

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências**

**Análise de métodos para delimitação de Perímetros
de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero
costeiro em Jaguaruna/SC**

LUCAS MEDEIROS BOFILL

Orientador: Prof. Dr. Ari Roisenberg

Coorientadora: Profa. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff

Porto Alegre

2021

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências

**Análise de métodos para delimitação de Perímetros
de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero
costeiro em Jaguaruna/SC**

LUCAS MEDEIROS BOFILL

Orientador: Prof. Dr. Ari Roisenberg

Coorientadora: Profa. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff

BANCA EXAMINADORA

Marcos Alexandre de Freitas, Serviço Geológico do Brasil -CPRM

Malva Andrea Mancuso, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Leonidas Luiz Volcato Descovi Filho, Universidade Federal do Oeste do Pará -
UFOPA

Dissertação de Mestrado
apresentada como requisito
parcial para obtenção de Título
de Mestre em Ciências.

Porto Alegre

2021

CIP - Catalogação na Publicação

Medeiros Bofill, Lucas
Análise de métodos para delimitação de Perímetros
de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero
costeiro em Jaguaruna/SC / Lucas Medeiros Bofill. --
2021.

136 f.

Orientador: Ari Roisenberg.

Coorientadora: Alexandra Suhogusoff.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Perímetro de Proteção de Poço. 2. Modelo
numérico de água subterrânea. 3. Modelo numérico
estocástico. 4. WhAEM. I. Roisenberg, Ari, orient.
II. Suhogusoff, Alexandra, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria Bernadette e Gustavo, pelo incentivo que sempre me deram para que eu realizasse esse mestrado.

Ao Prof. Ari Roisenberg, pela dedicação, liberdade e condições que me proporcionou para trabalhar com temas do meu interesse.

À Profa. Alexandra Suhogusoff e ao Prof. Luiz Ferrari, pela dedicação sempre que foi necessário, me coorientando e somando em meu crescimento profissional.

À Patrícia e ao Anderson, da G&P Soluções Ambientais, que, além de suas amizades, me ajudaram (para não dizer salvaram) na coleta de dados para a realização de minha pesquisa.

À empresa Jaguaruna Saneamento, por ter fornecido dados e acesso à planta de abastecimento público, alvo do meu estudo.

À minha companheira Laura, por estar sempre ao meu lado durante essa jornada, e à sua querida família, que considero como parte da minha.

A toda minha família, irmãos, tios(as) e primos(as), que, como caçula, sempre foram referências para mim.

A todos os amigos, novos e antigos, em especial aos da Caixa Baixa, por fazerem parte da construção de quem sou hoje.

Ao Prof. Pedro Reginato, pelas conversas durante a etapa de definição do tema do meu mestrado, que inclusive me apresentou a temática de perímetro de proteção de poços.

À Bobbie Wunsch e à Tia Tereca, que me possibilitaram participar da entrevista que abriu meus olhos para a temática de modelamento de água subterrânea.

À Luciana e ao Adair, e toda sua família, que são como minha família do Farol de Santa Marta.

Ao CNPQ, pela bolsa de estudos que possibilitou que eu me dedicasse à minha pesquisa.

A todos os profissionais da saúde, desde os responsáveis pela limpeza até os de mais altos cargos, e a todos os outros profissionais de serviços essenciais. Além de agradecer, desejo muita força e saúde.

Merci pour la vie.

Resumo

O uso sustentável de recursos hídricos subterrâneos sem comprometer o desenvolvimento econômico e social é um desafio que depende de uma diversidade de medidas políticas e institucionais. Uma ferramenta importante para que essas metas sejam atingidas é a delimitação de perímetros de proteção de poços (PPP). Diversos métodos são apresentados na bibliografia, com diferentes graus de complexidade e confiabilidade quanto sua eficiência. O presente estudo analisa alguns métodos de delimitação de PPP, comparando seus resultados com os PPP gerados por meio de um modelo numérico estocástico tridimensional MODFLOW-MODPATH. Os métodos testados foram o de Raio Fixo Calculado (RFC), e duas soluções analíticas e uma semi-analítica de delimitação de PPP do software WhAEM, da Agência de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency - USEPA*), aplicados em dois cenários: oito poços operando simultaneamente e um poço operando individualmente, ambos na mesma planta de abastecimento. As simulações foram feitas no município de Jaguaruna/SC, situada na planície costeira do sul de Santa Catarina, mais especificamente sobre depósitos quaternários de uma barreira costeira pleistocênica. Os resultados apontaram que todos os métodos apresentaram bons resultados para a delimitação de PPP de 50 dias de tempo de trânsito para um poço operando individualmente. À medida que o tempo de trânsito aumenta menos precisos são seus resultados. O mesmo acontece quando há múltiplos poços operando simultaneamente, onde complexidades da interação de fluxo entre os poços diminuem a precisão dos resultados. O método de Raio Fixo Calculado apresentou em geral o melhor custo benefício, especialmente devido à ausência de heterogeneidades significativas na área de estudo. Outras análises também são apresentadas, como a comparação entre resultados obtidos por modelos estocásticos e determinísticos, e a comparação entre as dimensões da zona total de captura da planta de abastecimento, e dos PPP de 10 e 20 anos de tempo de trânsito, concluindo-se que os dois últimos não são suficientemente protetivos contra contaminantes persistentes. Por último, é apresentado o efeito nas dimensões da zona de captura de um poço causado pela redução na taxa de recarga.

Palavras chave: Perímetros de proteção de poços, modelo estocástico, MODFLOW-MODPATH, WhAEM

Abstract

Sustainable use of groundwater resources while maintaining economic and social development is a major challenge which depends on a diversity of policy and institutional settings. The implementation of Wellhead Protection Areas (WHPA) for public supply wells is an important tool for achieving these goals. Several methods to define WHPA have been presented, with different degrees of complexities and reliability. First it is delineated WHPA through a three-dimensional stochastic numerical model MODFLOW-MODPATH, defined as a reference method. Then its results were compared with WHPA delineated by the methods Calculated Fixed Radius (CFR), and three solutions of the software WhAEM, two analytical and a one semi-analytical. The comparisons were conducted in two scenarios: a wellfield composed by eight wells operating simultaneously, and in a single pumping well. Both simulations were carried out at the same location, in Jaguaruna County, located on the southern coastal plain of Santa Catarina State, Brazil, more specifically in quaternary deposits of a Pleistocene coastal barrier. All methods presented good results for a single well 50 days of time-of-travel (TOT) WHPA. As TOT increases, more uncertainties are incorporated, decreasing results precision. The same is observed when multiple wells operates simultaneously, increasing flow complexities caused by wells interference. In general, the CFR method has a good cost-benefit, when compared to the WhAEM solutions, especially due to the absence of significant heterogeneities in the study area. Other analyses are also presented, as the comparison between results obtained by stochastic and deterministic models, and a comparison between the wellfield capture zone dimension and the 10 and 20 years TOT WHPA dimensions, being shown that managing the whole capture zone is the best way to protect against conservative contaminants. Finally, this study analyses the effects caused by the recharge rate reduction in a single well WHPA dimensions.

Keywords: Wellhead protection area, stochastic model, MODFLOW-MODPATH, WhAEM

Lista de figuras

Figura 1 Esquema de Zonas de Captura de água subterrânea e dos perímetros de tempo de trânsito ao redor de um poço, em um aquífero não confinado (FOSTER <i>et al.</i> , 2006).....	18
Figura 2 Fluxograma das etapas que envolvem modelamento de água subterrânea (BAALOUSHA, 2011).	22
Figura 3 Mapa de localização dos poços da Jaguaruna Saneamento.	28
Figura 4 Campanha de campo com o uso do GPS sistema GNSS S86T RTK, para coleta das cargas hidráulicas dos corpos d'água superficial.....	29
Figura 5 Mapa de localização dos pontos de coleta de dados de cargas hidráulicas em corpos d'água superficiais.....	29
Figura 6 Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo.	31
Figura 7 Representação do domínio do modelo em planta, e a disposição dos pontos de coleta das cargas hidráulicas com GPS RTK, e localização da planta de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamento.	31
Figura 8 Domínio em 3D e distribuição das litologias. Exagero vertical de 15 vezes.	33
Figura 9 Malha do modelo em planta, com maior discretização na região dos poços.....	34
Figura 10 Seção vertical nas imediações dos poços de abastecimento. Malha com menor espaçamento marca o local dos poços.	35
Figura 11 Condições do contorno do modelo em planta.	36
Figura 12 Distribuição normal dividida em seis segmentos de amostragem por hipercubo latino. (AQUAVEO, 2016a).	38
Figura 13 Nomenclaturas para análise comparativa dos métodos de definição de PPP. (Paradis <i>et al.</i> , 2007).....	48
Figura 14 (a) Mapa geológico da área de estudo, adaptado de Martin <i>et al.</i> (1988); (b) Perfil esquemático, transversal aos Sistemas Laguna-Barreira. Fonte: Tomazelli & Villwock, 2000).	53
Figura 15 Seção-tipo que representa a geologia da área de estudo. Elaborada com os dados de S&A Geologia (2016).	55
Figura 16 Mapa de Domínios Hidrogeológicos de Santa Catarina (CARDOSO, <i>et al.</i> , 2007)	57
Figura 17 Mapa hidrogeológico do sudeste de Santa Catarina (Senhorinho <i>et al.</i> , 2017).	58
Figura 18 Seções gerados a partir dos perfis geológicos dos poços de abastecimento.	60
Figura 19 Histogramas gerados para o erro absoluto médio (EAM) e erro médio quadrático normalizado (EMQN), encontrados nos 128 modelos estocásticos.	61
Figura 20 Média acumulada dos resíduos de cargas, no cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.	62
Figura 21 Média acumulada dos resíduos de cargas, no cenário de um poço operando individualmente.	63
Figura 22 Histogramas dos parâmetros usados nos modelos gerados de forma estocástica.	64
Figura 23 Mapa potenciométrico do domínio do modelo, com os oito poços em operação, em uma das 128 soluções geradas de forma estocástica, correspondente à cota de 6 metros no grid vertical.....	66

Figura 24 Representação em perfil da zona de captura dos poços por rastreamento de partículas.....	67
Figura 25 Gráfico de análise de sensibilidade dos parâmetros estimados no módulo PEST. A recarga foi o parâmetro com maior sensibilidade. KH = Condutividade hidráulica horizontal; KV = Condutividade hidráulica vertical; Arg = Argila; Abm = Areia branca média; Ta = Turfa arenosa; Aa = Areia amarela.	70
Figura 26 Gráfico de análise de sensibilidades das condutividades hidráulicas das formações geológicas presentes no modelo. KH = Condutividade hidráulica horizontal; KV = Condutividade hidráulica vertical; Arg = Argila; Abm = Areia branca média; Ta = Turfa arenosa; Aa = Areia amarela.	70
Figura 27 Perímetros de proteção de 50 dias de tempo de trânsito em múltiplos poços operando, gerados de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelo poço em até 50 dias.	72
Figura 28 Perímetros de proteção de 10 anos de tempo de trânsito em múltiplos poços operando, gerados de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelos poços em até 10 anos.....	73
Figura 29 Perímetro de proteção de 50 dias de tempo de trânsito, gerado de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelo poço em até 50 dias.....	74
Figura 30 Perímetro de proteção de 10 anos de tempo de trânsito, gerado de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH para o poço P01 operando individualmente. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelo poço em até 10 anos.	75
Figura 31 Comparações entre os PPP gerados pelos modelos MODFLOW-MODPATH determinístico e estocástico, nos diferentes cenários.	77
Figura 32 PPP gerados pelos diferentes métodos para o cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.	80
Figura 33 PPP gerados pelos diferentes métodos para o cenário de apenas um poço operando.	84
Figura 34 Variação dos Índices de Comparação C_i para os métodos testados nos distintos cenários de PPP. MP = múltiplos poços; PI = poço individual; 50a = 50 anos de TDT; 10a = 10 anos de TDT.....	86
Figura 35 Variações encontradas na razão entre a área total abrangida pelo método testado (MT) e a área obtida pelo método de referência (MR), nos diferentes cenários. Quanto mais próximo a 1, maior a precisão da área do método testado. MP = múltiplos poços; PI = poço individual; 50a = 50 anos de TDT; 10a = 10 anos de TDT.....	87
Figura 36 Representação da zona total de captura, e dos PPP de 10 e 20 anos de TDT, para os oito poços da planta de abastecimento público da empresa Jaguaruna Saneamento.	90
Figura 37 Representação da área da zona total de captura do poço P01 no cenário atual, e da área em uma simulação de situação de estiagem.....	92

