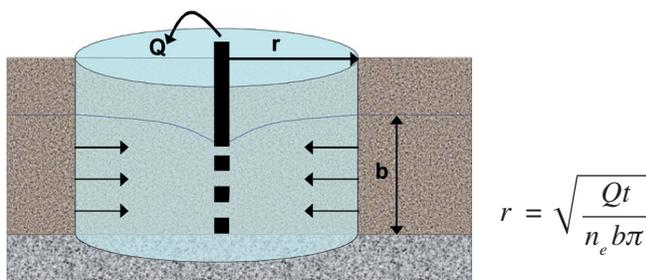


FIGURA A. Modelo de Raio fixo calculado.

Onde,

r = raio do perímetro de proteção (m)

Q = vazão de exploração (m³/dia)

t = tempo de trânsito (dias)

n_e = porosidade efetiva

b = espessura saturada (m)

3. MÉTODO WYSSLING

O método de Wyssling (Wyssling 1979) permite calcular a Zona de Contribuição e Zonas de Transporte considerando o conceito de fluxo natural uniforme do aquífero e de fluxo radial causado pelo bombeamento de um poço. Considera aquíferos homogêneos, confinados e poço com vazão de bombeamento inferior à taxa de descarga do aquífero, e por ser de fácil aplicação. É um método aplicado na Alemanha para a delimitação da zona de transporte de 50 dias (Strobl & Robillard, 2005). Merino & Navarrete (1991) e Navarrete & Garcia (2003) também descrevem o método de Wyssling como de fácil aplicação, em especial para pequenos tempos de trânsito e mencionam a aplicação deste método em alguns aquíferos na Espanha.

As equações são similares àsquelas do método de fluxo uniforme indicado por USEPA (1987, 1994, 2008).

O cálculo do limite da Zona de Contribuição pelo método de Wyssling considera que a direção do fluxo natural da água subterrânea coincide com o eixo x , conforme mostra a Figura B.

A largura máxima (B) (quando $x = \infty$), a largura na posição do poço (B') (quando $x = 0$) e a distância do poço até o limite da Zona de Contribuição a jusante do fluxo (X_o) são calculadas pelas equações abaixo.

O método de fluxo uniforme adotado por USEPA (1987, 1994 e 2008) também é baseado na solução da equação de fluxo.

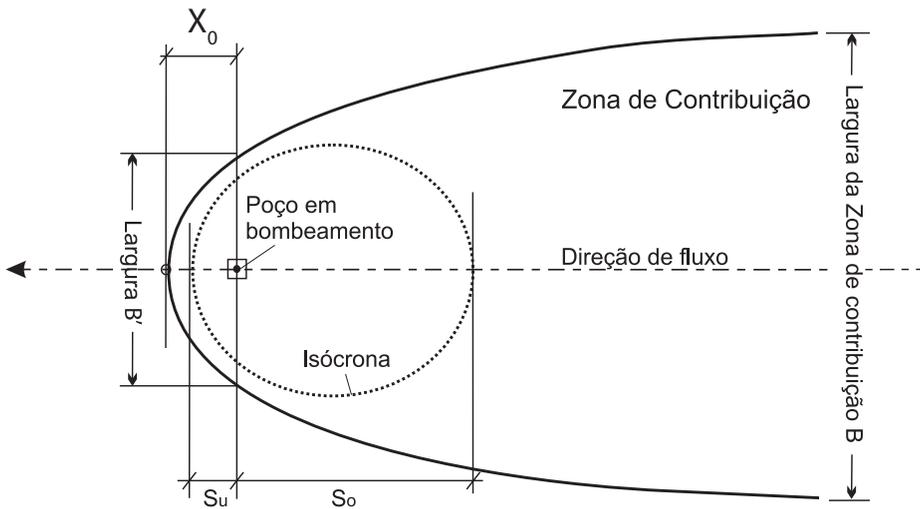


FIGURA B. Modelo de cálculo pelo método de Wyssling (Wyssling, 1979)

Largura máxima da Zona de Contribuição do poço: $B = \frac{Q}{Kbi}$

Distância do poço até o limite jusante da Zona de Contribuição:

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi kbi}$$

Onde,

B = largura da zona de contribuição a montante do poço

Q = vazão de exploração

K = condutividade hidráulica

b = espessura saturada do aquífero

i = gradiente hidráulico

X_0 = distância ao ponto de fluxo nulo a jusante do poço

e a largura da zona de contribuição na altura do poço: $B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2Kbi}$

Calcula-se a Velocidade real por: $V_e = \frac{K \cdot i}{n_e}$

e a distância linear (l) correspondente ao tempo t por: $l = V_e \cdot t$

Determina-se: $S_o = \frac{+l + \sqrt{l(l + 8X_0)}}{2}$ $S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l + 8X_0)}}{2}$

Onde,

S_o : distância correspondente ao tempo (t) no sentido do fluxo
(a montante da captação)

S_u : distância correspondente ao tempo (t) no sentido do fluxo
(a jusante da captação)

4. MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO

O mapeamento hidrogeológico é uma ferramenta que complementa os métodos mais simples de delimitação de áreas de proteção de poços e é a etapa inicial fundamental para aplicação de métodos mais complexos como a modelação matemática, seja analítica ou numérica. Em aquíferos cársticos e fraturados, o mapeamento hidrogeológico é uma ferramenta fundamental para a delimitação das áreas de proteção.

O objetivo do mapeamento hidrogeológico é conhecer o aquífero e entender a dinâmica da água subterrânea, identificando os elementos que afetam o fluxo e a recarga. A direção e as fronteiras de fluxo (barreiras hidráulicas e divisores de água), o gradiente hidráulico, a espessura e os parâmetros hidráulicos (condutividade hidráulica, porosidade efetiva e recarga) são elementos básicos a serem identificados no mapeamento hidrogeológico.

A Zona de Captura (ZC) de uma captação sempre obedecerá ao sentido de fluxo da água subterrânea e as barreiras hidráulicas existentes, sendo que as heterogeneidades dos parâmetros hidráulicos do aquífero condicionarão a direção e a velocidade deste fluxo.

O mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero permite identificar as áreas potencialmente mais suscetíveis à poluição e pode ser utilizado como um critério para delimitação de perímetros de proteção internos à ZC.

5. MODELO ANALÍTICO

Os modelos analíticos aplicam equações simplificadas para determinar a zona de captura e perímetros de proteção de poços e, por esta razão, não permitem considerar sistemas hidrogeológicos muito complexos e heterogêneos.

Em geral, são de fácil utilização e existem programas de domínio público disponíveis na internet. Um dos programas mais comuns é o WHAEM2000, desenvolvido pela USEPA, que aplica métodos simples como o de raio fixo calculado e métodos de modelação hidrogeológica, e permite considerar recarga, fronteiras hidráulicas e heterogeneidades. Este programa pode ser obtido em www.epa.gov/athens/software/whaem/index.html

6. MODELO NUMÉRICO

O uso de programas computacionais para o desenvolvimento de modelos matemáticos numéricos exige um conhecimento aprofundado do aquífero e de seu sistema de fluxo.

Estes programas discretizam a área de interesse em inúmeras células e resolvem as equações diferenciais de fluxo, para cada uma dessas células, através da aplicação de soluções aproximadas, ao contrário dos modelos analíticos que fornecem uma solução exata para as equações.

Devido a este princípio de solução, os modelos numéricos permitem considerar diferentes variações do aquífero ou do(s) poço(s) estudado(s), seja em área ou tempo, o que permite simular situações complexas e heterogêneas, e também determinar a ZC de vários poços em uma determinada área.

Em contrapartida, é necessário um conjunto maior de dados, inclusive de monitoramento, e um entendimento do modelo conceitual de fluxo da água subterrânea de forma a construir um modelo matemático confiável, que simule a situação real. Portanto, na modelação matemática, o mapeamento hidrogeológico é etapa inicial fundamental para se definir o modelo conceitual, assim como dados de monitoramento para calibração e validação do modelo matemático.

A Figura C ilustra as etapas necessárias para construção de um modelo matemático a partir do entendimento do modelo conceitual da área.

