

Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo

Evaluation of methods for wellhead protection areas for the State of São Paulo

Ana Maciel de Carvalho¹ e Ricardo Hirata²

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Avenida Professor Almeida Prado 532, CEP 05508-901, São Paulo, SP, BR (ana.maciel.carvalho@usp.br)

²Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, BR (rhirata@usp.br)

Recebido em 20 de maio de 2011; aceito em 24 de janeiro de 2012

Resumo

Os perímetros de proteção de poços têm importante papel na proteção da qualidade da água subterrânea explorada para fins de abastecimento público. Existem vários métodos que permitem definir as dimensões e os formatos das zonas de contribuição, ou seja, a área em superfície onde toda recarga do aquífero é captada pelo poço, além de zonas baseadas em tempos de trânsito, definidas no tempo em que um determinado contaminante pode alcançar o poço. Ambas as zonas permitem o controle do uso do solo com o objetivo de proteger a captação. Este artigo apresentou um estudo comparativo entre três diferentes métodos aplicados nos diferentes aquíferos do Estado de São Paulo. Os métodos estudados foram: raio fixo calculado, baseado na técnica do cilindro, que usa equação de fluxo volumétrico; modelo analítico, com uso da equação de fluxo uniforme; e modelo numérico, por meio de modelos matemáticos de simulação de fluxo. Os resultados mostraram que cada método gerou áreas diferentes, tanto em formato como em dimensões. Os dois primeiros métodos definiram tamanhos de zonas de contribuição semelhantes, porém com formatos diferentes, e aproximadamente 200% maiores do que aqueles definidos com o numérico para as mesmas condições hidrogeológicas. Pelos resultados, depreende-se que a utilização do método analítico é viável numa primeira avaliação, pois os dados para tal já se encontram disponíveis para quase todos os poços de abastecimento público do Estado e sua acurácia é superior ao método raio fixo calculado. Já numa fase posterior, na qual a definição das zonas de contribuição seja mais sensível, o modelo numérico seria a alternativa natural.

Palavras-chave: Perímetro de proteção de poço; Zona de contribuição; Métodos analíticos; Método numérico; Gestão dos recursos hídricos subterrâneos; Estado de São Paulo.

Abstract

The wellhead protection areas play an important role in protecting the groundwater quality exploited by public water wells. There are some methods that allow to define dimensions and shape of contribution zones, that is, the area where the entire surface of the aquifer recharge is captured by well, besides zones based on time traffic, defined in time where a particular contaminant can reach the well. Both zones allow gradual control of land use. This paper has presented a comparative study between three different methods in different aquifers of the State of São Paulo. The methods include: calculated fixed radius, based on cylindrical volumetric flow equation; analytical model, using the equation of uniform flow; and numerical model, using mathematical models to simulate the flow. The results showed that each method generated different areas, both in the shapes and in the dimensions. The two first methods established contribution zones with similar sizes, but with different shapes and on average 200% bigger than the results from the numeric method, for the same hydrogeological conditions. From the results, it appears that the use of the analytical model is feasible as a first approximation, since the data for that are now available for almost all public wells in the state, and its accuracy is superior to the calculated fixed radius method. In a later stage, where the definition of the contribution zones is more sensitive, the numerical model would be the natural alternative.

Keywords: Wellhead protection area; Capture zone; Analytical model; Numerical model; Groundwater management; State of São Paulo.

INTRODUÇÃO

A água subterrânea é vulnerável à contaminação, dependendo das características naturais dos estratos de cobertura dos aquíferos. Essa vulnerabilidade, associada à intensa atividade antrópica, pode comprometer a qualidade das águas subterrâneas.

Em um estado, onde aproximadamente 80% dos municípios são, total ou parcialmente, abastecidos por fontes subterrâneas (CETESB, 2010), é fundamental, portanto, a proteção desses recursos hídricos para manter, principalmente, o abastecimento público.

Embora tal importância seja reconhecida, pouca ação tem sido colocada em prática para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos (Hirata et al., 2006; Hirata, Zobbi, Oliveira, 2010; Hirata, Foster e Oliveira, 2011; IPT, 2011) e, particularmente, de suas fontes de abastecimento (Iritani e Ezaki, 2010).

No Estado de São Paulo, uma avaliação crítica das ações ambientais, envolvendo a contaminação de solo e água subterrânea, tem mostrado atenção dirigida ao controle de suas atividades contaminantes pontuais, por meio de um programa para identificação de áreas contaminadas, avaliação de risco e remediação de aquíferos (CETESB, 2001). Entretanto, poucas têm sido as ações envolvendo a proteção do aquífero como um todo.

A proteção dos recursos hídricos subterrâneos (complementar ao acompanhamento de atividades contaminantes) deve ser baseada em uma lógica, na qual o controle da ocupação do solo e das atividades potencialmente contaminantes deva ser feito a partir de zoneamento do terreno, com uso de duas técnicas separadas: cartografia da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, voltada para a proteção do recurso hídrico subterrâneo, e perímetros de proteção de poços (PPP), voltados às fontes de captação de águas subterrâneas.

Ambas as técnicas se referem ao zoneamento do solo, pois, de acordo com Foster et al. (2006), seria pouco lógico tratar de proteger todas as áreas da mesma forma em virtude das pressões socioeconômicas para o desenvolvimento, sendo economicamente inviável restringir a ocupação de atividades potencialmente contaminantes no território de igual maneira. Assim, é necessário encontrar um equilíbrio entre a proteção adequada e suficiente do recurso com a atividade socioeconômica circundante.

De acordo com esse cenário, este artigo propõe a delimitação de PPP a partir das definições das zonas de contribuição (ZOC). As áreas definidas pelos PPP (Figura 1) são aquelas em que se controla a ocupação por atividades potencialmente contaminantes e visam proteger a água captada contra contaminações bacteriológica e química. Essa área é definida com base na ZOC. Assim, o PPP é um instrumento de gerenciamento administrativo do recurso em oposição ao conceito de ZOC, que é puramente técnico.

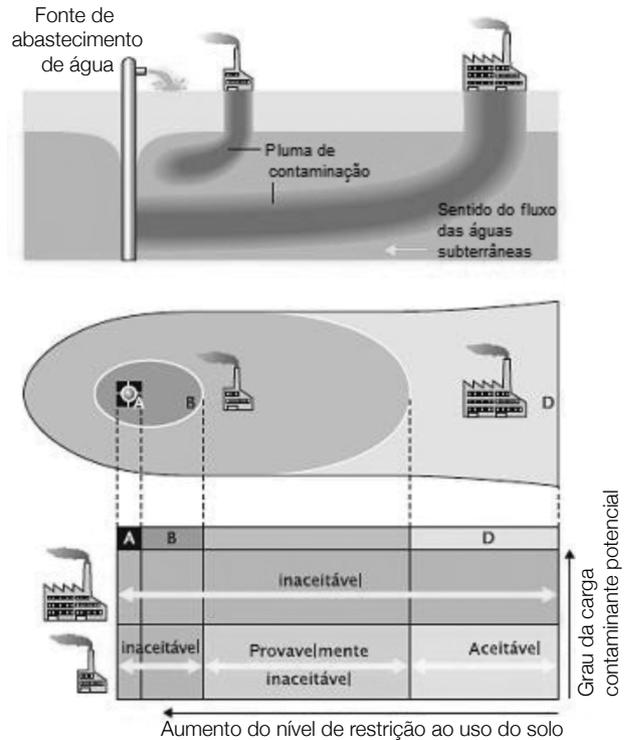


Figura 1. Conceito de áreas de proteção de fontes de água subterrânea com restrições no uso de território (Foster et al., 2006).

Áreas menores dentro da ZOC podem ser traçadas com base no tempo de trânsito (TT), pois há dificuldade em se restringir toda a ocupação antrópica no interior dos limites definidos para os PPP da mesma maneira (Figura 2).

As ZOC, portanto, são delimitadas de acordo com a degradação do contaminante com o tempo e também conforme a diluição do contaminante não degradável, levando-se em conta, entre outros fatores, as características do aquífero (Foster et al., 2006). Assim, as restrições ao uso da área seriam mais rígidas quanto mais próximas do poço de abastecimento.

Devido a inúmeros fatores, as concessionárias responsáveis pelos poços de abastecimento público paulistas não definiram nenhuma ZOC no Estado até o momento. Dessa forma, 80% dos núcleos urbanos paulistas, que utilizam de água subterrânea para abastecimento público, podem estar colocando em risco a população abastecida. Dentre os fatores, uma das grandes limitações na aplicação de PPP é o receio de que a área a ser protegida seja demasiadamente grande, restringindo-se a atividade econômica no município.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram: avaliar os métodos mais utilizados para a delimitação da ZOC – raio fixo calculado (RFC), modelo analítico (MA) e modelo numérico (MN) –, em aquíferos no Estado de São Paulo, e indicar de forma preliminar as dimensões das áreas de