Figura 38 Representação da área do PPP de 50 dias de TDT no cenário atual, e da área em uma simulação de situação de estiagem. 93

Lista de tabelas

Tabela 1 Dados referentes aos poços de bombeamento.....	30
Tabela 2 Dados de entrada para rodar o modelo estocástico usando o método de amostragem hipercubo latino, no software GMS.....	39
Tabela 3 Dados referentes às vazões máximas licenciadas, e a espessura dos filtros dos oito poços de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamento.	41
Tabela 4 Parâmetros de entrada para aplicação dos diferentes métodos testados.....	50
Tabela 5 Médias geométricas, e valores máximos e mínimos, do erro absoluto médio (EAM) e do erro médio quadrático normalizado (EMQN), encontrados para os 128 modelos estocásticos.	61
Tabela 6 Faixa de valores de parâmetros amostrados de forma estocástica no modelo numérico MODFLOW-MODPATH.	63
Tabela 7 Áreas com probabilidade maior ou igual a 2% de partículas lançadas ao solo serem capturadas em 50 dias de TDT, geradas de forma estocástica, para cada poço em um cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.	72
Tabela 8 Índices de comparação C_i entre os PPP gerados pelos modelos MODFLOW-MODPATH determinístico e estocástico, e suas respectivas áreas, para os diferentes cenários.	77
Tabela 9 Índices de Comparação C_i dos diferentes métodos testados para delimitação de PPP de 50 dias de TDT, para múltiplos poços operando simultaneamente. Valor de C_i para cada método é apresentado como a média geométrica dos resultados dos oito poços.	81
Tabela 10 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 10 anos de TDT, para múltiplos poços operando simultaneamente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, <i>et al</i> (2007).	81
Tabela 11 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método RFC para múltiplos poços operando simultaneamente.	81
Tabela 12 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método EFU para múltiplos poços operando simultaneamente.	82
Tabela 13 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método Simple WhAEM para múltiplos poços operando simultaneamente.	82
Tabela 14 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método WhAEM para múltiplos poços operando simultaneamente.	82
Tabela 15 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 50 dias de TDT, para um poço operando individualmente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, <i>et al</i> (2007). .	83
Tabela 16 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 10 anos de TDT, para um poço operando individualmente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, <i>et al</i> (2007). .	83
Tabela 17 Valores dos Índices de Comparação C_i obtidos pelos métodos testados, nos distintos cenários de PPP.	86
Tabela 18 Áreas dos PPP de 10 e 20 anos de TDT, e da zona total de captura dos oito poços da empresa Jaguaruna Saneamento.	90
Tabela 19 Valores de recarga aplicados nos modelos calibrados (cenário atual), e nos modelos que simulam um período de estiagem, com redução na taxa de recarga.	91

Tabela 20 Área da zona de captura do poço P01 no cenário atual, e no cenário de estiagem simulado.	91
Tabela 21 Área do perímetro de proteção do poço P01 de 50 dias de TDT, no cenário atual, e no cenário de estiagem simulado.	92

Lista de quadros

Quadro 1 Comparação dos principais métodos para delimitar Perímetros de Proteção de Poços (PPPs). Traduzido de USEPA (1994).	15
Quadro 2 Diferentes abordagens de aplicação de modelos matemáticos (Cabral & Demetrio, 2008).	24
Quadro 3 Principais diferenças entre os métodos de Elementos Finitos e de Diferenças Finitas (Baalousha, 2011).	25

Sumário

1. Introdução	12
2. Objetivos	13
2.1. Objetivo Geral.....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. Estado da arte	14
3.1. Perímetros de Proteção de Poços (PPP).....	14
3.2. Modelamento numérico de água subterrânea.....	20
4. Materiais e Métodos	26
4.1. Área de estudo	26
4.1.1. Localização	26
4.1.2. Aspectos climáticos	26
4.1.3. Aspectos socioeconômicos.....	27
4.2. Modelamento de fluxo de água subterrânea.....	28
4.2.1. Modelo conceitual da área.....	28
4.2.2. Modelo numérico	33
4.2.3. Calibração do modelo.....	36
4.2.4. Análise de sensibilidade	37
4.2.5. Modelo estocástico.....	37
4.3. Perímetro de Proteção de Poços (PPP).....	39
4.3.1. Método de referência: MODFLOW-MODPATH.....	41
4.3.2. Raio Fixo Calculado (RFC).....	41
4.3.3. Equação de Fluxo uniforme (EFU).....	42
4.3.4. Método WhAEM	43
4.3.5. Índice de comparação	47
4.3.6. Parâmetros de entrada	49
4.3.7. Outras análises.....	50
5. Contexto geológico e hidrogeológico	51
5.1. Geologia regional	51
5.2. Geologia local.....	54
5.3. Geomorfologia.....	55
5.4. Hidrogeologia regional.....	56
5.5. Hidrogeologia local	59
6. Resultados.....	61

6.1.	Modelo numérico MODFLOW-MODPATH.....	61
6.1.1.	Validação das simulações estocásticas.....	61
6.1.2.	Parâmetros hidrogeológicos	63
6.1.3.	Dinâmica de fluxo de águas subterrâneas	64
6.1.1.	Análise de sensibilidades	68
6.2.	Perímetro de proteção de poços (PPP)	70
6.2.1.	Múltiplos poços - MODFLOW-MODPATH	71
6.2.2.	Poço individual – MODFLOW-MODPATH	73
6.2.3.	PPP Determinístico x Estocástico.....	76
6.2.4.	Comparações entre os métodos.....	78
6.3.	Relação da zona total de captura com PPP de 10 e 20 anos de TDT.....	89
6.4.	Efeitos da diminuição na taxa de recarga	90
7.	Conclusões.....	93
8.	Bibliografia.....	94
9.	Artigo.....	102

1. Introdução

O uso sustentável de recursos hídricos subterrâneos, sem comprometer o desenvolvimento econômico e social, é um desafio que depende de uma diversidade de medidas políticas e institucionais. A delimitação de perímetros de proteção de poços (PPP) em poços de abastecimento público é uma ferramenta amplamente utilizada, especialmente em países desenvolvidos, que consiste em definir medidas de segurança e restrições de uso do solo a fim de prevenir que contaminantes atinjam os pontos de captação (SETHI & MOLFETTA, 2019). Essas medidas são essenciais para saúde pública, e variam de acordo com o objetivo de cada PPP. Contra contaminantes microbiológicos, fica proibida a instalação de fossas sépticas ou quaisquer fontes desse tipo de contaminante a uma distância mínima que garanta sua degradação antes de ser captado pelo poço. Já contra contaminantes persistentes, ou seja, que não degradam com o tempo, as restrições são contra atividades que apresentem riscos de contaminar o aquífero com este tipo de contaminante. No Brasil, poucos estados possuem legislação específica sobre o assunto, e os que possuem, encontram dificuldades em sua implementação devido ao receio de que as áreas de restrição possam prejudicar o desenvolvimento econômico da região (CARVALHO & HIRATA, 2012).

Desde a década de 1980, pesquisadores vêm propondo diversos métodos para a delimitação de PPP, variando de abordagens simples, como a definição de um raio fixo e arbitrário ao redor do poço, até métodos complexos, que necessitam de uma extensa base de dados e de profissionais experientes em hidrogeologia e modelamento numérico de água subterrânea (USEPA, 1994). O emprego do segundo caso gera resultados mais confiáveis, retratando de forma mais fidedigna as características hidrogeológicas locais. Entretanto, sua aplicação envolve elevados custos, sendo raramente utilizado pelas empresas de abastecimento público, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, aonde a delimitação de PPP não é uma prática comum.

Diante deste cenário, o presente estudo busca analisar os principais métodos de delimitação de PPP, e determinar quais são aqueles que, com uma quantidade limitada de recursos, produzem os melhores resultados para poços

de abastecimento público no município de Jaguaruna, no estado de Santa Catarina. Para isso, adotou-se o modelamento numérico pelo código MODFLOW-MODPATH como método de referência, contrapondo seus resultados com aqueles obtidos pelos métodos Raio Fixo Calculado (RFC), e de três soluções próprias do *software* WhAEM, por meio do Índice de Comparação (Ci) proposto por Paradis *et al.* (2007).

A elaboração de um modelo numérico da área de interesse também permitiu simular os impactos que uma redução na taxa de recarga poderia causar na dimensão da zona de captura de um poço de bombeamento, seja por mudanças climáticas, seja por mudanças no uso e cobertura do solo.

Ademais, os resultados poderão auxiliar em ações que resultem na preservação da qualidade dos mananciais subterrâneos, servindo como suporte no planejamento territorial do município alvo deste estudo, Jaguaruna/SC, bem como complementar o conhecimento científico acerca da temática de Perímetros de Proteção de Poços.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral consiste na análise e comparação dos principais métodos de delimitação de Perímetros de Proteção de Poços (PPP), com aplicação em uma planta de abastecimento público do município de Jaguaruna, no estado de Santa Catarina, Brasil.

2.2. Objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Elaborar um modelo numérico estocástico de fluxo da água subterrânea nas imediações de uma planta de abastecimento público do município de Jaguaruna, Santa Catarina;
- Delimitar perímetros de proteção de poços (PPP) usando o modelo numérico estocástico;
- Delimitar PPP por meio do método Raio Fixo Calculado e de três soluções próprias do *software* WhAEM, duas analíticas e uma

semi-analítica, e comparar seus resultados com os PPP delimitados por meio do modelo numérico estocástico;

- Simular os efeitos causados nas dimensões dos PPP por alterações na taxa de recarga do aquífero;
- Determinar a diferença entre perímetros de proteção de 10 e 20 anos de tempo de trânsito e a zona total de captura de um mesmo poço.

3. Estado da arte

3.1. Perímetros de Proteção de Poços (PPP)

A definição de Perímetros de Proteção de Poços (PPP) para plantas de abastecimento público de água é uma prática adotada internacionalmente, com comissões técnicas que estabelecem critérios para a implementação dessas áreas de proteção. Em 1986, foi criado nos Estados Unidos o Programa de Proteção de Poços, que obrigou os estados a definirem áreas de proteção para todos os poços de abastecimento municipais. Com isso, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency – USEPA) lançou, em 1987, um guia para definição de PPP, visando estabelecer especialmente as seguintes zonas:

- Zona de ação corretiva, para a proteção poços a exposições inesperadas de contaminantes;
- Zona de atenuação, para que contaminantes específicos tivessem suas concentrações diminuídas até um nível aceitável no momento em que atingissem o poço;
- Zona de gerenciamento, que representasse a área de recarga da água bombeada pelo poço.