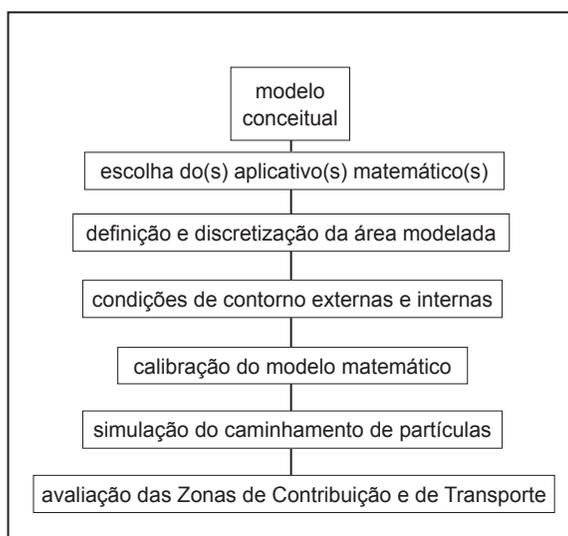


FIGURA C. Etapas de trabalho para a construção de um modelo matemático de fluxo da água subterrânea (Iritani 1999)

O uso de modelos matemáticos numéricos é recomendado em áreas complexas ou quando é necessária uma maior exatidão na

delimitação da ZC, uma vez que é uma metodologia mais custosa à medida que necessita de maior quantidade de dados e profissionais especializados para sua aplicação.

A discretização das células e a solução das equações podem utilizar os métodos de diferenças finitas ou de elementos finitos. Vários programas comerciais e de livre acesso estão disponíveis no mercado, como, por exemplo, o MODFLOW (diferenças finitas) e o FE-FLOW (elementos finitos), e permitem simular, tridimensionalmente, sistemas hidrogeológicos complexos.

ANEXO 6

CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS RADIAIS PARA O TEMPO DE TRÂNSITO DE 50 DIAS UTILIZANDO OS MÉTODOS DO RAIOS FIXO CALCULADO (USEPA, 1987) E DE WYSSLING (Wyssling, 1979) E OS PARÂMETROS MÉDIOS DOS AQUÍFEROS DO ESTADO DE SÃO PAULO (Baseado em DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005; Carvalho, 2007; Carvalho e Hirata, 2012).

TABELA A – Distâncias radiais calculadas para o tempo de trânsito de 50 dias aplicando o método do Raio Fixo Calculado (RFC).

Unidade Hidrogeológica	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /d)	b (m)	n _e	r (m)
Sistema Aquífero Cristalino	15	360	200	0,05	23,94
	50	1200	200	0,05	43,70
Aquífero Furnas	30	720	100	0,12	30,90
Sistema Aquífero Tubarão	40	960	350	0,1	20,89
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 metros de espessura de basalto)	40	960	150	0,15	26,06
	120	2880	150	0,15	45,14
Aquífero Serra Geral	30	720	150	0,08	30,90
	120	2880	150	0,08	61,80
Sistema Aquífero Bauru	20	480	120	0,12	23,03
	100	2400	120	0,12	51,50
Aquífero Taubaté	40	960	200	0,13	24,24
	120	2880	200	0,13	41,99
Aquífero São Paulo	20	480	100	0,1	27,64
	50	1200	100	0,1	43,70
Aquífero Litorâneo	15	360	75	0,08	30,90
Coberturas Cenozóicas	20	480	30	0,1	50,46

Obs: Q (vazão), b (espessura saturada), n_e (porosidade efetiva), r (raio calculado)

TABELA B – Distâncias radiais calculada para o tempo de trânsito de 50 dias aplicando o método de Wyssling