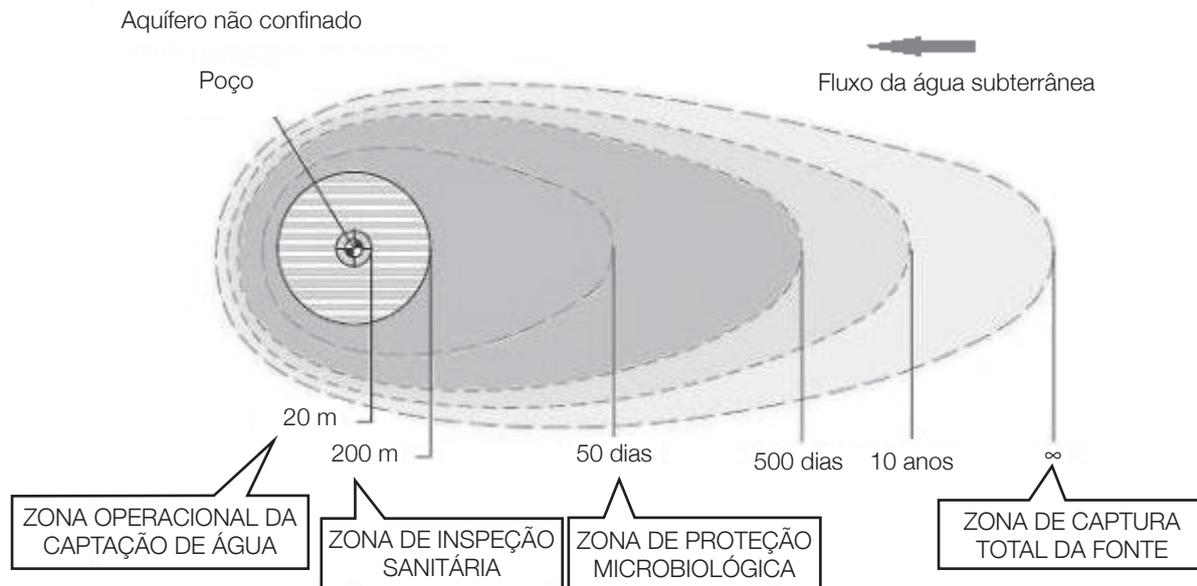


Figura 2. Zonas de captura de águas subterrâneas e perímetros baseados no tempo de trânsito ao redor de um poço (Foster et al., 2006).

captura e os possíveis impactos quanto à limitação de usos do solo nos municípios. Da mesma forma, estabelece-se uma avaliação das vantagens e desvantagens de cada método, os dados necessários para utilizá-los e os diferentes resultados gerados, verificando-se, assim, a factibilidade da aplicação de PPP no Estado de São Paulo.

Histórico de implementação dos programas de perímetros de proteção de poços (PPP)

As primeiras experiências do uso de programas de aplicação dos métodos de PPP ocorreram na década de 1930 em países europeus, embora as leis e regulamentações mais importantes datem dos anos 1950. Van Waegeningh (1985) compara diversas experiências europeias para delimitar os PPP, apresentando proibições aplicadas em diferentes zonas (Tabela 1).

De forma geral, as ZOC e os PPP são divididos em três ou quatro áreas menores. Na Zona I, somente atividades de suprimento de água são permitidas, nas quais suas dimensões variam de 10 a 50 m de distância radial em relação ao poço. Na Zona II, também conhecida como “zona de proteção bacteriológica”, restringem-se as construções urbanas e as atividades agrícolas, sendo suas dimensões entre 50 a 60 dias de TT ou, em alguns países, maiores que 100 m. A Zona III, e um pouco além desta, visa proteger contra contaminantes mais persistentes, havendo, portanto, restrições sobre certos tipos de indústrias, disposição, armazenamento e transporte de produtos químicos. Para muitos países, esta zona representa a área de recarga da captação

de água subterrânea do poço e suas dimensões variam a partir de 2 km ou a partir de TT para 5, 10, 25 ou 100 anos.

Os resultados obtidos após a definição de PPP há décadas em alguns países (Alemanha, França, Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos e Austrália, entre muitos outros) indicam que essa estratégia é eficaz para a proteção adequada nas captações públicas (Navarrete e García, 2003). O PPP para abastecimento público é uma recomendação contemplada na Diretiva Marco da Água (DMA) da União Europeia (2000).

Na Alemanha, a somatória de áreas delimitadas para PPP representa 20% da extensão do país (Vorreyer, 1998). No Reino Unido, têm sido efetivamente implementadas mais de 1.500 áreas de proteção de poços (Environment Agency, 1998). Já na Espanha, os perímetros são propostos nos Planos Hidrológicos de Bacias desde 1985, mas a implantação ainda é restrita devido às imprecisões da lei, aos conflitos entre as competências estaduais, autônomas e locais (Navarrete; García, 2003).

Nos Estados Unidos, até a década de 1980, inexistia uma lei que se referisse diretamente à proteção de poços que abasteciam os municípios. Havia leis como o *Clean Water Act* (CWA), de 1972, para o estabelecimento, pelo *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), de métodos de controle e análises de substâncias tóxicas em água de rejeitos. Em 1976, com a aprovação do *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), estabeleceu-se uma legislação para proteção do solo. O RCRA regula os procedimentos para armazenamento, transporte, tratamento e eliminação de

Tabela 1. Resumo dos perímetros de proteção de poços em vários países europeus.

País	Perímetros de proteção de poços				Fonte
ex-Alemanha Ocidental	Zona I (10 m)	Zona II (50 dias)	Zona IIIA (2 km)	Zona IIIB	Van Waegeningh (1984)
ex-Alemanha Oriental	Zona I (6 a 10 m)	Zona II (60 dias)	Zona IIIA (10 anos)	Zona IIIB (25 anos)	
Alemanha	Zona I (20 m)	Zona II (50 dias)	Zona IIIA (2 km)	Zona IIIB (Zona de Captura)	Navarrete e García (2003)
Suíça	Zona I (10 a 20 m)	Zona II (≥ 10 dias ou ≥ 100 m)	Zona IIIA (≥ 200 m)	Zona IIIB	Van Waegeningh (1985)
Holanda	Área de captação (50 a 60 dias ou 30 a 150 m)	Zona de proteção (10 anos ou 800 m)	Zona de proteção (25 anos ou 1200 m)	-	Van Waegeningh (1986)
	Área de captação (50 ou 60 dias)	Área de proteção I (10 anos)	Área de Proteção II (25 anos)	Área de Recarga (50 a 100 anos)	Navarrete e García (2003)
França	Perímetro de proteção imediato (10 a 20 m)	Perímetro de proteção intermediário (100 dias ou 200 a 500 m)	Perímetro de Proteção Afastado (1 a 2 km)	-	Van Waegeningh (1985)
	Perímetro imediato (10 a 20 m)	Perímetro próximo (1 a 10 ha ou 50 dias)	Perímetro Afastado (0,2 a 15 km ou critério técnico)	-	Navarrete e García (2003)
Áustria	Área de proteção imediata	Área de proteção (50 dias)	Área de Proteção Parcial	-	Van Waegeningh (1985)
Bélgica	Área de proteção imediata (24 h ou 100 m)	Área de proteção intermediária (50 dias ou 300 a 1000 m)	Área de Proteção Remota	-	
Finlândia	Área imediata	Zona de proteção interna (60 dias)	Zona de Proteção Externa	-	
ex-Tchecoslováquia	Zona primária de proteção sanitária (10 a 50 m)	Zona secundária interna de proteção sanitária	Zona Secundária Externa de Proteção Sanitária	-	
Suécia	Área do poço	Área d	Área de Proteção Externa	-	
Hungria	Zona de proteção (50 dias ou 10 m)	Área de proteção hidrogeológica (25 a 100 anos ou 300 m)	-	-	
Reino Unido	Área de proteção imediata (10 a 50 m)	-	-	-	Van Waegeningh (1985)
	Zona I – proteção interior (50 m ou 50 dias)	Zona II – Proteção exterior (25% da ZOC ou 400 dias)	Zona III – ZOC	Zona Z de Proteção Especial (Área fora da ZOC mas que pode transmitir contaminação)	Navarrete e García (2003)
Itália	Zona de proteção absoluta (10 m)	Zona de respeito (200 m)	Zona de Proteção (Zona de Captura e da Bacia)	-	Navarrete e García (2003)
Espanha	Zona imediata de restrição absoluta (100 a 400 m ² ou 1 dia)	Zona próxima ou de restrição máxima (50 dias)	Zona Remota ou de Restrições Moderadas (Vários anos, depende de critérios hidrogeológicos)	-	Merino e Navarrete (1991)
Dinamarca	Área de proteção física (10 m)	Área de proteção higiênica (300 m)	-	-	Navarrete e García (2003)

resíduos perigosos de forma a impedir a lixiviação de contaminantes nas águas subterrâneas. Em 1980, o Congresso norte-americano aprovou o *Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act* (CERCLA), também conhecido como *Superfund*, com a finalidade de remediar áreas contaminadas incluídas no *National Priority List* (NPL) (USEPA, 1994).

Com o incentivo dos países europeus, os Estados Unidos criaram um programa de proteção de poços em 1986, quando foi aprovada uma emenda ao *Safe Drinking Water Act* (SDWA), de 1974. Este estabeleceu programas nacionais de prevenção da contaminação das águas subterrâneas de abastecimento público, o *Wellhead Protection Program* (WPP) e o *Sole Source Aquifer Demonstration Program* (SSADP).

A USEPA foi requerida para subsidiar tecnicamente os diferentes órgãos dos poderes público municipal e estadual para a definição de tais programas. Em 1987, a USEPA publicou o *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas* (WHPA), estabelecendo as bases técnicas e os métodos disponíveis para a aplicação de PPP.

O WPP definiu zonas diferentes, valores e parâmetros limites a serem respeitados, exigindo, para cada Estado, que fossem apresentados seus próprios programas de PPP para assegurar a saúde pública. A implantação destes programas está condicionada à prévia avaliação e aprovação.

Aproximadamente 50% da população dos Estados Unidos utiliza água subterrânea para diversos fins. Devido a essa importância, sabe-se que mais de 24 estados têm aprovado pela USEPA algum tipo de lei para proteger as águas subterrâneas (Bhatt, 1993). No manual produzido pela USEPA (1994) encontram-se alguns estudos de caso, informando os métodos de delimitação e o planejamento para elaboração do PPP.

Segundo Hirata (1992), o Estado da Califórnia teve maiores dificuldades para apresentar um programa de proteção, pois possui ambiente geológico muito complexo e muitas agências responsáveis por problemas de poluição da água, dificultando a obtenção de um consenso. Outros estados, como Massachusetts, encontraram maior facilidade.