Em 1994, a USEPA apresentou um manual estruturando etapas que partiam desde a esfera de gerenciamento público, passando por técnicas de definição de PPP de variados graus de complexidade, até conceitos voltados ao público leigo para identificar potenciais contaminantes que pudessem influenciar a qualidade da água consumida. Nesse manual, são comparadas diferentes metodologias e suas vantagens e desvantagens (Quadro 1).

As metodologias de delimitação de PPP variam desde as mais simples, que necessitam de apenas um mapa e um compasso para delimitar um raio arbitrário, até as mais complexas, que requerem um extenso banco de dados e profissionais com alto grau de conhecimento técnico em hidrogeologia e modelagem (USEPA, 1994). A última mencionada usa como abordagem o Tempo de Trânsito (TDT), que leva em conta o tipo de aquífero e seus parâmetros hidrodinâmicos, em particular a velocidade de fluxo, para delimitar áreas de proteção definidas pelo tempo que um contaminante leva para atingir o poço de abastecimento de água para consumo (SETHI & MOLFETTA., 2019).

Quadro 1 Comparação dos principais métodos para delimitar Perímetros de Proteção de Poços (PPPs). Traduzido de USEPA (1994).

Método	Critério	Vantagens	Desvantagens
Geométrico	Raio fixo arbitrário (distância)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil implementação. - Baixo custo. - Requer mínimo conhecimento técnico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa precisão hidrogeológica. - Requer superprojeção do raio para compensar incertezas. - Aquíferos de alta vulnerabilidade podem ficar desprotegidos. - Altamente susceptível a questões legais.
	Método do cilindro (raio arbitrário calculado)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de usar. - Relativamente de baixo custo. - Requer expertise técnica limitada. - Baseado em princípios hidrogeológicos básicos. - O único parâmetro do aquífero que requer é a porosidade. - Menos susceptível a questões legais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tende a superprojetar a jusante do poço e subprojetar a montante do poço pois não leva em consideração a Zona de Contribuição (ZC). - Impreciso em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos. - Não é apropriado para altos gradientes hidráulicos ou aquíferos não confinados.
	Formas variadas simplificadas (Tempo de Trânsito TDT - <i>Time of Travel TOT</i> ; fronteiras de fluxo)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil implementação uma vez calculadas as fórmulas-padrões - Dados de campos limitados uma vez que fórmulas-padrões são desenvolvidas (taxa de bombeamento, tipo de material do aquífero e direção de fluxo da água subterrânea). - É necessário um conhecimento técnico relativamente baixo para o delineamento. - Mais acurado que o raio fixo calculado por um modesto aumento no custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para desenvolver as fórmulas-padrões em uma área particular, requer dados dos parâmetros do aquífero, cuja obtenção é relativamente cara. - Impreciso em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos.
Outros métodos	Métodos analíticos simples (TDT, fronteiras de fluxo)	<ul style="list-style-type: none"> - Mais preciso que formas variáveis simplificadas pois se baseia em parâmetros específicos do local. - Requer expertise técnica, mas as equações são geralmente de fácil entendimento pela maioria dos hidrogeólogos e engenheiros civis. - Várias equações já foram desenvolvidas, permitindo selecionar a que melhor se encaixa para as 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer dados relativamente caros para definir parâmetros do aquífero necessários nas equações analíticas. - A maioria dos modelos analíticos não leva em consideração limites hidrogeológicos, heterogeneidades dos aquíferos e efeitos de recarga local.

		condições locais.	
		- Permite uma caracterização precisa do rebaixamento na área próxima ao poço bombeando.	
		- Boa aplicação para aquíferos não confinados em formações inconsolidadas e para aquíferos altamente anisotrópicos como embasamentos fraturados e aquíferos cársticos.	- Menos adequado para aquíferos profundos e confinados.
	Mapeamento Hidrogeológico (Fronteiras de fluxo)	- Necessário definir as condições de contorno do aquífero.	- Requer expertise técnica em mapeamento geomorfológico e geológico e interpretações hidrogeológicas.
			- Custos moderáveis de mão-de-obra e coleta de dados
	Modelos computacionais de fluxo/ transporte semi-analíticos (TDT, rebaixamento, fronteiras de fluxo)	- Mais preciso de todos os métodos e pode ser usado para as configurações hidrogeológicas mais complexas, exceto onde condutos de aquíferos cársticos são dominantes.	- Requer alto grau de expertise em hidrogeologia e modelamento.
		- Permite a avaliação de efeitos naturais e humanos em aquíferos para avaliar opções de gerenciamento.	- Menos adequado que métodos analíticos para avaliar rebaixamentos próximos a poços bombeando.
			- Requer extenso banco de dados específicos do aquífero
			- Método mais caro em termos de mão-de-obra e coleta/análise de dados
Método	Critério	Vantagens	Desvantagens
		-Fácil implementação.	-Baixa precisão hidrogeológica.
		-Baixo custo.	-Requer superprojeção do raio para compensar incertezas.
	Raio fixo arbitrário (distância)	-Requer mínima <i>expertise</i> técnica.	-Aquíferos de alta vulnerabilidade podem ficar desprotegidos.
			-Altamente susceptível a questões legais.
		-Fácil de usar.	-Tende a superprojetar a jusante do poço e subprojetar a montante do poço pois não leva em consideração a Zona de Contribuição (ZDC).
		-Relativamente de baixo custo.	-Impreciso em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos.
	Método do cilindro (raio arbitrário calculado)	Requer <i>expertise</i> técnica limitada.	-Não é apropriado para regiões com altos gradientes hidráulicos ou aquíferos não confinados.
		-Baseado em princípios hidrogeológicos básicos.	
		-O único parâmetro do aquífero que requer é a porosidade.	
		-Menos susceptível a questões legais.	
		-Fácil implementação uma vez calculadas as formulas padrões das formas.	-Para desenvolver as fórmulas padrões em uma área particular, requer dados dos parâmetros do aquífero cuja obtenção apresenta custo relativamente elevado.
	Formas variadas simplificadas (Tempo de Trânsito TDT - <i>Time of Travel TOT</i> ; fronteiras de fluxo)	-Dados de campos limitados uma vez que fórmulas padrões são desenvolvidas (taxa de bombeamento, tipo de material do aquífero e direção de fluxo da água subterrânea).	-Impreciso em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos.
		- <i>Expertise</i> técnica relativamente pequena é necessária para o delineamento.	
Geométrico			

Outros métodos	Métodos analíticos simples (TDT, fronteiras de fluxo)	<p>-Mais acurado que o raio fixo calculado por um modesto aumento no custo.</p> <p>-Mais preciso que formas variáveis simplificadas pois se baseia em parâmetros específicos do local.</p> <p>-Requer <i>expertise</i> técnica, mas as equações são geralmente de fácil entendimento pela maioria dos hidrogeólogos e engenheiros civis.</p> <p>-Várias equações já foram desenvolvidas, permitindo selecionar a que melhor se encaixa para as condições locais.</p> <p>-Permite uma caracterização precisa do rebaixamento na área próxima ao poço bombeando.</p> <p>-Custos de obter dados específicos do local podem ser altos.</p>	<p>-Requer dados relativamente caros para definir parâmetros do aquífero necessários nas equações analíticas .</p> <p>-A maioria dos modelos analíticos não levam em consideração limites hidrogeológicos, heterogeneidades dos aquíferos e efeitos de recarga local.</p>
	Mapeamento Hidrogeológico (Fronteiras de fluxo)	<p>-Boa aplicação para aquíferos não confinados em formações inconsolidadas e para aquíferos altamente anisotrópicos como embasamentos fraturados e aquíferos cársticos.</p> <p>-Necessário definir as condições de contorno do aquífero.</p>	<p>-Menos adequado para aquíferos profundos e confinados.</p> <p>-Requer <i>expertise</i> técnica em mapeamento geomorfológico e geológico e interpretações hidrogeológicas.</p> <p>Custos moderáveis de mão de obra e coleta de dados</p>
	Modelos computacionais de fluxo/transporte (TDT, rebaixamento, fronteiras de fluxo)	<p>-Mais preciso de todos os métodos e pode ser usado para as configurações hidrogeológicas mais complexas, exceto onde condutos de aquíferos cársticos são dominantes.</p> <p>-Permite a avaliação de efeitos naturais e humanos no sistema de água subterrânea para avaliar opções de gerenciamento.</p>	<p>-Requer alto grau de <i>expertise</i> em hidrogeologia e modelamento.</p> <p>-Menos adequado que métodos analíticos para avaliar rebaixamentos próximos a poços bombeando</p> <p>-Requer extenso banco de dados específicos do aquífero</p> <p>-Método mais caro em termos de mão de obra e coleta/análise de dados</p>

O uso do TDT requer a aplicação de modelos matemáticos capazes de simular o fluxo no sistema aquífero, resultando em linhas isócronas paralelas às linhas equipotenciais que representem os tempos de migração de moléculas de água. Para definir esses TDT, o método mais utilizado atualmente é o de rastreamento de partículas ao longo das linhas de fluxo. Tal abordagem obviamente considera a disponibilidade de dados referentes a parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, que são determinados a partir de testes de bombeamento (SETHI & MOLFETTA, 2019; FRIND & MOLSON, 2018).

Após a geração das linhas isócronas, é possível definir zonas de proteção relativas ao poço de abastecimento que auxiliam na adoção de medidas

gradualmente mais restritivas de uso do solo, à medida que a captação torna-se mais próxima (ADAMS & FOSTER, 1992). A isócrona de 50 dias é comumente utilizada para zona de proteção microbiológica (Figura 1), considerada por Wahnfried e Hirata (2005) a mais crítica em termos de saúde pública, visando restringir atividades que possam contaminar o aquífero com vírus, bactérias e parasitas patogênicos. Já para proteção contra compostos químicos persistentes, como hidrocarbonetos clorados, alguns autores definem uma isócrona de 10 anos, enquanto outros adotam toda zona de captura do poço (Figura 1) (KINZELBACH *et al.*, 1996; FOSTER *et al.*, 2006). Além das zonas supracitadas, existem outras hierarquias de PPP, como a Zona Operacional de Captação, que corresponde a um raio fixo arbitrário ao redor do poço, não permitindo nenhuma atividade que não relacionada à própria extração da água (Figura 1) (FOSTER *et al.*, 2006).