Unidade Hidrogeológica	Q (m ³ /h)	i	K (m/d)	b (m)	n _e	B (m)	B' (m)	X _o (m)	V _e (m/d)	I (m)	S _o (m)	S _u (m)
Sistema Aquífero Cristalino	15	0,04	0,3	200	0,05	150,0	75,0	23,9	0,24	12,0	30,7	18,7
	50	0,04	0,3	200	0,05	500,0	250,0	79,6	0,24	12,0	50,1	38,1
Aquífero Furnas	30	0,02	1,5	100	0,12	240,0	120,0	38,2	0,25	12,5	37,8	25,3
Sistema Aquífero Tubarão	40	0,04	0,3	350	0,1	228,6	114,3	36,4	0,12	6,0	24,1	18,1
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 metros de espessura de basalto)	40	0,01	2,5	150	0,15	256,0	128,0	40,7	0,17	8,3	30,6	22,2
	120	0,01	2,5	150	0,15	768,0	384,0	122,2	0,17	8,3	49,5	41,2
Aquífero Serra Geral	30	0,03	1,0	150	0,08	160,0	80,0	25,5	0,38	18,8	41,7	22,9
	120	0,03	1,0	150	0,08	640,0	320,0	101,9	0,38	18,8	71,9	53,1
Sistema Aquífero Bauru	20	0,02	1,5	120	0,12	133,3	66,7	21,2	0,25	12,5	30,1	17,6
	100	0,02	1,5	120	0,12	666,7	333,3	106,1	0,25	12,5	58,1	45,6
Aquífero Taubaté	40	0,02	1,5	200	0,13	160,0	80,0	25,5	0,23	11,5	30,7	19,1
	120	0,02	1,5	200	0,13	480,0	240,0	76,4	0,23	11,5	48,2	36,6
Aquífero São Paulo	20	0,03	1,0	100	0,1	160,0	80,0	25,5	0,30	15,0	36,1	21,1
	50	0,03	1,0	100	0,1	400,0	200,0	63,7	0,30	15,0	51,8	36,8
Aquífero Litorâneo	15	0,01	0,5	75	0,08	1920,0	960,0	305,6	0,03	1,6	31,7	30,1
Coberturas Cenozóicas	20	0,03	1,0	30	0,1	533,3	266,7	84,9	0,30	15,0	58,5	43,5

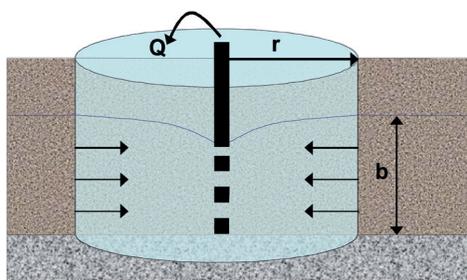
Obs: Q (vazão), i (gradiente hidráulico), K (condutividade hidráulica), b (espessura saturada), n_e (porosidade efetiva), B (largura da zona de captura), B' (largura da zona de captura na altura do poço), X_o (distância da zona de captura a jusante do poço), V_e (velocidade real da água), I (distância percorrida pela água em 50 dias), S_o (distância radial a montante do poço correspondente a um tempo de 50 dias), S_u (distância radial à jusante do poço correspondente a um tempo de 50 dias).

ANEXO 7

EXEMPLO DE CÁLCULO DO PERÍMETRO DE ALERTA PARA POÇOS DE ABASTECIMENTO LOCALIZADOS NA PORÇÃO AFLORANTE DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI, EM RIBEIRÃO PRETO-SP

A título de exemplo, foram calculados os raios para os tempos de trânsito de 50 dias utilizando os métodos do Raio Fixo Calculado (USEPA, 1987) e de Wyssling (Wyssling, 1979) para poços localizados na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. Com base nesses cálculos, é sugerido o raio para delimitação do Perímetro de Alerta.

1) MÉTODO DO RAO FIXO CALCULADO (RFC) (USEPA, 1987)



$$r = \sqrt{\frac{Qt}{n_e b \pi}}$$

Onde,

r = raio do perímetro de proteção (m)

Q = vazão de exploração (m³/dia)

t = tempo de trânsito (dias)

n_e = porosidade efetiva

b = espessura saturada (m)

TABELA A - Exemplo de cálculo do raio para tempo de trânsito de 50 dias utilizando o método do Raio Fixo Calculado

	P114	P134	P159	P167	P169	P173	P176	P181
Q (m³/h)	61	25	74	81	99	235	183	190
Q (m³/d)	1464	600	1776	1944	2376	5640	4392	4560
b (m)	135	230	242	370	227	242	262,2	211,5
n_e	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
t (dias)	50	50	50	50	50	50	50	50
r (m)	33,92	16,64	27,91	23,61	33,33	49,73	42,16	47,83

2) MÉTODO DE WYSSLING (WYSSLING, 1979)