O Departamento de Regulamentação Ambiental da Flórida, por exemplo, utiliza a equação de fluxo volumétrico (RFC) e o critério de TT de cinco anos para definir a Zona II do PPP. Em Palm Beach, Flórida, aproximadamente 80% do abastecimento de água potável é oriundo da água subterrânea. O MN, definido em MODFLOW, da *United States Geological Survey* (USGS), foi usado para definir quatro zonas, periodicamente revisadas, em torno de cada captação de água. Essas foram delimitadas, utilizando-se, para as zonas 1, 2 e 3, respectivamente, um TT de 30 e 120 dias e uma área entre a isócrona de 210 e 500 dias. A zona 4 refere-se à área mais externa, ou seja, toda a ZOC (USEPA, 1994).

Em Rockford, Illinois, a principal fonte de abastecimento de água é a subterrânea. Algumas áreas dessa região foram citadas no NPL da USEPA para remediar a contaminação. O método de delimitação usado para proteger a fonte de abastecimento foi o MN (códigos PLASM e GWPATH), para delinear as ZOC e avaliar a interação do poço e da atividade nelas (USEPA, 1994).

Em Nova Jersey, em 2003, o Serviço Geológico de Nova Jersey desenvolveu diretrizes para a delimitação de áreas para proteção de poço. O documento identificou três zonas de proteção para os poços, com base no tempo de deslocamento da água para o poço de 2, 5 e 12 anos, respectivamente, para as zonas 1, 2 e 3 (USEPA, 1994).

Em Clinton, Nova Jersey, o método de delimitação para proteger a fonte de abastecimento é o detalhamento geológico, informando a população sobre a importância das águas subterrâneas (USEPA, 1994).

Em Nantucket Island, Massachusetts, o método de delimitação para proteger a fonte de abastecimento é a equação de não equilíbrio de Theis e raio fixo arbitrário. Mapas potenciométricos dos aquíferos locais são usados para identificar áreas de recarga na ilha (USEPA, 1994).

Na Bacia de Tucson, Arizona, o *Pima Association of Governments* (PAG) avaliou várias estratégias de WHPA, baseadas na informação hidrogeológica e de uso do solo, concluindo-se que as técnicas do raio fixo arbitrário e de critério de TT são ineficientes. Assim, o PAG desenvolveu uma estratégia de delimitação regional para PPP baseada no mapeamento de vulnerabilidade com fatores hidrogeológicos (USEPA, 1994).

Segundo a USEPA (1987), a participação dos níveis de governo é necessária para que os programas de proteção tenham sucesso nos Estados Unidos. O Governo Federal tem a obrigação de aprovar os programas estaduais e apoiar tecnicamente os governos estaduais e locais. Os governos estaduais têm a obrigação de desenvolver e pôr em prática programas de proteção de poços que obedeçam ao SDWA. Os governos locais realizam o controle sobre o uso do terreno de acordo com as leis estaduais.

No Brasil, no Estado de São Paulo, a Lei n. 6.134/88 (São Paulo, 1998) dispõe sobre a preservação e conservação das águas subterrâneas, a fiscalização de sua exploração e a manutenção de seus equilíbrios físico, químico e biológico, além de estabelecer as “áreas de proteção”, consistindo na delimitação de áreas em que é possível controlar as atividades antrópicas para promover a proteção dos corpos de águas subterrâneas. O Decreto n. 32.955/91 (São Paulo, 1991), que regulamenta essa Lei, classifica, no Capítulo III, as áreas de proteção em três níveis: proteção máxima – compreendendo zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituem em reservatórios de águas essenciais para o abastecimento público; restrição e controle – controle máximo das fontes

poluidoras implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras; proteção de poços e outras captações – incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção, no qual é instituído o PPP em perímetro imediato de proteção sanitária (PIPS), que abrange um raio de 10 m, a partir do ponto de captação, cercado e protegido com telas, e perímetro de alerta contra poluição (PAP), estabelecido pela simulação de uma zona de captura de partículas com até 50 dias de trânsito.

Embora no Estado de São Paulo não existam aplicações de PPP, já foram definidas ZOC para os municípios de Caçapava e São José dos Campos. A aplicação da modelação matemática no município de Caçapava permitiu identificar as ZOC dos poços de abastecimento, sendo adotados TT de 10 e 50 anos (Iritani, 1998). Hirata (1994) aplicou a modelação matemática bidimensional em São José dos Campos e obteve áreas de até 240 m² para TT de um ano.

Iritani e Ezaki (2010) propuseram os raios de delimitação do PAP para os principais aquíferos do Estado de São Paulo (Tabela 2). Esses valores foram definidos utilizando os métodos RFC e de Wyssling (Wyssling, 1979).

Verifica-se que, no Estado de São Paulo, não existe fiscalização adequada para a aplicação da legislação de modo rigoroso e correto. A implementação dos PPP no Estado está relacionada à necessidade de uma articulação dos órgãos municipais e à necessária conscientização por parte do

poder político, das Prefeituras e das Câmaras de Vereadores, articuladas com os órgãos estaduais de gestão dos recursos hídricos, proteção ambiental e vigilância sanitária.

Cenário hidrogeológico típico do Estado de São Paulo

O Estado de São Paulo ocupa uma área de 248.209,426 km² (IBGE, 2005), cujo relevo foi fortemente influenciado pela Geologia e pelo clima da região. O arcabouço geológico impõe também a forma de ocorrência das águas subterrâneas em dois grupos: as de porosidade primária, representadas pelos aquíferos sedimentares, quais sejam, Furnas, Itararé, Aquidauana, Passa Dois, Botucatu, Piramboia, Santo Anastácio, Caiuá, Marília, Adamantina, São Paulo, Litorâneo, Taubaté e coberturas cenozoicas indiferenciadas; e os aquíferos de porosidade secundária, representados pelos fraturados Serra Geral e Cristalino (Rocha, 2005). Esses aquíferos são classificados em sistemas aquíferos, conforme ilustrado na Figura 3 e na Tabela 3.

O Sistema Aquífero Cristalino, constituído pelo embasamento pré-cambriano, ocorre no Planalto Atlântico. Neste, encaixam-se duas bacias sedimentares de idade terciária, que ocupam pequenas extensões do território paulista, a de São Paulo contida inteiramente na metrópole homônima e a de Taubaté (Almeida et al., 1981).

Tabela 2. Distâncias radiais propostas para delimitação de perímetro de alerta para os aquíferos do Estado de São Paulo (Iritani e Ezaki, 2010).

Unidade hidrogeológica	Vazão do poço	Distância radial (R) proposta (m)
Aquífero Furnas	-	40
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 m de espessura de basalto)	Até 40 m ³ /h Acima de 40 m ³ /h	30 50
Sistema Aquífero Bauru	Até 20 m ³ /h Acima de 20 m ³ /h	30 60
Aquífero Taubaté	Até 40 m ³ /h Acima de 40 m ³ /h	30 50
Aquífero São Paulo	Até 20 m ³ /h Acima de 20 m ³ /h	30 50
Aquífero Litorâneo	-	30
Coberturas Cenozoicas	-	60
Sistema Aquífero Serra Geral e Diabásio	Até 30 m ³ /h Acima de 30 m ³ /h	40 70
Sistema Aquífero Cristalino	Até 15 m ³ /h Acima de 15 m ³ /h	30 50
Sistema Aquífero Cárstico	-	100
Sistema Aquífero Tubarão	-	25