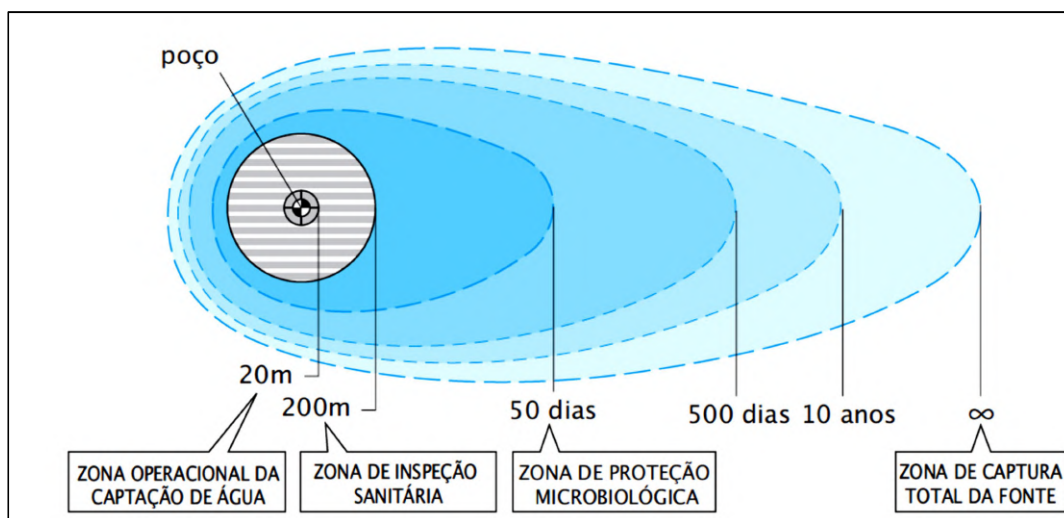


Figura 1 Esquema de Zonas de Captação de água subterrânea e dos perímetros de tempo de trânsito ao redor de um poço, em um aquífero não confinado (FOSTER *et al.*, 2006).

Ainda que o modelo de fluxo seja baseado em dados reais, é fisicamente impossível verificar em campo todos os parâmetros representados pela simulação, por isso é indispensável endereçar as incertezas, e realizar análises de sensibilidade que, ao modificar sistematicamente os valores de entrada, visam determinar os efeitos de cada parâmetro sobre o resultado das isócronas de TDT (FOSTER *et al.*, 2006; GUILLAUME *et al.*, 2016). A principal forma de

considerar as incertezas é por modelos estocásticos, conforme será visto no item 3.2.

Cleary & Cleary (1991) publicaram os primeiros trabalhos de pesquisa sobre a temática de PPP em uma instituição brasileira, na Universidade de São Paulo (USP), através de um levantamento sobre a abordagem internacional de métodos de proteção de poços de abastecimento.

O primeiro estado brasileiro a inserir na legislação a definição de PPP foi São Paulo, com a publicação do Decreto nº 32.955/91, que estabelece critérios de classificação e delimitação de áreas de proteção. No referido decreto são estabelecidas duas modalidades de perímetros de proteção:

Art. 24. “Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, que abrange raio de dez metros, a partir do campo de captação.”

Art. 25 “Perímetro de Alerta contra poluição, que adota uma distância coaxial ao sentido do fluxo, a partir do ponto de captação, equivalente ao tempo de trânsito de cinquenta dias de água no aquífero, no caso de poluentes conservativos.”

Entretanto, nenhuma concessionária responsável pelos poços de abastecimento público paulistas havia definido seus PPP até 2012, dentre outros motivos, pelo receio de que a área de restrição fosse demasiadamente grande a ponto de afetar a atividade econômica do município (CARVALHO & HIRATA, 2012).

Em Santa Catarina, onde insere-se a área de estudo, só em 2014 foi publicada, pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), a Resolução N°02/2014 (SANTA CATARINA, 2014), que dispõe sobre o uso das águas subterrâneas no referido estado, com menção à adoção de perímetro de proteção imediata:

Art. 10 “...institui um perímetro imediato de proteção sanitária, cujo o raio é definido com base em teste de bombeamento e tipo de solo, obrigando o outorgado a cercar e proteger a área,

resguardando-a da entrada ou infiltração de poluentes.”

Diversos autores já compararam as dimensões de PPP de diferentes TDT, gerados por meio de diversos métodos analíticos simples, com PPP obtidos por modelos numéricos. Os resultados são os mais variados, desde situações onde os métodos mais simples geraram os PPP mais realistas, assim como situações onde os métodos relativamente mais complexos foram os que melhor se adaptavam aos resultados do modelo numérico de referência. Em alguns casos, o mesmo método subestima a área de proteção em um local, e superestima em outro local. Fica claro nesses estudos que os resultados são dependentes das condições do meio físico da área, não sendo possível definir um método que melhor se adapte a modelos numéricos em todas as situações (PARADIS et al., 2007; MOGHEIR & TARAZI, 2010; CARVALHO & HIRATA, 2012; DONG et al., 2013; FILLECIA, 2015; LYU et al., 2019; GOODARZI & ESLAMIAN, 2019).

3.2. Modelamento numérico de água subterrânea

Modelos hidrogeológicos são representações simplificadas da realidade, que podem servir para entender fenômenos inerentes ao aquífero, ou para simular cenários de respostas a determinadas situações de *stress*, como bombeamento, recarga artificial, contaminação ou qualquer outro fator externo que altere as condições naturais do aquífero. Entretanto, os modelos podem produzir resultados equivocados se não forem elaborados e interpretados de forma correta (BEAR & CHENG, 2010; BAALOUSHA, 2011; ANDERSON et al., 2015). A elaboração de modelos numéricos de águas subterrâneas envolve algumas etapas, que estão listadas na Figura 2.

O primeiro passo da modelagem matemática de fluxo de águas subterrâneas é definir quais são os objetivos a serem alcançados com o modelo, o que irá amparar as simplificações que podem ser adotadas, bem como o modelo matemático e códigos computacionais mais apropriados (ANDERSON et al., 2015).

A segunda etapa é a definição do modelo conceitual, que consiste em uma representação qualitativa do sistema de águas subterrâneas de uma área,

a partir de uma quantidade satisfatória de dados. O modelo conceitual deve conter corpos da água superficiais, as unidades hidroestratigráficas e os limites do sistema, sendo calibrado e verificado ao longo do processo de modelagem. Seu nível de detalhe é determinado pelo objetivo do modelo, pela quantidade de dados disponíveis, e pelas limitações de transcrever as complexidades em modelos numéricos (BAALOUSHA, 2011; ANDERSON et al., 2015).

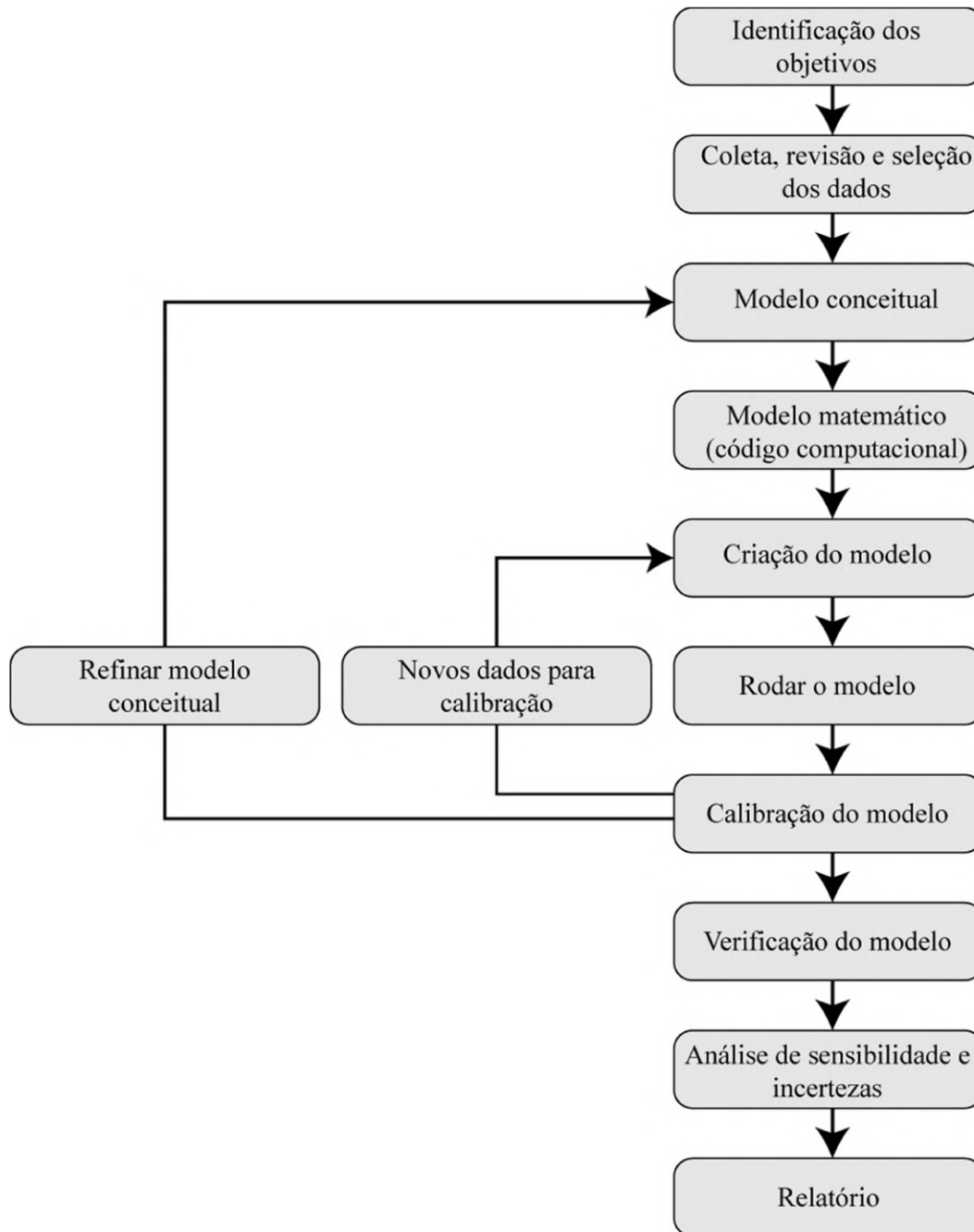


Figura 2 Fluxograma das etapas que envolvem modelamento de água subterrânea (BAALOUSHA, 2011).

Após a geração do modelo conceitual, aplicam-se as equações governantes, baseadas nas leis de Darcy e de conservação de massa, que representem processos ao longo das condições de contorno. A Lei de Darcy é a equação de movimento de um fluido em um meio poroso baseada na simplificação de algumas premissas e restrições, como nas características do fluido, nas forças atuantes no sistema, e na homogeneização de

heterogeneidades de pequena escala. A equação (3-1) representa a generalização da Lei de Darcy.

$$q = -K * gradh \quad (3-1)$$

onde, q é o vetor velocidade aparente formado por componentes nas três direções principais (X, Y e Z), K é o tensor de condutividade hidráulica (comprimento/tempo), e $gradh$ o gradiente hidráulico (adimensional) na área de estudo (CABRAL & DEMETRIO, 2008). Associada a Lei de Darcy é necessária a ideia de equilíbrio de massas da fase fluida, baseada no equilíbrio de um volume de fluido, em um domínio espacial, em um período de tempo (BAALOUSHA, 2011).

Modelos hidrogeológicos matemáticos podem ser categorizados quanto às variações no tempo, às probabilidades de ocorrência, e à natureza das equações envolvidas (Quadro 2), podendo ser resolvidos empregando-se métodos analíticos ou numéricos. Métodos analíticos são mais fáceis de processar, pois são simplificações da realidade utilizando fórmulas, geometrias do sistema e condições de contorno mais simples, aplicáveis apenas para sistemas permanentes, determinísticos e que utilizem equações lineares. Estes podem servir como guias que auxiliam a verificar se modelos numéricos complexos foram codificados corretamente, por meio de uma comparação prévia dos resultados. Apesar de modelos analíticos serem mais simples que modelos numéricos, os primeiros também podem ser utilizados para resolver problemas relativamente mais complexos de fluxo de água subterrânea. É o caso de Modelos de Elementos Analíticos (MEA), que faz uso do princípio da sobreposição de múltiplas soluções analíticas, e que depende da linearidade da equação diferencial de Laplace para sua aplicação. Entretanto, para aquíferos livres, o uso de MEA não é adequado para solucionar problemas relativos a cargas hidráulicas, pois a equação diferencial nesse caso não é linear, impossibilitando a sobreposição de soluções. (HAITJEMA, 1995; CABRAL & DEMETRIO, 2008; ANDERSON *et al.*, 2015).