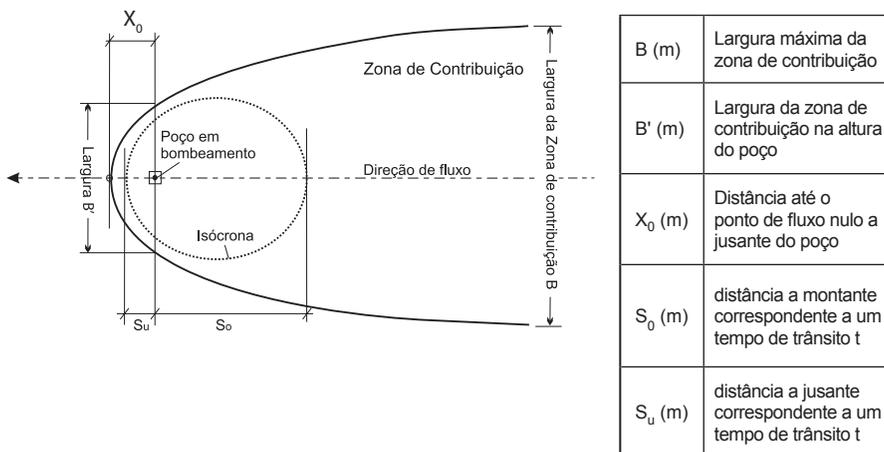


TABELA B - Exemplo de cálculo do raio para tempo de trânsito de 50 dias utilizando o método de Wyssling

	P114	P134	P159	P167	P169	P173	P176	P181
Q (m ³ /h)	61	25	74	81	99	235	183	190
Q (m ³ /d)	1464	600	1776	1944	2376	5640	4392	4560
i	0,020	0,020	0,022	0,025	0,019	0,022	0,012	0,025
K (m/d)	1	1	1	1	1	1	1	1
b (m)	135	230	242	370	227	242	262,2	211,5
n _e	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
B (m)	542,2	130,4	333,6	210,2	550,9	1059,4	1395,9	862,4
B' (m)	271,1	65,2	166,8	105,1	275,4	529,7	697,9	431,2
X ₀ (m)	86,3	20,8	53,1	33,4	87,7	168,6	222,2	137,3
V ₀ (m/d)	0,13	0,13	0,15	0,17	0,13	0,15	0,08	0,17
t (dias)	50	50	50	50	50	50	50	50
S ₀ (m)	37,4	20,3	31,8	28,1	36,6	53,5	44,2	52,2
S _u (m)	30,8	13,6	24,5	19,8	30,3	46,2	40,2	43,8

3) COMPARAÇÃO ENTRE OS RAIOS CALCULADOS PELOS MÉTODOS DE RFC E WYSSLING E A PROPOSIÇÃO DO RAIOS DO PERÍMETRO DE ALERTA

Os cálculos do raio para estabelecimento do Perímetro de Alerta devem ser feitos com os dados específicos do poço avaliado. A sugestão dos perímetros apresentada na Tabela 4 pode ser utilizada quando há impossibilidade de levantamento das informações específicas da captação.

Os raios calculados pelos dois métodos apresentam valores semelhantes. Entretanto, adotando o princípio da precaução, sugere-se adotar o maior valor.

TABELA C - Comparação dos raios calculados e proposição do Perímetro de Alerta

		Exemplos de poços considerados nas estimativas							
		P114	P134	P159	P167	P169	P173	P176	P181
Parâmetros adotados ou estimados	Q (m³/h)	61	25	74	81	99	235	183	190
	Q (m³/d)	1464	600	1776	1944	2376	5640	4392	4560
	i	0,020	0,020	0,022	0,025	0,019	0,022	0,012	0,025
	K (m/d)	1	1	1	1	1	1	1	1
	b (m)	135	230	242	370	227	242	262,2	211,5
	ne	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Raios calculados para o tempo de trânsito de 50 dias							
Método RFC	r (m)	33,9	16,6	27,9	23,6	33,3	49,7	42,2	47,8
Método de Wyssling	S _o (m)	37,4	20,3	31,8	28,1	36,6	53,5	44,2	52,2
	S _u (m)	30,8	13,6	24,5	19,8	30,3	46,2	40,2	43,8
Perímetro de Alerta (m)	Raios sugeridos para implantação do Perímetro de Alerta (m)								
		37	20	32	28	37	54	44	52

ctp, impressão e acabamento

imprensaoficial

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO



Secretaria do Meio Ambiente