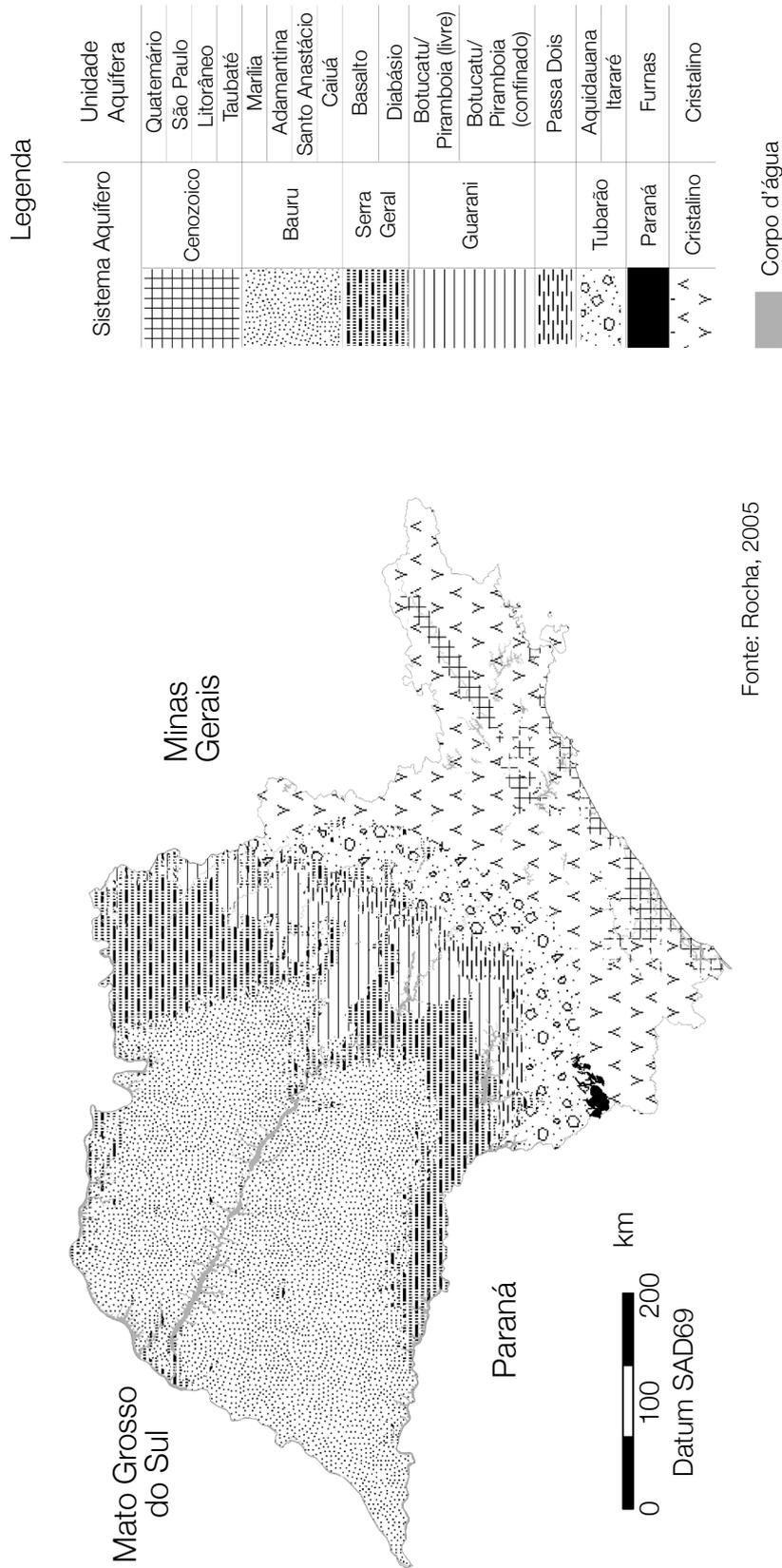


Figura 3. Sistemas Aquíferos do Estado de São Paulo (modificado de CRH, 1999).

Tabela 3. Parâmetros hidrogeológicos dos aquíferos do Estado de São Paulo.

Sistema aquífero	Aquífero	Descrição	Área (km ²)	Propriedades hidrogeológicas						
				Q (m ³ /h)	n (%)	b (m)	k (m/d)	i	n _{ef} (%)	Recarga (mm/ano)
Cenozoico	Coberturas cenozoicas	Extensão limitada, granular, livre, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	-	15,5	0,15	30	1	0,03	0,1	-
	Litorâneo	Descontínuo, livre, heterogêneo, anisotrópico	4600	11,5	0,15	75	0,5	0,005	0,08	220
	São Paulo	Extensão limitada, granular, livre, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	3600	12	0,15	100	1	0,03	0,1	350
	Taubaté	Extensão limitada, granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	2200	107,5	0,12	200	1,5	0,02	0,13	350
Bauru	Marília	Extensão regional, granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	15000	7,5	0,13	120	1	0,04	0,1	250
	Adamantina	Extensão regional, granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	104000	19	0,15	130	1,5	0,03	0,1	250
	Santo Anastácio	Extensão limitada, granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	67000	35	0,25	80	2	0,02	0,12	250
	Caiuá	Extensão limitada, granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	13000	100	0,2	100	2,5	0,01	0,15	350
Serra Geral	Serra Geral	Extensão regional, fraturado, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	32000	37,5	0,08	150	1	0,03	0,08	150
Guarani	Botucatu / Piramboia (livre)	Extensão regional, granular, livre a confinado, contínuo, homogêneo, isotrópico	16000	55	0,2	150	2,5	0,01	0,15	350
	Botucatu / Piramboia (confinado)	Extensão regional, granular, livre a confinado, contínuo, homogêneo, isotrópico	136800	325	0,2	350	2,5	0,0005	0,15	-
Aquitarde Passa Dois	Passa Dois	Extensão regional, granular, livre a confinado, heterogêneo, anisotrópico (regionalmente é um aquitarde)	6900	6,5	0,1	120	0,01	0,03	0,05	100
Tubarão	Aquidauana / Itararé	Extensão regional, granular (localmente fraturado), livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	20700	16,5	0,15	350	0,3	0,04	0,1	200
Paraná	Furnas	Extensão limitada, granular, livre a confinado, contínuo, homogêneo	500	30	0,2	100	1,5	0,02	0,12	250
Cristalino	Cristalino	Extensão regional, fraturado, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico	53400	17,5	0,15	200	0,3	0,04	0,05	150

Q: vazão média por poço; n: porosidade total; b: espessura saturada; k: condutividade hidráulica; i: gradiente hidráulico; n_{ef}: porosidade efetiva.

Os sistemas aquíferos sedimentares do Mesozoico e do Paleozoico ocupam mais da metade da área paulista e pertencem à Bacia Sedimentar do Paraná, constituindo seu flanco Nordeste. Na Era Paleozoica, depositaram-se extensos pacotes sedimentares em ambiente predominante marinho, sendo representado pelas formações Furnas, Itararé,

Aquidauana e Passa Dois (Rocha, 2005). A Formação Passa Dois é considerada um aquitarde, devido às baixas permeabilidades das rochas. No Triássico ocorreu uma regressão marinha e o clima tornou-se desértico, tendo sido depositados arenitos eólicos das formações Piramboia e Botucatu. As porções de afloramento dessas formações

ocorrem na Depressão Periférica e constituem o Sistema Aquífero Guarani (Hirata et al., 2011).

No início do Cretáceo, quando ainda prevaleciam condições desérticas, a Bacia do Paraná foi afetada por intenso vulcanismo, que veio a se constituir na Formação Serra Geral (Milani, 2004). O Sistema Aquífero Serra Geral localiza-se em superfície, em regiões mais rebaixadas, denominadas *Cuestas* Basálticas (IPT, 1981). A Formação Serra Geral confinou, assim, grande parte do Sistema Aquífero Guarani. Devido a suas características de confinamento, este trabalho não avaliou a ZOC para aquíferos confinados, apenas para os livres.

Durante o Neocretáceo, em clima semiárido, depositaram-se sobre os basaltos sequências de arenitos calcíferos do Grupo Bauru, constituindo o Sistema Aquífero Bauru, que se estende pelo Planalto Ocidental (Rocha, 2005).

O Aquífero Litorâneo, de idade quaternária, é representado pelos sedimentos das planícies costeiras existentes, principalmente no litoral sul do estado (Rocha, 2005).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o delineamento das ZOC, referente aos aquíferos não confinados do Estado de São Paulo, foram estabelecidas, principalmente: a caracterização dos cenários hidrogeológicos típicos, considerando as informações de mapeamentos hidrogeológicos; as descrições dos aquíferos e as informações sobre os poços tubulares (vazões explotadas e interpretação de ensaios de bombeamentos).

Além disso, o conjunto de dados bibliográficos, incluindo as cartografias geológicas e geomorfológicas, permitiu estabelecer os modelos conceituais de circulação geral dos aquíferos paulistas. Adicionalmente, analisaram-se estudos de casos e aplicações de PPP em outros países,

permitindo-se uma análise das estratégias de implementação em diferentes realidades hidrogeológicas.

Avaliadas essas condições e analisando-se a adequação ao cenário paulista, foram considerados para o traçado das ZOC os métodos RFC, MA e MN. Os resultados permitiram avaliação das áreas geradas por diferentes métodos e a exequibilidade destas à realidade paulista.

Método raio fixo calculado (RFC)

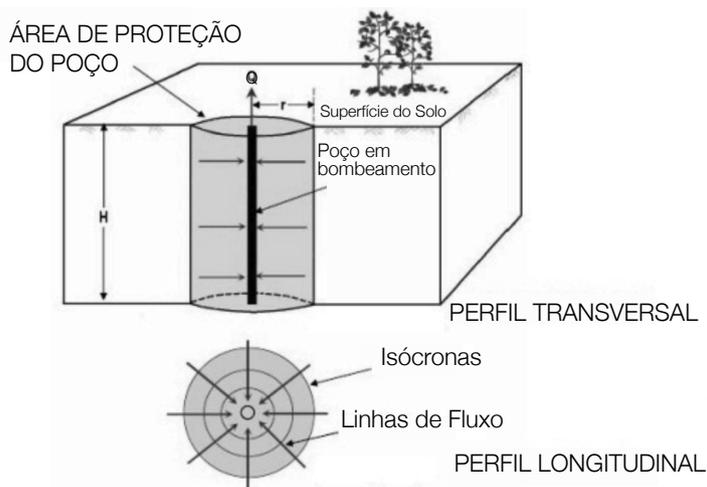
Baseia-se em uma abordagem geométrica, definindo-se uma área circular ao redor do poço, cujo raio é estabelecido por uma equação analítica de fluxo volumétrico (Figura 4). Esse raio é calculado com base no TT, escolhido como limite de critério, em função das taxas diárias de bombeamento, porosidade efetiva e espessura saturada do aquífero (USEPA, 1994).

Apesar da fácil aplicação, o método não considera as condições de heterogeneidade, anisotropia, recarga, fluxo do aquífero e particularidades dos contornos de fluxo. O RFC define uma ZOC que corresponde a uma realidade muito simplificada, comprometendo sua eficácia na proteção de áreas importantes que contribuem para a captação. Por outro lado, pode proteger outras áreas que não tenham relação com o poço.

A utilização do método RFC se constitui como alternativa quando não há disponibilidade de tempo e insuficiência de dados para se utilizar outros métodos, ou quando se analisa TT bastante reduzidos (menores que 50 dias).

Método modelo analítico (MA)

Dentre os MA, a equação de fluxo uniforme é a mais usada, devido à facilidade de sua aplicação, rapidez para gerar



$$R = \sqrt{\frac{Qt}{\pi H n_{ef}}}$$

Onde:

R = Raio Fixo Calculado

t = Tempo de Trânsito

Q = Taxa de Bombeamento

H = Espessura da Zona Saturada do aquífero

n_{ef} = Porosidade Efetiva

Figura 4. Delineação do perímetro de proteção de poço utilizando o método do raio fixo calculado (adaptado de USEPA, 1994).

o resultado, além de definir a ZOC de um poço bombeando em condições de superfície potenciométrica inclinada. Outra vantagem é que tal método requer poucas informações, entretanto, requer maior experiência do técnico nos aquíferos da área para que tais zonas reflitam as realidades do aquífero.