Ao contrário de modelos analíticos, modelos numéricos não são necessariamente constantes no tempo e no espaço, para os quais se permite a realização representações de sistemas hidrogeológicos transientes e heterogêneos, dentro de condições de contorno complexas (ANDERSON *et al.*,

2015). Na sequência deste item serão abordados aspectos referentes a modelos numéricos.

Quadro 2 Diferentes abordagens de aplicação de modelos matemáticos (Cabral & Demetrio, 2008).

Classificação	Tipo de modelo	Características
Quanto à variação no tempo	Permanente	As cargas hidráulicas não variam ao longo do tempo.
	Transiente	As cargas hidráulicas variam ao longo do tempo.
Quanto às probabilidades de ocorrência	Determinístico	Considera que os eventos não dependem da teoria das probabilidades.
	Estocástico	Atribui uma probabilidade de ocorrência a cada evento.
Quanto às equações	Linear	Pode ser aplicado o princípio da superposição.
	Não-linear	

Os métodos numéricos mais comumente utilizados são o de diferenças finitas e de elementos finitos, os quais discretizam nós com seus respectivos valores de carga hidráulica na área modelada (ANDERSON *et al.*, 2015). O Quadro 3 aponta as principais diferenças entre esses dois métodos numéricos quando aplicados no modelamento de fluxo de água subterrânea.

Após a definição das equações governantes e dos métodos numéricos a serem adotados, inicia-se a construção do modelo. Essa etapa resume-se em traduzir o modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo em um modelo numérico de fluxo da água subterrânea, com a definição da malha do modelo, das configurações dos limites do domínio do modelo, da definição dos parâmetros do aquífero e, para modelos transientes, das condições iniciais de determinados parâmetros, como cargas hidráulicas e taxa de recarga (ANDERSON *et al.*, 2015).

Quadro 3 Principais diferenças entre os métodos de Elementos Finitos e de Diferenças Finitas (Baalousha, 2011).

	Elementos Finitos	Diferenças finitas
Limites do modelo	Incorpora limites irregulares e curvados	Difícil de incorporar limites irregulares
Nós	Nos vértices e fronteiras de fluxo	Localizados no centro das células
Construção da malha	Difícil de gerar uma malha eficiente	Fácil de construir a malha
Anisotropia	Facilmente de incorporar	Difícil de incorporar
Acurácia	Aceitável	Mais acurado especialmente no modelamento de transporte de solutos
Tempo de processamento	Tempo requerido aceitável	Tempo pode ser longo em modelos 3D

A calibração é a etapa que auxilia a estabelecer a legitimidade do modelo conceitual e do modelo numérico associando as observações de campo com o modelo gerado, por meio do ajuste dos parâmetros iniciais de entrada. Existem métodos de calibração automática que trazem eficiência ao processo de modelamento, porém tais métodos possuem suas limitações, como por exemplo, o número de parâmetros a serem ajustados não deve superar o número de observações de carga hidráulica em campo. (FERRARI, 2006; ANDERSON *et al.*, 2015).

Modelos de água subterrânea enfrentam um problema em comum: o mundo real sempre será mais complexo do que o que está sendo representado. Erros estruturais sempre existirão independentemente dos esforços de caracterização e parametrização. Por isso, modelos devem ser tratados como ferramentas de redução de incertezas de previsões, e não como representações da realidade (HUNT & WELTER, 2010). As incertezas em modelos de águas subterrâneas são decorrentes de diversos fatores relacionados à representação dos processos hidrogeológicos, desde os reconhecidamente desconhecidos, bem como os “desconhecidos desconhecidos”, descrito por Hunt & Welter (2010) como “coisas que não sabemos que desconhecemos”

Anderson & Woessner (1992) enfatizam que como não é possível saber a distribuição exata dos parâmetros no domínio de um modelo, torna-se

necessária uma análise de sensibilidades, com o propósito de se quantificar as incertezas do modelo calibrado causadas pelas incertezas da estimativa dos parâmetros do aquífero, e das condições de contorno.

A abordagem mais rigorosa para endereçar as incertezas é utilizando-se uma modelagem estocástica, já que esta emprega uma distribuição probabilística de parâmetros de entrada do modelo. A aplicação dessa metodologia envolve três passos: (1) gerar múltiplas realizações de determinados parâmetros de interesse, por meio de um procedimento probabilístico; (2) solucionar a equação governante de forma determinística para cada realização por métodos numéricos padrões; (3) analisar estatisticamente a solução de quantas realizações forem necessárias. O resultado final para perímetros de proteção de poços baseados em tempos de trânsito, por exemplo, é a geração não de isócronas individuais, mas sim de intervalos de confiança para cada perímetro de proteção (MOTSOPOULOS *et al.*, 2007; VASSOLO *et al.*, 1998; FOSTER *et al.*, 2006; ANDERSON *et al.*, 2015).

4. Materiais e Métodos

4.1. Área de estudo

4.1.1. Localização

A área de estudo está situada no sudeste do estado de Santa Catarina, no município de Jaguaruna, às margens da rodovia SC100, nas imediações da planta de abastecimento público localizada nas coordenadas UTM Datum SIRGAS2000 zona 22s, 6832464N / 70267E. O município de Jaguaruna tem como municípios limítrofes Laguna e Tubarão a norte, Treze de Maio e Sangão a oeste, e Içara e Balneário Rincão a sul.

4.1.2. Aspectos climáticos

Jaguaruna está inserida na região de clima temperado húmido com verão quente segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresentando uma média

anual de temperatura entre 18° e 20°C, de umidade relativa do ar entre 80 e 82%, de evapotranspiração entre 901 e 950 mm e de precipitação entre 1400 e 1500 mm (EMBRAPA,2012).

4.1.3. Aspectos socioeconômicos

O município de Jaguaruna possui uma população de aproximadamente 20.000 habitantes, segundo estimativa do IBGE para o ano de 2020, com 77% de domicílios com esgotamento sanitário adequado (IBGE, 2021). O setor de serviços corresponde a 58% da riqueza gerada no município, seguido pelos setores primário e secundário, com 22 e 20% respectivamente (MARTINS *et al.*, 2017)

Em 2016, a Prefeitura outorgou à empresa Jaguaruna Saneamentos Ltda. o direito de operar por 40 anos no abastecimento de água de dois balneários: Garopaba do Sul e Camacho. A empresa faz a captação através de oito poços tubulares distribuídos em uma área de aproximadamente 47000 m² (Figura 3).

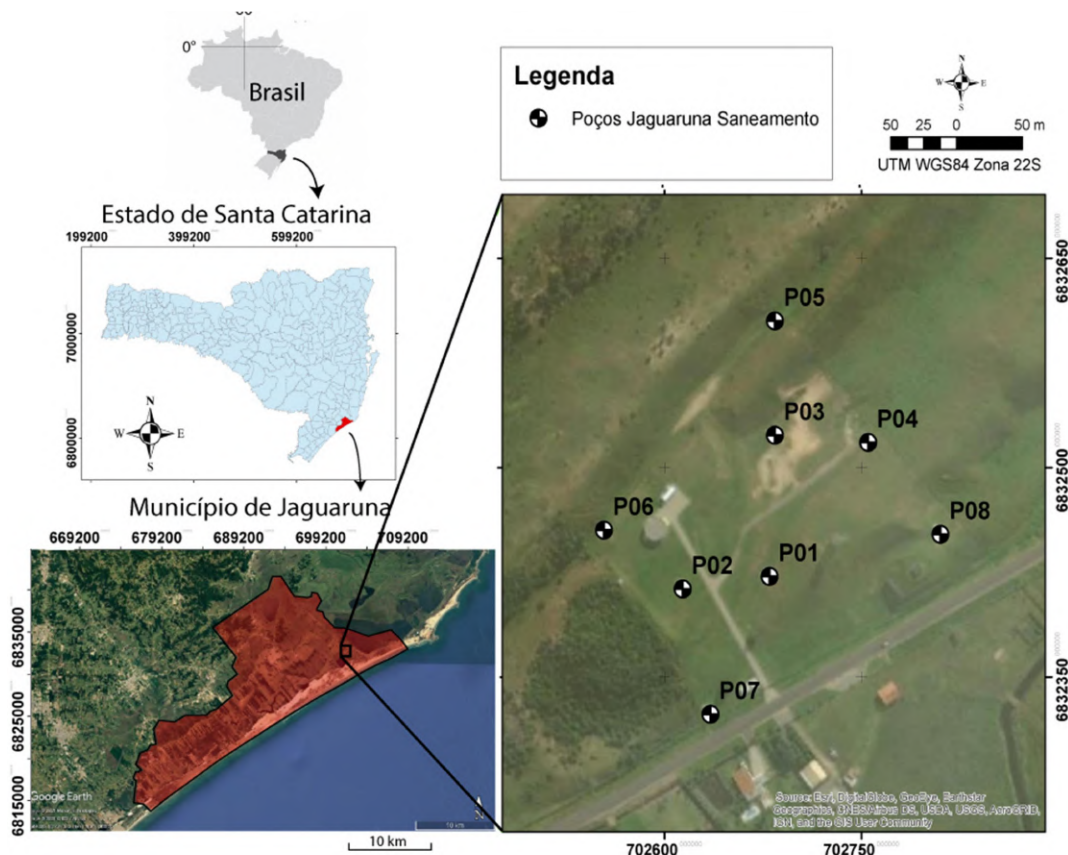


Figura 3 Mapa de localização dos poços da Jaguaruna Saneamento.

4.2. Modelamento de fluxo de água subterrânea

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário realizar um modelo numérico de fluxo da água subterrânea da região de estudo. Para tal, seguiu-se a lógica sequencial de construção de modelo hidrogeológico apresentada na Figura 2.

4.2.1. Modelo conceitual da área

A elaboração do modelo conceitual contou com uma extensa revisão bibliográfica e duas campanhas de campo: a primeira para reconhecimento da geologia local, no dia 15 de junho de 2020, e a segunda para estimativa das variações das cargas hidráulicas dos corpos d'água superficiais dentro do domínio de estudo, com o uso do GPS sistema GNSS S86T RTK, no dia 24 de outubro de 2020 (Figura 4 e Figura 5).



Figura 4 Campanha de campo com o uso do GPS sistema GNSS S86T RTK, para coleta das cargas hidráulicas dos corpos d'água superficiais.

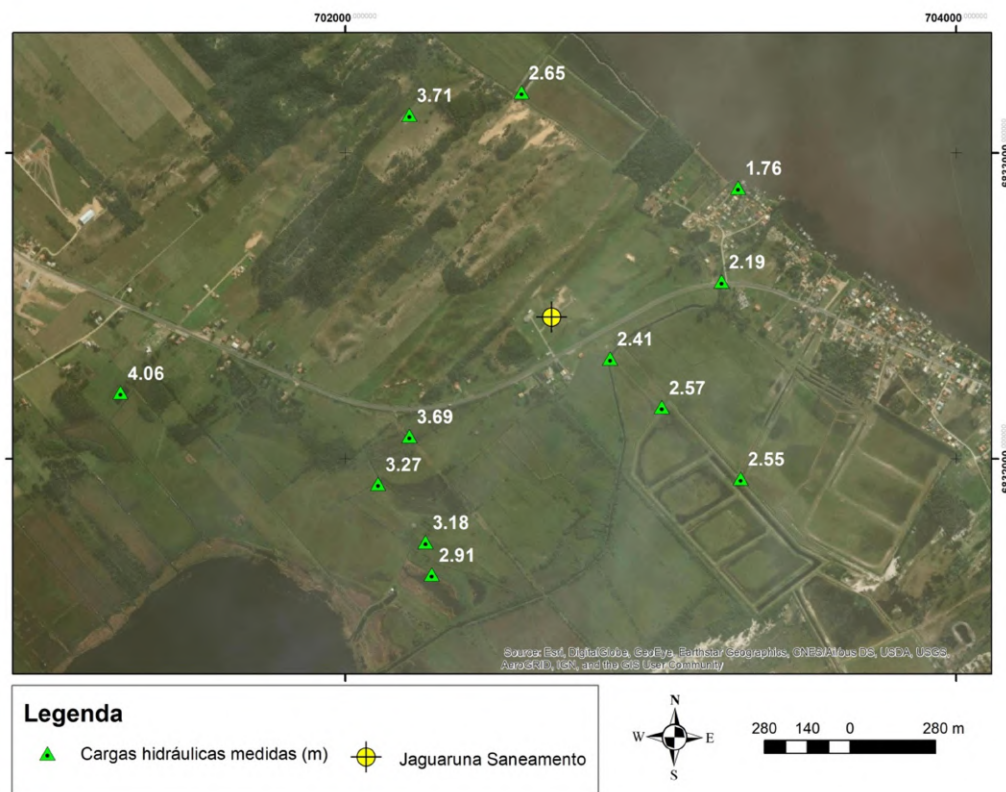


Figura 5 Mapa de localização dos pontos de coleta de dados de cargas hidráulicas em corpos d'água superficiais.

No modelo conceitual foram inseridos os oito poços de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamento, e suas respectivas vazões no dia e horário que foi realizada a campanha de campo de coleta das cargas hidráulicas das

águas superficiais (Tabela 1). Dados referentes aos níveis d'água estavam disponíveis para apenas cinco dos oito poços para o dia da campanha de campo, que foram convertidos para carga hidráulica e também são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Dados referentes aos poços de bombeamento.

Nome	Coord. X	Coord. Y	Cota topo filtro (m)	Cota base do filtro (m)	Vazão (m ³ /d)	Carga Hidráulica (m)
P01	702680	6832422	-1.83	-15.83	0	-
P02	702614	6832413	0.2	-15.8	39	-1,22
P03	702684	6832523	-1.44	-15.44	360	-
P04	702755	6832518	-2.81	-16.81	50	0,4
P05	702684	6832605	0.38	-17.62	387	-8,24
P06	702554	6832455	-1.05	-17.05	50	1,11
P07	702635	6832323	-0.57	-15.57	52	2,4
P08	702810	6832451	-2.5	-18.5	0	-

Os dados obtidos durante a etapa de licenciamento dos poços de captação foram essenciais para o entendimento do meio físico da área. Corresponderam a descrições litológicas de sondagens, análises granulométricas e de porosidade total e efetiva de amostras de solos/sedimentos coletadas em sondagens, ensaios de bombeamento e análises físico-químicas da água bombeada pela planta de abastecimento.

Para a compreensão da distribuição da superfície topográfica dentro do domínio do modelo, foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT) com o uso dos *softwares* ArcGIS 10.3® (ESRI, 2011) e Surfer 16® (GOLDEN SOFTWARE, 2018), combinando-se um levantamento planialtimétrico realizado dentro da planta de abastecimento a imagens do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite-1*), obtidas pelo sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), com resolução espacial de 12,5 m (Figura 6).

O primeiro passo na construção do modelo conceitual foi definir o domínio do modelo em três dimensões. Em planta, o domínio foi delimitado principalmente por corpos d'água, como drenagens próximas a Lagoa da Encantada a sudoeste, a Lagoa da Garopaba a leste e nordeste, e o mar a sudeste (Figura 7).

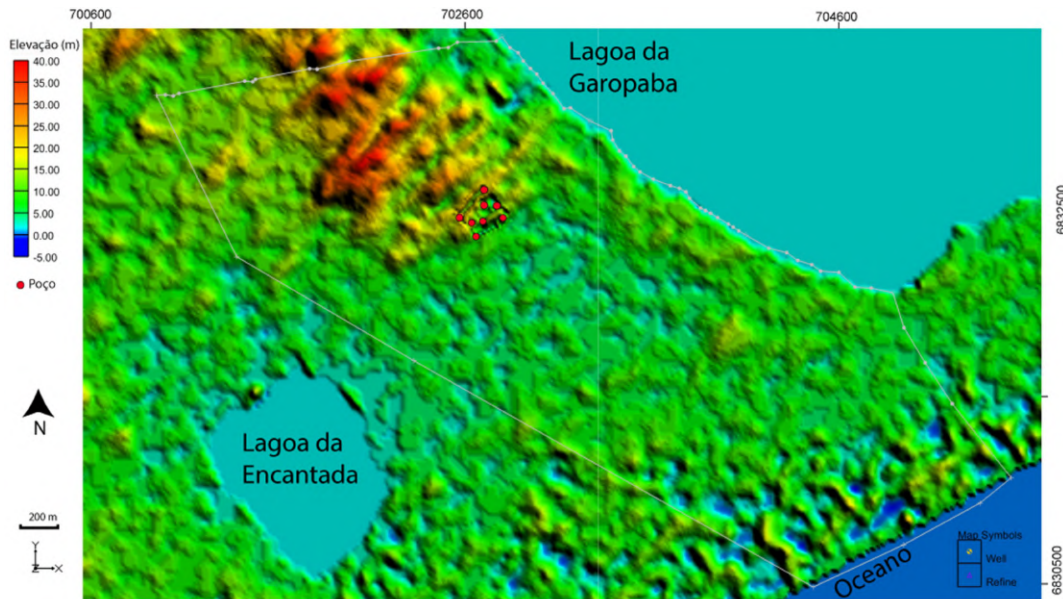


Figura 6 Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo.

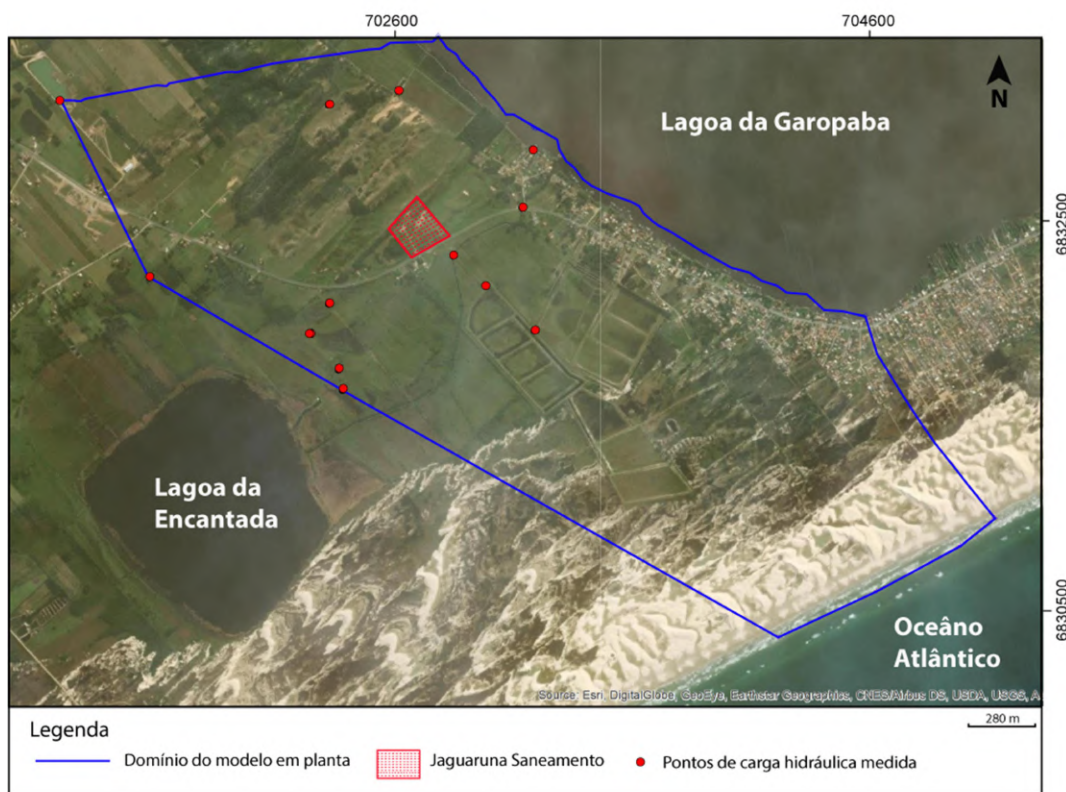


Figura 7 Representação do domínio do modelo em planta, e a disposição dos pontos de coleta das cargas hidráulicas com GPS RTK, e localização da planta de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamento.

A etapa de delimitar o domínio verticalmente depende do conhecimento sobre as unidades hidroestratigráficas da área, que foi obtido por meio dos

perfis geológicos dos poços de abastecimento, de cavas abertas por processos de mineração de areia e cortes com exposição do substrato às margens de estradas e cursos d'água. As unidades hidroestratigráficas estão relacionadas às litologias descritas no item 5.2, sendo usada a mesma nomenclatura apresentada na Figura 15, diferenciando-se apenas pelo agrupamento das duas camadas de argila da base do perfil, em apenas uma denominada de "Argila" (Figura 8). A camada de turfa arenosa está presente apenas na área dos poços, devido à provável geometria lenticular desta unidade. A principal camada aquífera é a denominada de "Areia branca média".

O topo do domínio foi delimitado pela superfície topográfica, e a base foi estabelecida na cota altimétrica -25 m em relação ao nível relativo do mar, na camada de argila, há aproximadamente 4 m de profundidade em relação ao topo da mesma. Esse limite basal foi definido com base nos perfis construtivos dos poços que apresentaram a camada de argila com pelo menos 4 m de espessura.

A etapa seguinte foi atribuir os parâmetros hidrodinâmicos às respectivas litologias. Valores de condutividades hidráulicas e porosidade efetiva da principal camada aquífera foram inicialmente definidos a partir dos ensaios de bombeamento e ensaios laboratoriais. Para os parâmetros que não puderam ser medidos diretamente em campo, como a condutividade hidráulica das outras litologias presentes no domínio, a condutância do fundo da Lagoa de Garopaba ou mesmo as taxas de recarga e evapotranspiração, atribuíram-se valores amparando-se em resultados de trabalhos encontrados na literatura, que foram e posteriormente ajustados na etapa de calibração do modelo.