Na equação de fluxo uniforme, a distância é definida na direção “X” do fluxo da água subterrânea, a jusante do poço, em que se encontra o ponto nulo ou de estagnação (divisor de águas formado pelo cone de depressão) e, também, na direção “Y”, representando a largura máxima da ZOC, a montante da captação (USEPA, 1994), como pode ser observado na Figura 5.

Este método, portanto, é mais confiável que o anterior. No entanto, assim como o anterior, o MA considera um aquífero homogêneo e isotrópico, podendo haver erros devido à simplicidade do modelo conceitual e por estar limitado a problemas bidimensionais, além de não considerar a recarga do aquífero, particularidades de contornos de fluxo ou mesmo transiência na exploração.

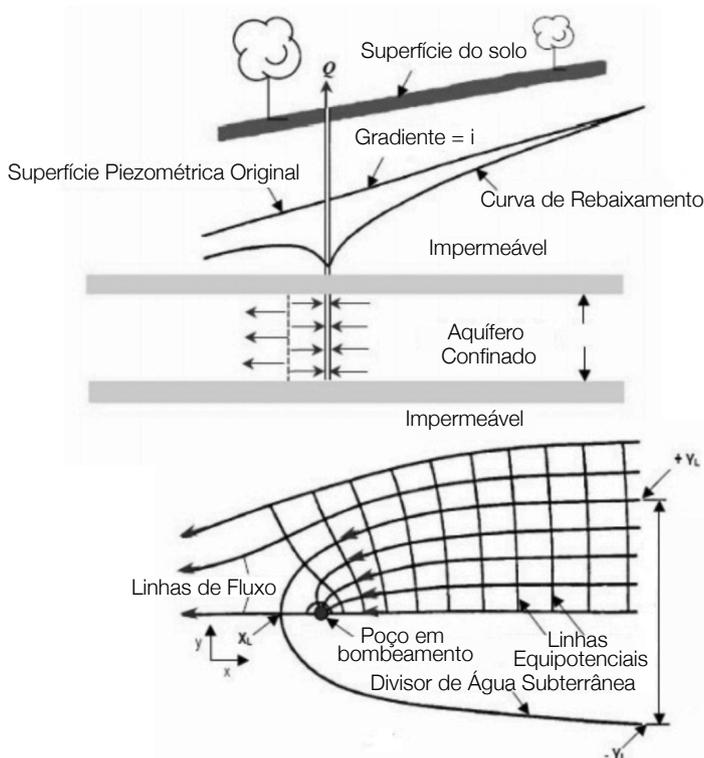
Método modelo numérico (MN)

Baseia-se em modelos matemáticos de simulação processados em computadores, fazendo uso de equações de fluxo

e/ou transporte de massa, com soluções numéricas (Iritani, 1998). Apesar de ser um método que tende a requerer mais recursos humanos e financeiros para a utilização e demandar uma grande quantidade de dados e de pessoal capacitado, é o único que pode descrever adequadamente os aquíferos heterogêneos, com contornos de fluxo (rio, zonas de descarga, recarga e evapotranspiração) e condições de transiência na exploração, delimitando-se um PPP mais acurado (Tabela 4).

Assim, o modelo numérico permite entender, tridimensionalmente, a dinâmica dos sistemas complexos de fluxos de água subterrânea, e tenta representar o comportamento do sistema físico real da água subterrânea, gerando resultados que oferecem maior acuidade e precisão para a delimitação da ZOC. Além disso, o MN pode ser utilizado em qualquer meio hidrogeológico, inclusive nos fraturados. Para sua aplicação, existem vários modelos disponíveis no mercado, que podem ser utilizados em variadas situações.

Neste trabalho, os modelos foram construídos e executados por meio do software *Visual MODFLOW* (Guiguer; Franz, 1996), na versão 2.8.2. Este programa resolve a equação de fluxo da água subterrânea por intermédio do método de diferenças finitas. Além disso, o programa possibilita o desenvolvimento de estudos futuros envolvendo



$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2\pi.k.b.i}{Q}.Y\right)$$

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi.k.b.i}$$

$$Y_L = \pm \frac{Q}{2.k.b.i}$$

Onde:

X, Y = coordenadas

Q = vazão de extração (m³/dia)

k = condutividade hidráulica (m/dia)

b = espessura saturada (m)

i = gradiente hidráulico

Figura 5. Delineação do perímetro de proteção de poço usando o método analítico, obtido com a aplicação do modelo analítico de fluxo uniforme (adaptado de USEPA, 1994).

transporte de contaminantes na área, a partir dos resultados apresentados, usando o aplicativo MT3D (Anderson e Woessner, 1992).

As ZOC para os aquíferos do Estado de São Paulo foram definidas a partir do seguimento de partícula (*particle tracking*), localizando os caminhos que a água/contaminante seguem para atingir o poço. A partir do cálculo do TT, é possível estabelecer zonas de transporte (ZT) específicas.

A Figura 6 ilustra os resultados obtidos com a delimitação da ZOC de um poço, semelhante para todos os aquíferos, gerados pelo modelo.

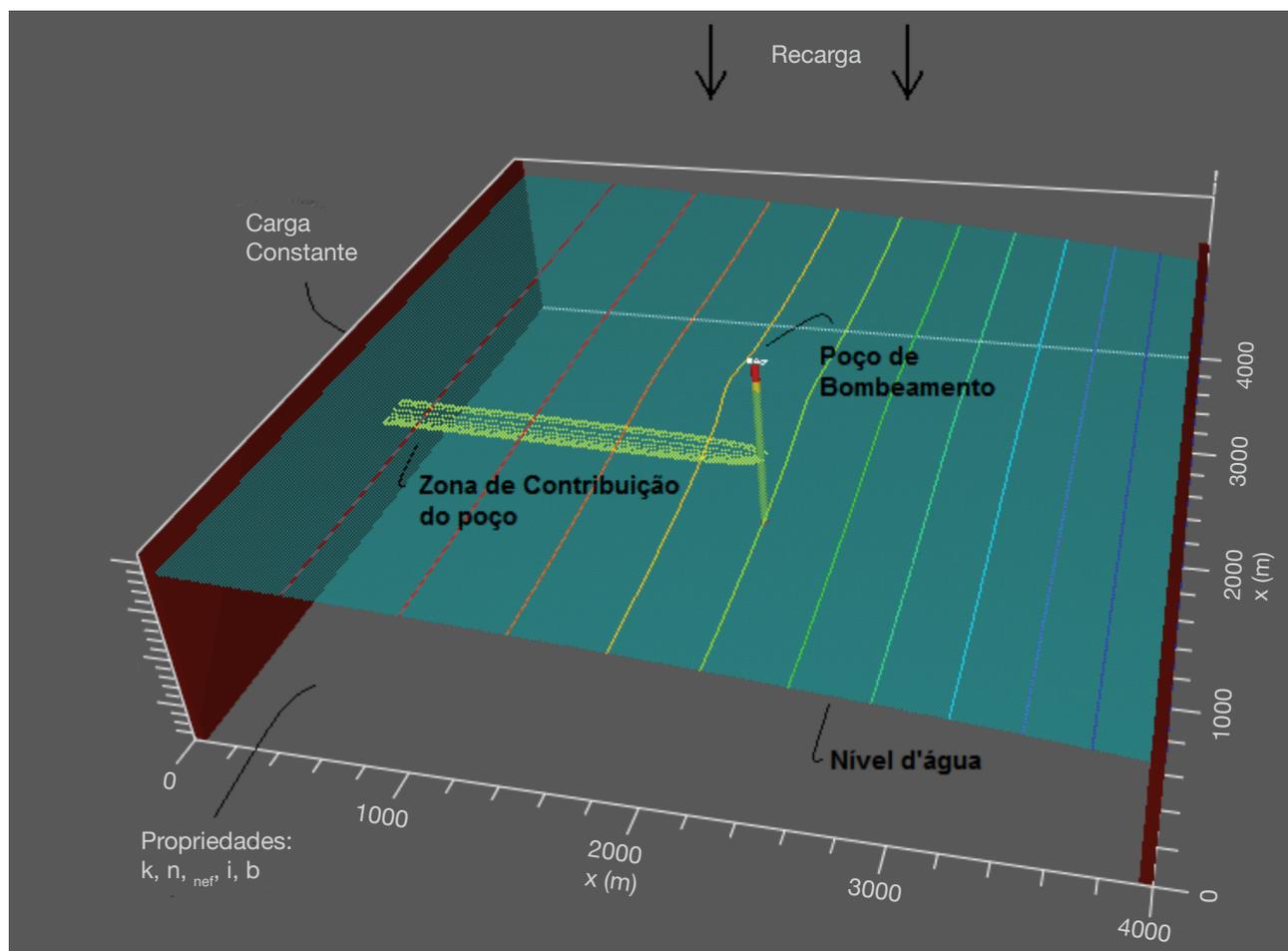
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os três métodos foram aplicados usando as mesmas condições hidrogeológicas para cada aquífero do Estado de São

Tabela 4. Dados necessários para aplicação dos métodos Raio fixo calculado, Modelo analítico e Modelo numérico.

Método	Q (m ³ /dia)	Tempo de operação do poço (dia)	k (m/dia)	b (m)	i	n (%)	n _{ef} (%)	Recarga e evapotranspiração (mm/ano)	Condição de contorno
RFC	X	X					X		
MA	X	X	X	X	X				
MN	X	X	X	X	X	X	X	X	X

k: condutividade hidráulica; b: espessura saturada; i: gradiente hidráulico; n: porosidade total; n_{ef}: porosidade efetiva.



k: condutividade hidráulica; b: espessura saturada; i: gradiente hidráulico; n: porosidade total; nef: porosidade efetiva.