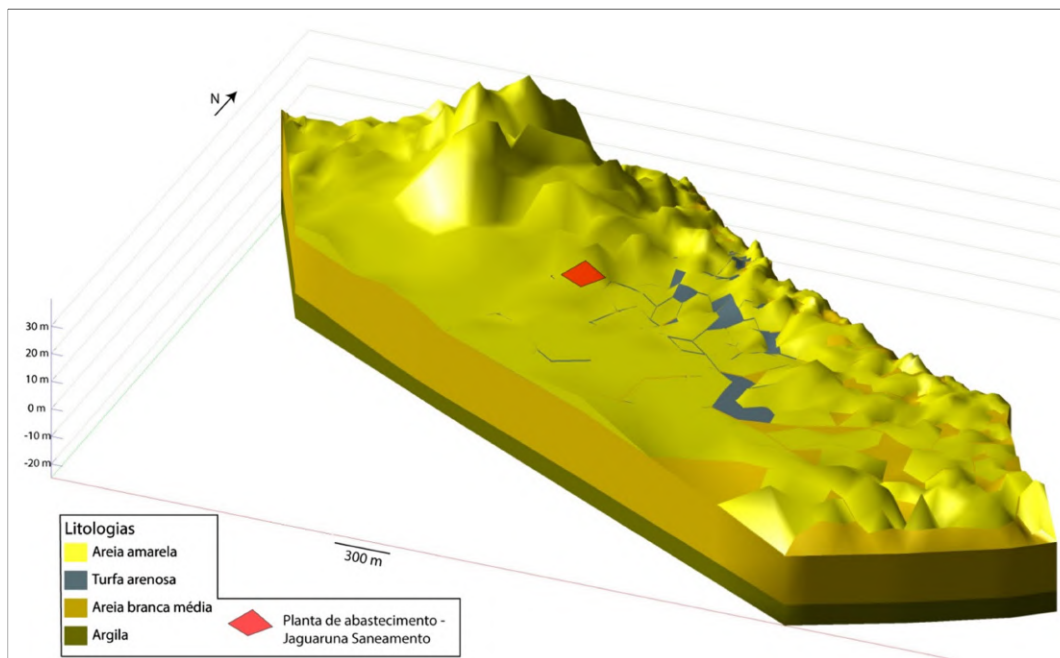


Figura 8 Domínio em 3D e distribuição das litologias. Exagero vertical de 15 vezes.

A definição do modelo conceitual foi concluída com o reconhecimento da geometria do aquífero e seus parâmetros hidrodinâmicos, dos elementos que controlam as condições de contorno do modelo, e informações quanto à saída e entrada de água no sistema.

4.2.2. Modelo numérico

A partir daí, iniciou-se a construção do modelo numérico, que tem como característica a tradução do modelo conceitual para o algoritmo utilizado. O modelo numérico foi construído por meio do *software Groundwater Modeling System* (GMS) (AQUAVEO, 2014), que utiliza o código das diferenças finitas MODFLOW2000 (HARBAUGH *et al.*, 2000) desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano (*United States Geological Survey - USGS*).

Dentre os principais passos de construção do modelo matemático, listam-se a definição do tipo de modelo que será empregado, e a discretização da malha e das condições de contorno do modelo. A malha do modelo numérico da área de estudo possui maior discretização nas intermediações dos poços, tornando-se gradualmente menos refinada com o distanciamento dos mesmos (Figura 9). Ela ficou constituída por um total de 148 colunas (direção norte-sul),

195 linhas (direção leste-oeste) e 10 camadas numéricas (Figura 10 Seção vertical nas imediações dos poços de abastecimento. Malha com menor espaçamento marca o local dos poços., resultando em 288.600 células na malha 3D.

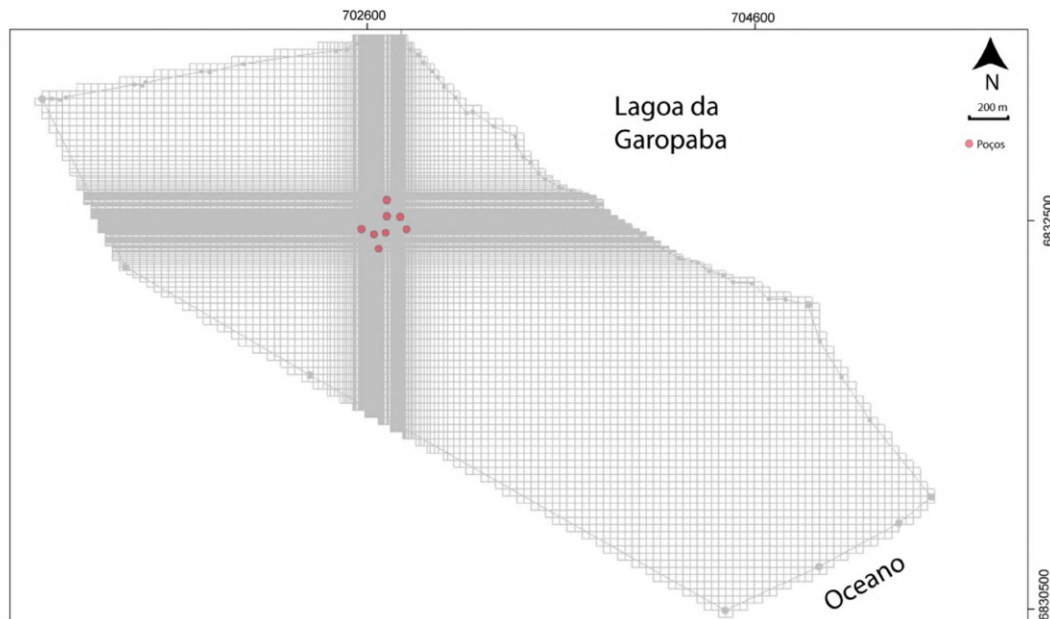


Figura 9 Malha do modelo em planta, com maior discretização na região dos poços.

A malha vertical foi definida para coincidir com as unidades hidroestratigráficas por meio da ferramenta *Grid Overlay with Equivalent K*, que para cada coluna vertical o GMS define o topo e a base da malha, estabelecendo as elevações de cada célula entre esses dois extremos por meio de uma interpolação linear. A partir dessa definição, o programa busca as condutividades hidráulicas (K) das camadas hidroestratigráficas mais próximas ao centro de cada célula. Quando uma célula encontra mais de uma unidade ela automaticamente calcula um valor de K personalizado, possibilitando que camadas com espessuras consideravelmente menores que as espessuras das células possam ser representadas.

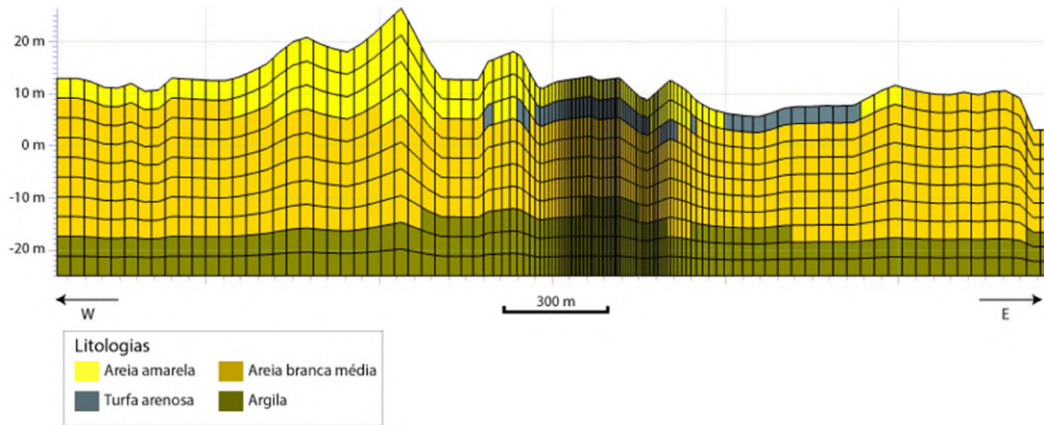


Figura 10 Seção vertical nas imediações dos poços de abastecimento. Malha com menor espaçamento marca o local dos poços.

Quanto às condições de contorno empregadas, nos limites norte, oeste e sul utilizou-se a condição de contorno do Tipo I, ou carga hidráulica específica. Os dados de carga utilizados foram os coletados durante a campanha de campo, bem como do marégrafo de Imituba para o limite sudeste do modelo. Já nos limites nordeste e leste, às margens da Lagoa da Garopaba, foi utilizada a condição de contorno do Tipo III, ou fluxo dependente de carga (Figura 11). Na condição de contorno do Tipo III, no *software* GMS, foi aplicado o pacote Rio, que simula a troca entre águas superficiais e subterrâneas. Nesse caso, além da carga hidráulica da água superficial, é necessário informar a profundidade do canal da drenagem e a condutância do material presente em seu fundo.

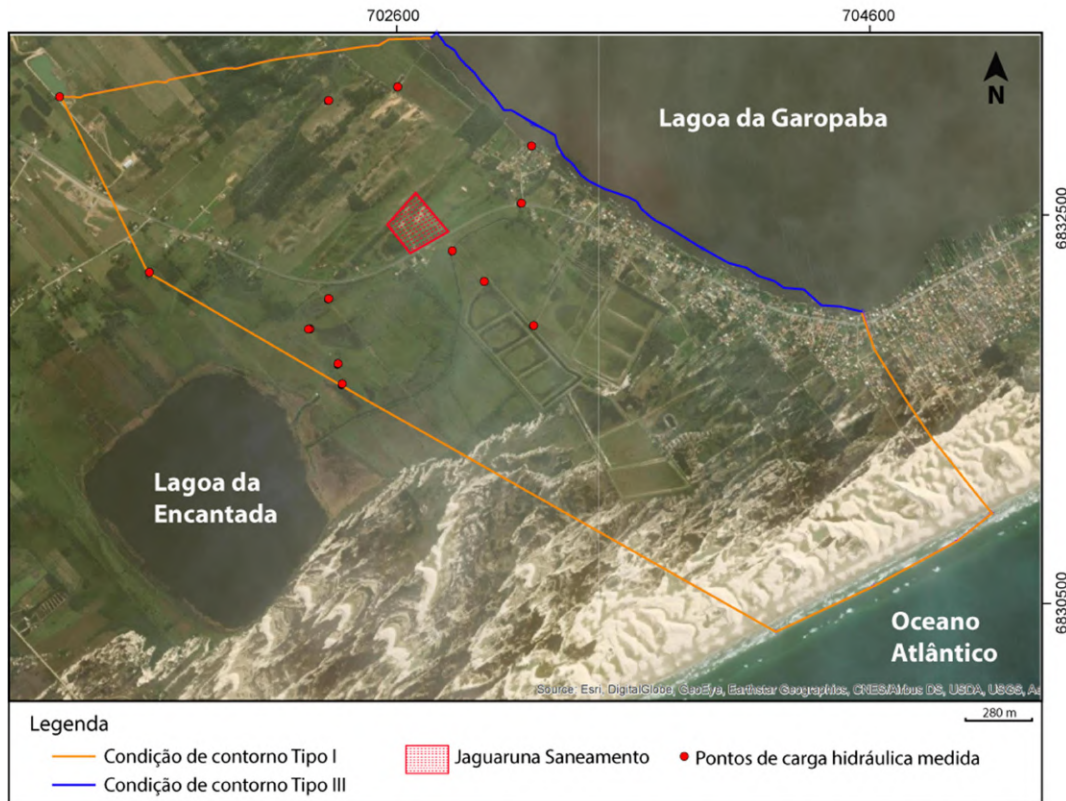


Figura 11 Condições do contorno do modelo em planta.