Figura 6. Resultado do modelo numérico semelhante para todos os aquíferos, visualizado em 3D, ilustrando a zona de contribuição do poço.

Paulo e gerando-se um valor específico de área de proteção, além de formatos das ZOC diferenciados. Os métodos RFC e MA geraram áreas semelhantes. Já o MN delineou áreas 200% menores do que os métodos RFC e MA. A Tabela 5 e a Figura 7 comparam as áreas calculadas pelos métodos utilizados para TT de 50 dias, um, cinco e dez anos.

Na Figura 8 é possível comparar os formatos de ZOC delimitados com diferentes métodos em um poço de abastecimento público, localizado em uma área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, para o TT de cinco anos. O método RFC delineou áreas muito grandes (comparativamente a outros métodos), nas quais a maior parte não necessitaria ser protegida e deixaria de proteger outras que deveriam ser consideradas.

A utilização do MA é viável, numa primeira aplicação, pois apresenta maior aproximação ao MN. Além disso, é possível utilizar o MA em quase todos os poços de abastecimento público do Estado de São Paulo devido à existência de dados hidrogeológicos necessários para a sua aplicação.

Porém, numa fase posterior, o MN seria a alternativa natural, por estabelecer uma potenciometria mais detalhada, avaliar a recarga do aquífero e considerar meios heterogêneos e anisotrópicos, bem como situações particulares de contorno e exploração de outros poços, gerando resultados mais precisos. Sua viabilidade só é garantida se houver correspondência entre o mapa de superfície potenciométrica gerado com o observado em campo.

Com o uso do MN, pode-se, ainda, avaliar a sensibilidade que alguns aquíferos têm na variação de parâmetros hidráulicos específicos, como condutividade hidráulica

(K), porosidade efetiva (η_{ef}) e recarga (R). Esses parâmetros hidráulicos exercem um controle dominante sobre a dimensão da ZOC. Foster et al. (1992) observaram que a sensibilidade à variação desses parâmetros será imediatamente evidente e, por isso, é essencial utilizar cálculos e valores realistas para os piores casos.

Os resultados mostraram que a ZOC aumenta à medida que aumenta a condutividade hidráulica (K) do aquífero (Figura 9A). De maneira diferente, se a taxa de recarga aumentar, a ZOC tende a diminuir, pois, sendo a ZOC a zona de recarga do aquífero, é a área que fornece a produção protegida em um longo período. Assim, sabe-se que sua superfície é determinada com base na taxa de recarga média a longo prazo. Se essa taxa diminuir, a ZOC efetiva será maior do que aquela protegida (Figura 9B).

Segundo Bair e Roadcap (1992), a porosidade efetiva é um dos parâmetros mais difíceis de definição em campo, gerando muitas dúvidas na delimitação de uma ZOC. A Figura 9C mostra que valores menores de n_{ef} definem áreas maiores de ZOC.

A porosidade efetiva é um parâmetro que age diretamente na velocidade real advectiva, influenciando a ZT, baseada nos TT, além da zona de interferência (ZI) do poço, relacionada ao rebaixamento da superfície potenciométrica ao redor de um poço em bombeamento, resultando na situação denominada 'cone de depressão'. Maiores valores de porosidade efetiva geram menores tempos de circulação das águas subterrâneas, reduzindo, assim, as dimensões da ZT. Neste contexto, o maior armazenamento de águas nos aquíferos gera, também, menores ZI (Hirata, 1994).

Tabela 5. Comparação entre áreas de zona de contribuição calculadas pelos métodos Raio fixo calculado, Modelo analítico e Modelo numérico para os aquíferos do Estado de São Paulo.

Aquíferos	50 dias ($\times 10^3$ m ²)			1 ano ($\times 10^3$ m ²)			5 anos ($\times 10^3$ m ²)			10 anos ($\times 10^3$ m ²)		
	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN
Coberturas cenozoicas	6	15	-	45	54	-	226	235	-	453	462	-
São Paulo	2	2	1	10	11	7	52	53	33	105	106	62
Taubaté	5	14	4	36	46	28	181	191	136	362	372	260
Marília	1	1	1	5	5	5	27	27	22	54	54	42
Adamantina	2	2	1	13	13	10	64	64	47	128	128	88
Santo Anastácio	4	8	3	32	35	18	160	163	85	319	323	161
Caiuá	8	57	6	58	107	41	292	340	207	584	632	393
Serra Geral	4	6	3	27	29	22	137	138	103	274	275	192
Guarani	3	9	2	21	27	19	107	113	80	214	220	154
Tubarão	1	1	1	4	4	4	21	21	18	41	41	36
Furnas	3	6	3	22	25	18	109	112	82	219	222	121
Cristalino	2	3	3	15	17	13	76	78	62	153	154	121

RFC: raio calculado; MA: modelo analítico; MN: modelo numérico.

O manejo da incerteza é sempre o ponto crucial na definição das ZOC. Portanto, considerando a interferência provocada nas áreas de ZOC, devido à variação e incerteza dos parâmetros hidráulicos, é importante calcular a ZOC para os casos extremos, gerando áreas maiores e menores, e proteger, assim, uma área maior que a ZOC gerada por dados menos restritivos, pensando no princípio da precaução.

Entretanto, duas alternativas podem ser consideradas, sendo uma a área menor (menos restritiva) havendo maior probabilidade de ser hidráulicamente relacionada ao poço (maior chance de recarregar o poço) e, a outra, de área maior (mais restritiva) com menor probabilidade. Assim, será possível definir duas áreas, com níveis diferentes de confiança, impondo maior controle e definição da área protegida.

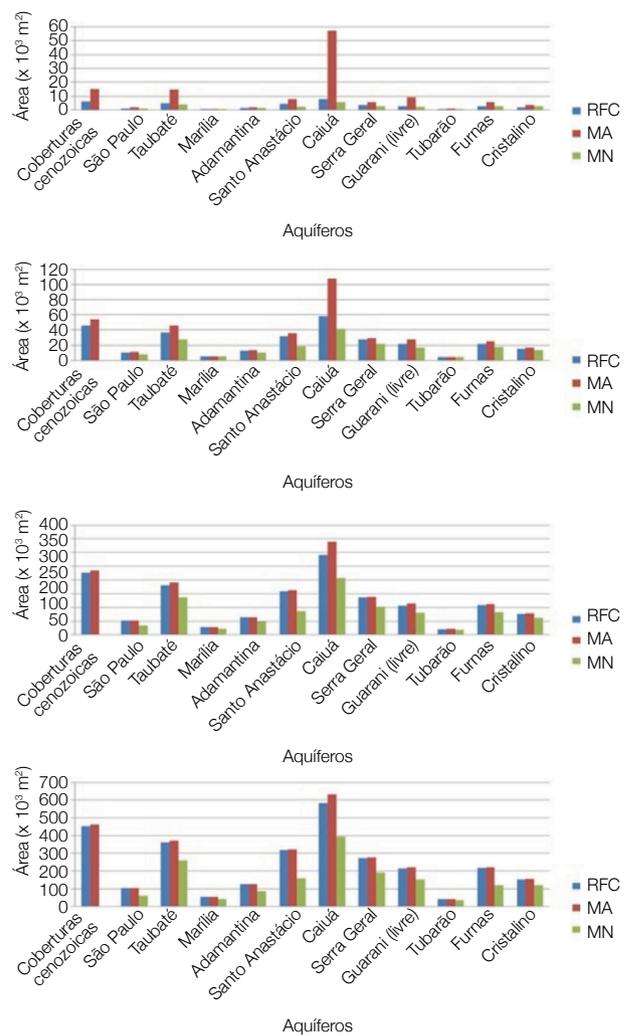
Usando como exemplo o Sistema Aquífero Guarani, com dados menos restritivos, a área calculada para a ZOC foi de $14 \times 10^3 \text{ m}^2$, sendo menor do que se os dados utilizados fossem mais restritivos, o que resultaria em uma área de $20 \times 10^3 \text{ m}^2$ (Tabela 6 e Figura 10).

Aplicação dos perímetros de proteção de poços (PPP) em captações de abastecimento público no Estado de São Paulo

A despeito das dificuldades técnicas no traçado das ZOC, há que se mencionar outras limitações que restringem a conversão de ZOC em PPP efetivos de poços de abastecimento público. Embora o desconhecimento dos parâmetros hidrogeológicos seja o maior entrave na delimitação das ZOC, há particularidades técnicas que muito dificilmente serão superadas, como a grande transiência no bombeamento dos poços alvos (tempo de bombeamento ao longo do dia ou em períodos diferentes), tanto daquele que se quer proteger quanto dos poços privados do entorno (Figura 11).

O bombeamento de um determinado poço causa alteração na superfície potenciométrica e modifica o sentido de fluxo das águas subterrâneas. Traçar ZOC, que leve em consideração esse bombeamento, é muito difícil, sobretudo quando poços vizinhos (privados ou não) têm que ser considerados. Este fato é agravado quando se lembra da existência de 70% de poços ilegais no Estado de São Paulo. Acrescenta-se ainda que os poços de abastecimento municipais estão localizados dentro da malha urbana e na maioria das cidades paulistas em terrenos com ocupação já estabelecida. Em muitos casos, é mais conveniente perfurar um novo poço em outro lugar do que transferir as atividades de seu entorno.

Adicionalmente, deve-se reconhecer que o poder público e a própria sociedade desconhecem a importância da implementação de PPP nos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. A implementação dessa medida implica na restrição do uso da terra, por conseguinte,



RFC: raio fixo calculado; MA: modelo analítico; MN: modelo numérico.

Figura 7. Comparação entre áreas de zona de contribuição para tempo de trânsito de 50 dias, 1, 5 e 10 anos, utilizando diferentes métodos (raio fixo calculado, modelo analítico e modelo numérico), nos aquíferos do Estado de São Paulo.

tendo impactos econômicos importantes. Aparentemente, estão dissociadas as ideias de qualidade da água subterrânea em poços e de fontes potenciais de contaminação em sua ZOC.

Não obstante as incertezas inerentes a programas de PPP, estes devem ser implementados no Estado de São Paulo, sob pena de risco à saúde da população, bem como de perdas econômicas para as companhias concessionárias de abastecimento público. Uma forma de superar essas incertezas é proceder à delimitação de ZOC que utilize procedimentos criteriosos em sua delimitação. Portanto, é melhor definir ZOC com métodos simples, nos quais dados são tratados de forma a garantir o máximo de proteção, do que com métodos de precisão duvidosa, como ocorre com

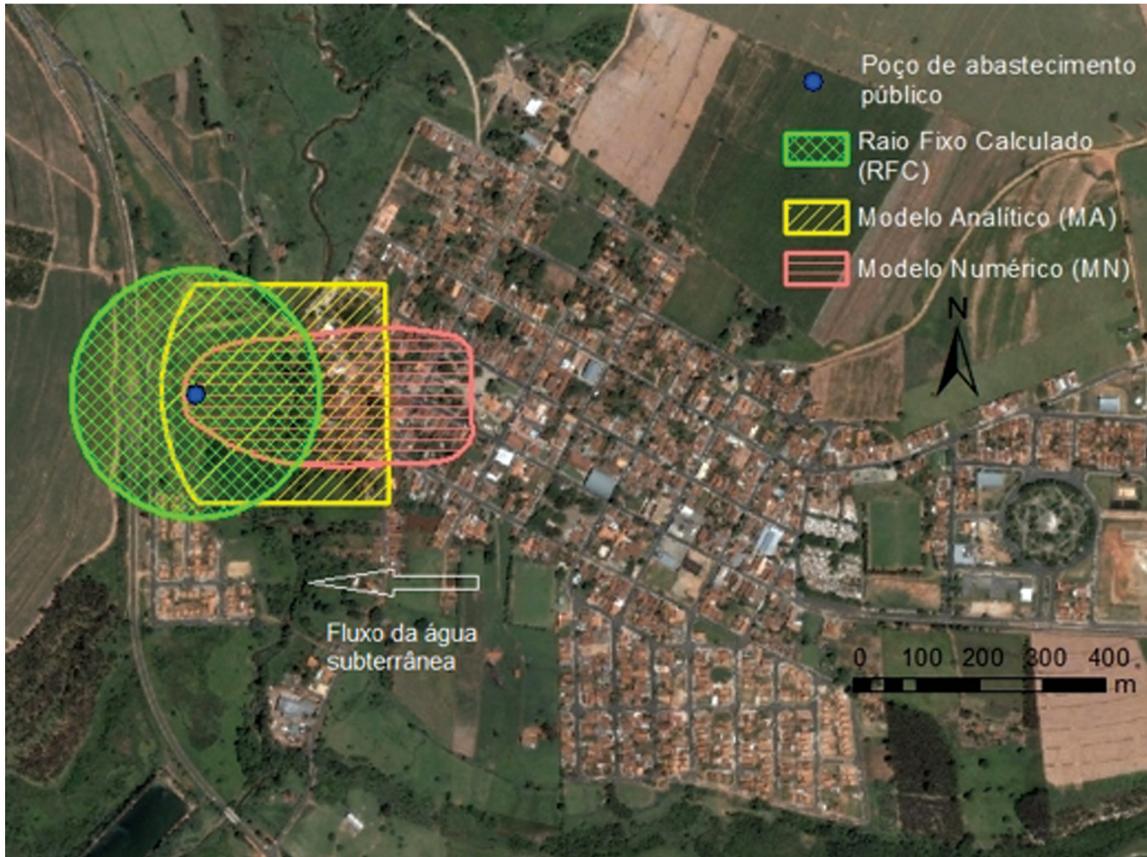


Figura 8. Comparação entre zonas de contribuição delimitadas por diferentes métodos no Sistema Aquífero Guarani para o tempo de trânsito de cinco anos.

os numéricos com poucos e duvidosos dados. Sugere-se os seguintes critérios para o traçado de ZOC em poços de abastecimento público paulistas:

- Identificar o poço que será protegido (poço-alvo), buscando os dados técnicos e construtivos, bem como do seu regime de exploração. Esse poço deve ser munido de um hidrômetro e de um registro contínuo do tempo de operação, para se estabelecer o regime de bombeamento. Devem ser instalados, também, dispositivos para medidas periódicas do nível da água no poço (nível estático e dinâmico);
- Reconhecer os poços tubulares públicos e privados no entorno do poço-alvo, dentro de um raio de 2 a 3 km, a depender das características hidráulicas do aquífero. A definição do raio máximo poderá valer-se dos valores propostos definidos neste trabalho (Tabela 5);
- A partir do regime de bombeamento do poço-alvo e das estimativas de exploração dos poços do entorno, devem ser estabelecidas prováveis ZOC. Uma avaliação hidrogeológica deverá ser feita com esses dados, identificando-se possíveis interferências esperadas pela exploração dos poços;
- Traçar uma ZOC com uso de MA, utilizando valores mais e menos conservadores, a exemplo do exercício apresentado neste trabalho (Figura 8); e
- No interior das ZOC, identificar as fontes potenciais de contaminação, utilizando um método como o POSH (acrônimo em inglês de *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*), segundo Foster e Hirata (1988) e Foster et al. (2006).

Adicionalmente, as atividades dentro das ZOC poderão auxiliar na identificação de prováveis contaminantes, devendo ser analisados em programas de monitoramento regulares dos poços de abastecimento público.

O uso de modelos mais sofisticados, como o numérico, poderá ser requerido a partir dessa avaliação preliminar, considerando, por exemplo, os poços que demonstram inicialmente maior perigo e aqueles dos quais o sistema de abastecimento público seja mais dependente (maior porção no abastecimento público ou poços que dificilmente poderão ser substituídos). Outra situação, na qual os métodos mais sofisticados e custosos poderão ser utilizados, refere-se à necessidade das atividades do entorno (por exemplo,

empresas), alegando provar que não afetam um poço-alvo e que, portanto, não deveriam ser restringidas. Neste caso, a contratação do serviço estaria a cargo da empresa potencialmente contaminante, devendo ser submetida ao órgão gestor responsável.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O PPP é a técnica mais utilizada no mundo para proteger as fontes de água potável advindas de poços e mananciais públicos. Diferencia-se de ZOC, no qual o primeiro é um termo administrativo, em que o zoneamento do terreno impõe restrições de uso do solo, e o segundo, um termo hidrogeológico, restrito à área de contribuição do poço.

Neste trabalho, para a definição do traçado das ZOC, foram utilizados três métodos: RFC, MA, por meio do fluxo uniforme, MN, calculados com base nos tempos de bombeamento e de trânsito das águas subterrâneas durante 50 dias, um, cinco e dez anos.

Os resultados ora obtidos demonstram ser pouco viável o uso do método RFC para a situação em que se observa no Estado de São Paulo, uma vez que determina áreas que pouco correspondem à realidade, comparativamente com o MN, comprometendo sua eficácia e podendo deixar de proteger áreas importantes de contribuição para a captação. Entretanto, as ZOC delineadas com métodos do tipo RFC podem ser usadas quando o tempo considerado de proteção é pequeno (menor que 50 dias), pois as diferenças no formato não são significativas.

A utilização do MA é mais simples que a do MN, sendo mais preciso que o RFC, além de se encontrarem disponíveis os dados para quase todos os poços públicos do Estado. Portanto, deve ser usado numa primeira avaliação, quando não houver dados disponíveis para o uso do MN.

Numa fase posterior, em que a definição da ZOC seja mais sensível, o MN seria uma alternativa. Apesar de ser um método mais complexo, exigir mais tempo para se alcançar um resultado confiável e necessitar de grande quantidade de dados, é viável e mais preciso, pois considera características hidrogeológicas de heterogeneidade, anisotropia e condições de contorno, além do bombeamento de

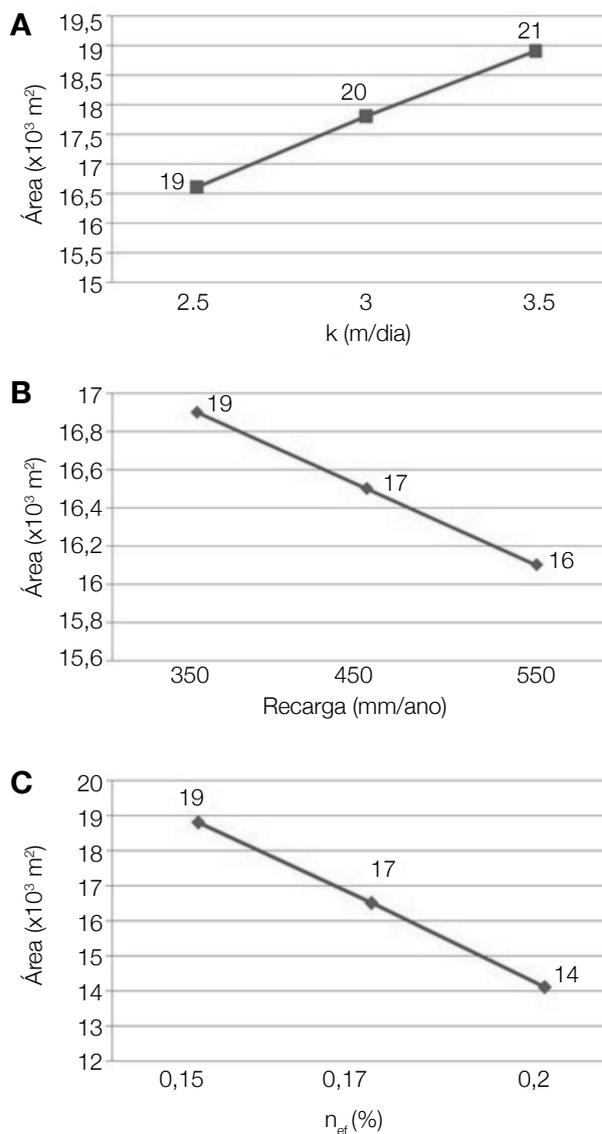


Figura 9. Variação da área da zona de contribuição à medida que variam os parâmetros de: condutividade hidráulica (K); recarga; porosidade efetiva no Sistema Aquífero Guarani usando o MN para um tempo de trânsito de um ano.

Tabela 6. Valores de área da zona de contribuição para o Sistema Aquífero Guarani, conforme variação de parâmetros hidráulicos.

Tipo dos valores	Recarga (mm/ano)	k (m/dia)	n _{ef} (%)	Área (x 10 ³ m ²) da ZOC
Menos restritivos	550	2,5	0,20	14
Mais restritivos	350	3,5	0,15	20

k: condutividade hidráulica; nef: porosidade efetiva; ZOC: zona de contribuição.



MN: modelo numérico

Figura 10. Comparação entre zonas de contribuição delimitadas por diferentes parâmetros hidrogeológicos para o Sistema Aquífero Guarani para o tempo de trânsito de um ano.

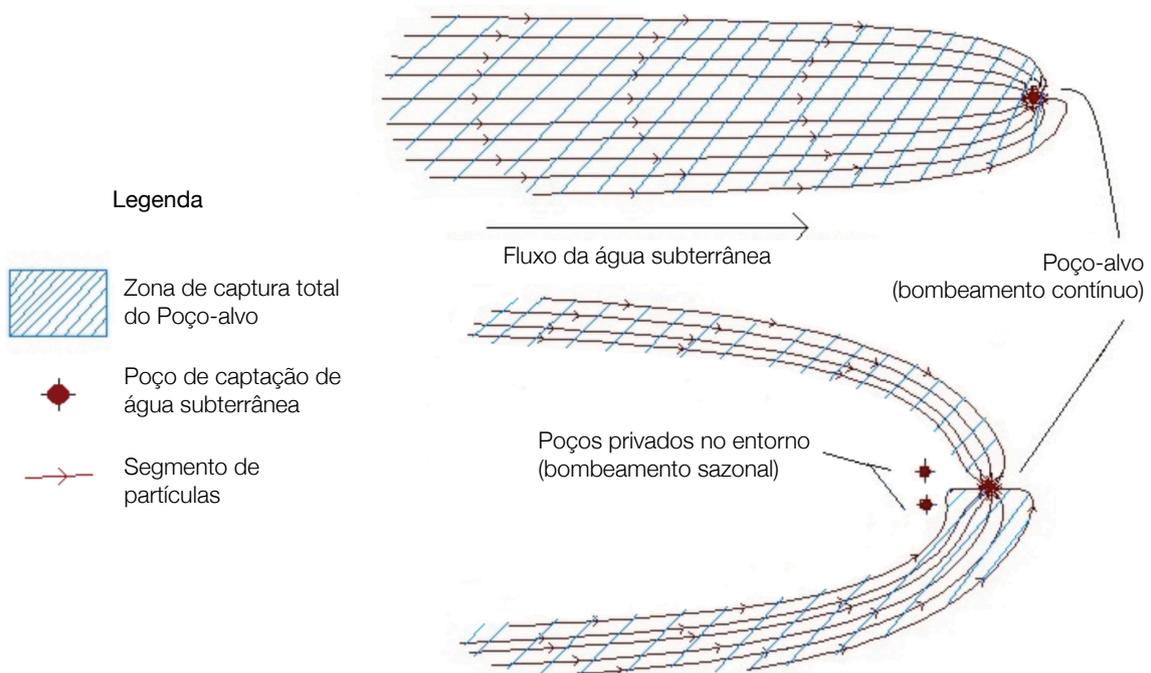


Figura 11. Efeito de interferência hidráulica no formato e na estabilidade da zona de contribuição observado em poço localizado no Sistema Aquífero Guarani.

outros poços, situação que ocorre com maior frequência nos aquíferos. Além disso, com o uso do MN e do programa escolhido, será possível desenvolver estudos futuros para o gerenciamento de recursos hídricos, envolvendo transporte de contaminantes na área a partir dos resultados apresentados.

É importante, portanto, que o poder público paulista, por meio dos órgãos competentes responsáveis pela gestão das águas, institua o instrumento dos PPP para a proteção dos poços de abastecimento público, sob pena de colocar em risco a saúde da população.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; PONÇANO, W. L.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; MELO, M. S.; BISTRICH, C. A. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT: 1981. Escala 1:500.000.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied groundwater modeling*. Simulation of flow and advective transport. San Diego: Academic Press, 1992. 381 p.
- BAIR, E. S.; ROADCAP, G. S. Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: Leaky-confined fractured carbonate aquifers. *GroundWater*, v. 30, n. 2, p. 199-211, 1992.
- BHATT, K. Uncertainty in wellhead protection area due to uncertainty in aquifer parameter values. *Journal of Hydrology*, n. 149, p. 1-8, 1993.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2007-2009*. São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente/CETESB, 2010.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Manual de Gerenciamento de áreas Contaminadas. Projeto Cooperação Brasil/Alemanha/CETESB-GTZ*. 2. ed. São Paulo, 2001. 398 p.
- CRH – CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo*. Comitê Coordenador do Plano Estadual dos Recursos Hídricos. SRHSO/DAEE/SMA/CETESB, São Paulo, 1999.
- ENVIRONMENT AGENCY. *Policy and practice for the protection of groundwater*. The Stationery Office, 1998, 57 p.
- FOSTER, S.; ADAMS, B.; MORALES, M.; TENJO, S. *Estrategias para la protección de aguas subterráneas: una guía para su implementación*. Lima: CEPIS, 1992.
- FOSTER, S. E.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. In: LIMA: *Pan American Sanitary Engineering and Environmental Science Center* (CEPIS/PAHO/WHO), 2. ed., 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; DÉLIA, 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.
- GUIGUER, N. E.; FRANZ, T. *Visual Modflow*. User's Manual. Waterloo, Canadá: WHI, 1996.
- HIRATA, R. *Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no estado de São Paulo*. 1994. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- HIRATA, R. *Águas subterrâneas: zonas de recarga e proteção*. *Anais...* Seminário de políticas estaduais de recursos hídricos, São Paulo, 1992.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. Águas subterrâneas urbanas no Brasil: uma avaliação crítica para o desenvolvimento de políticas sustentáveis de gestão. Banco mundial. Brasília (no prelo), 2011.
- HIRATA, R.; GESICKI, A. L. D.; BERTOLO, R.; SRACEK, O.; GIANNINI, P. C. F.; ARAVENA, R. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, n. 31, p. 444-456, 2011.
- HIRATA, R.; ZOBBI, J.; FERNANDES, A.; BERTOLO, R. Hidrogeologia del Brasil: Uma breve crónica de las potencialidades, problemáticas y perspectivas. *Boletín Geológico y Minero*. Madrid, v. 217, n. 1, p. 25-36, 2006.
- HIRATA, R.; ZOBBI, J.; OLIVEIRA, F. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: Bicudo, C.; Tundisi, J.; Scheuenstuh, M. (Org.). *Águas do Brasil: análises estratégicas*. 1. ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. v.1, p. 144-164.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Base de informações do censo demográfico*. Rio de Janeiro, IBGE, 2005.

- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Coordenadoria de Planejamento Ambiental. *Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo*. São Paulo, 2011. 102 p.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Coordenadoria de Planejamento Ambiental. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT: 1981. Escala 1:1.000.000.
- IRITANI, M. A. *Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea*. 1998. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço. *Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos*. São Paulo, Instituto Geológico, n. 2, 2010. 60p. Disponível em: www.ambiente.sp.gov.br/aquiferos e www.igeologico.sp.gov.br. Acesso em: 07 jun. 2011.
- MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITONEVES, B.B. de. (Org.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-280.
- NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. Perímetros de protección para captaciones de água subterrânea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al território. *Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*. Madrid: IGME, 2003.
- ROCHA, G. (Coord.). *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo, CRH/DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005. Escala 1:1.000.000.
- SÃO PAULO (Estado). *Lei nº 6.134/88 de 2 de junho de 1988*. Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Lei-6134-88.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2010.
- SÃO PAULO (Estado). *Decreto nº 32.955, de 7 de fevereiro de 1991*. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 2 de junho de 1988. Disponível em: <http://www.quimlab.com.br/PDF-LA/Decreto%2032955%20%20Preserva%E7%E3o%20de%20%C1gua%20Subterr%E2nea.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2010.
- UNIÓN EUROPEA. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. DOL, n. 327, 22 dez. 2000. Disponível em: <http://www.mma.es>. Acesso em: 02 dez. 2008.
- USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Ground water and wellhead protection. Handbook*. Washington: USEPA, Office of Research and Development, 1994.
- USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*. Washington: USEPA, Office of Groundwater Protection, 1987.
- VAN WAEGENINGH H. G. Overview of the protection of groundwater quality. In: Matthes, G.; Foster, S. S. D.; Skinner, A. C. *Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones*. Hannover: Heise. UNESCO, International Association of Hydrogeologists, v. 6, p. 159-166, 1985.
- VORREYER, C. Delineating surface source water protection areas in Germany. *Source water assessment and protection*. Dallas, Proceedings, n. 98, p. 61-64, 1998.
- WYSSLING, L. Eine neue formel zur Berechnung der Zuflussdaneer des grundwassers zu einem grundwasser pumpwerk. *Eclogae geologicae Helvetiae*, n. 72, p. 401-406. Basel, 1979.