4.2.3. Calibração do modelo

Para considerar o modelo calibrado, inicialmente buscou-se um equilíbrio do balanço de massa de água, ou seja, paridade entre a massa que entra e a massa que sai do sistema. Para tanto, estipulou-se um erro de desvio admissível para o balanço de massa menor do que 1%. A calibração do modelo propriamente dita pode ser verificada pelo erro médio quadrático normalizado (EMQN), para o qual se admitiram valores inferiores a 10%. O EMQN é uma forma de avaliar a qualidade do modelo comparando-se cargas hidráulicas observadas em campo com cargas calculadas pelo modelo, e sua fórmula é apresentada na Equação (4-1).

$$\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{ci})^2}{n}}}{(h_{max} - h_{min})} \quad (4-1)$$

onde, h é a carga hidráulica observada no ponto i ; hc é a carga calculada pelo modelo no ponto i ; n é o número de pontos observados; $hmax$ é a maior carga observada e $hmin$ é a menor carga observada.

Inicialmente a calibração do modelo foi realizada de forma manual, mediante ajustes no modelo conceitual por tentativa e erro. Após um refinamento inicial dos parâmetros de entrada, realizou-se a calibração automatizada utilizando-se o módulo PEST - *Parameter Estimation* (DOHERTY, 1994) do *software* GMS, o qual simula iterativamente cada parâmetro, dentro de uma faixa de valores pré-definida, até atingir as menores diferenças entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo e aquelas observadas em campo, mantendo-se o balanço de massa do sistema. Quando os valores dos parâmetros ajustados pelo programa são razoáveis, dentro da variação que se espera pelo modelo conceitual, o balanço de massa é próximo da neutralidade e a diferença entre as cargas observadas em campo e calculadas numericamente está abaixo do critério aceitável, o modelo está calibrado (FERRARI, 2006).

4.2.4. Análise de sensibilidade

O *software* GMS apresenta automaticamente a análise de sensibilidade dos parâmetros quando é aplicado o módulo PEST, realizada mediante uma análise das variações das cargas hidráulicas no modelo em resposta às simulações feitas com cada parâmetro. Como resultado, a análise de sensibilidade apresenta os efeitos que a variação de cada parâmetro tem no resultado final do modelo (ANDERSON & WOESSNER, 1992).

4.2.5. Modelo estocástico

Conforme mencionado no item 3.2, o uso de modelos estocásticos é a principal forma de visualizar as incertezas presentes em modelos matemáticos. Diferentemente de modelos determinísticos, em que cada parâmetro possui um único valor, desconsiderando quaisquer erros ou desvios dos mesmos, em modelos estocásticos os parâmetros podem ser inseridos em faixas de valores,

determinando o máximo, o mínimo e o valor médio esperado para cada. Isso permite a geração de uma curva de distribuição probabilística, da qual são amostrados valores a serem empregados nos modelos. Existem diferentes metodologias de amostragem em modelos estocásticos, e as principais são a amostragem aleatória e a amostragem estratificada (CLARICH & RUSSO, 2019). No presente estudo foi utilizada a estratificada, conhecida como amostragem por hipercubo latino (MCKAY *et al.*, 1979; IMAN & CONOVER, 1980), a qual divide a curva de distribuição normal de cada parâmetro em intervalos de probabilidades iguais e, então, é amostrado um valor em cada subdivisão da curva (Figura 12)(AQUAVEO, 2016a). Esse método de amostragem é mais eficiente que o de amostragem aleatória, pois garante que uma gama maior de resultados possíveis seja gerada por um menor número de amostragens (GOOVAERTS, 2007).

O resultado é uma série de modelos diferentes que possuem a mesma probabilidade de ocorrência. Com essa série de modelos é possível estimar a probabilidade de um determinado resultado ser verdadeiro, refletindo em um modelo mais transparente quanto às incertezas presentes (AQUAVEO, 2016a).

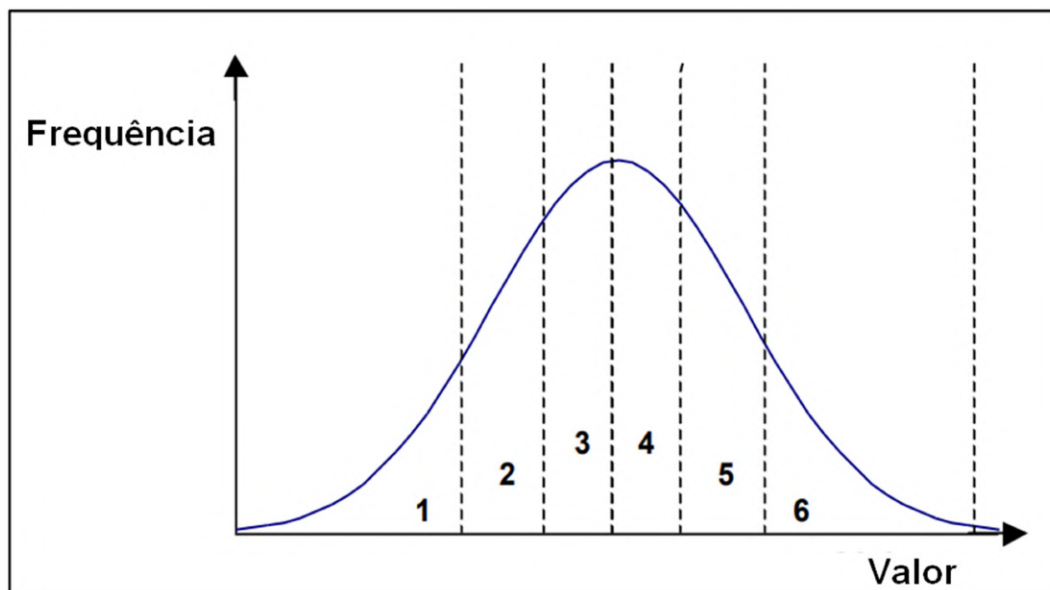


Figura 12 Distribuição normal dividida em seis segmentos de amostragem por hipercubo latino. (AQUAVEO, 2016a).

A média, o desvio-padrão, os valores máximos e mínimos, e o número de segmentos que a curva normal é subdividida são determinados para cada um dos parâmetros. Quanto mais subdivisões da curva normal são feitas,

exponencialmente mais simulações são realizadas, aumentando assim o tempo de processamento dos modelos.

As primeiras simulações dos modelos estocásticos foram realizadas com apenas um ou dois parâmetros por vez, divididos em três segmentos de amostragem, e então foi avaliada a sensibilidade do modelo à variação de cada parâmetro. Em seguida, optou-se por processar um modelo estocástico com todos os parâmetros, no qual os parâmetros que apresentaram menor sensibilidade foram amostrados em apenas um segmento da curva normal, e os de maior sensibilidade amostrados em dois segmentos, resultando em um total de 256 interações.

A Tabela 2 Dados de entrada para rodar o modelo estocástico usando o método de amostragem hipercubo latino, no software GMS, apresenta os dados de entrada para rodar o modelo estocástico. Estes foram definidos por meio da análise das faixas de valores que apresentaram, durante a etapa de calibração do modelo, melhores resultados em termos de convergência e menores erros de EMQN e de balanço de massa.

Tabela 2 Dados de entrada para rodar o modelo estocástico usando o método de amostragem hipercubo latino, no software GMS.

Parâmetro	Valor (m/dia)	Máx. (m/dia)	Mín. (m/dia)	Desvio padrão (m/dia)	Número de segmentos
K horiz. Argila	0,00992	0,011	0,009	0,0005	1
K vert. Argila	0,000996	0,0011	0,0009	0,00005	2
K horiz. Areia branca média	1,38	2	1	0,25	2
K vert. Areia branca média	0,0988	0,15	0,075	0,01875	1
K horiz. Turfa arenosa	0,685	1,4	0,5	0,225	2
K vert. Turfa arenosa	0,2376	0,5	0,1	0,1	2
K horiz. Areia amarela	0,3608	1,4	0,2	0,3	2
K vert. Areia amarela	0,216	0,5	0,1	0,1	2
Recarga	0,0003	0,0007	0,00017	0,0001325	2
Evapotranspiração	0,007681	0,009	0,004	0,00125	2
Número de interações:					256

4.3. Perímetro de Proteção de Poços (PPP)

A partir da definição do modelo conceitual, selecionaram-se os principais métodos para delimitação dos PPP que utilizam Tempo de Trânsito – TDT (*Time of Travel –TOT*) como forma de medida. Como o estado de Santa

Catarina não possui legislação específica sobre TDT para delimitar PPP, foram adotados os TDT de 50 dias, conforme o Art. 25 do Decreto n° 32.955/91, do Estado de São Paulo, para o Perímetro de Proteção Microbiológica, e o TDT de 10 anos para proteção contra contaminantes persistentes, que, segundo Foster *et al.* (2006), muitas vezes coincide com a zona de captura dos poços. Essa premissa também foi testada, buscando elucidar se em situações hidrogeológicas semelhantes à do presente estudo é possível utilizá-la.

O presente estudo apresenta diferentes análises sobre os métodos de delimitação de PPP que usam TDT como forma de medida. Inicialmente são aplicados os diferentes métodos de delimitação de PPP, e então comparados os resultados em duas situações: múltiplos poços em operação simultaneamente dentro de uma planta de abastecimento, e apenas um poço em operação, visando compreender qual melhor método em cada uma destas situações. O método usado como referência para as comparações é o modelo numérico MODFLOW-MODPATH, por ser o que melhor representa as condições hidrogeológicas locais.

Outra análise realizada no presente estudo é quanto ao comportamento das dimensões de uma zona total de captura de um poço, quando sujeita a um *stress* devido à redução na taxa de recarga do aquífero. E por último, uma breve avaliação quanto ao uso do TDT de 10 anos como substituição da zona total de captura no aquífero costeiro do sul de Santa Catarina.

Para os métodos que exigem uma etapa de calibração, esta foi feita usando as vazões dos poços do dia da campanha de campo de coleta de cargas hidráulicas com o GPS RTK. Entretanto, para que os PPP sejam efetivamente protetivos para todos os poços, a vazão usada em todos os métodos na construção dos PPP foi a máxima licenciada (Tabela 3).

Tabela 3 Dados referentes às vazões máximas licenciadas, e a espessura dos filtros dos oito poços de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamento.

Poço	Vazão (m ³ /dia)	Espessura do filtro (m)
P01	360	14
P02	420	16
P03	360	14
P04	360	14
P05	348	18
P06	360	16
P07	360	15
P08	360	16

A seguir são descritas as metodologias de delimitação de PPP que foram comparadas nos presente estudo.

4.3.1. Método de referência: MODFLOW-MODPATH

Para a delimitação dos perímetros de proteção de poços de referência foi utilizada a interface MODPATH (POLLOCK, 2017) do MODFLOW, que é um módulo de pós-processamento de rastreamento de partículas desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano (*USGS*). O rastreamento de partículas é realizado por meio da inserção de uma ou mais partículas em cada célula do modelo, rastreando quais que atingem o poço em determinadas condições pré-estabelecidas de vazão e tempo de trânsito. Essa operação é feita em todas as soluções geradas de forma estocástica, e então, através da ferramenta de análise de riscos (*Risk Analysis*) do *software* GMS, calcula-se a probabilidade para cada célula de possuir uma partícula que possa atingir o poço (AQUAVEO, 2016b).

4.3.2. Raio Fixo Calculado (RFC)

O método de Raio Fixo Calculado (RFC) é baseado na premissa de que o volume de água bombeada que entra no poço flui igualmente de todas as direções para a seção filtrante. É gerada uma isócrona circular, calculada em relação a um valor específico de tempo de trânsito, que se estende em

profundidade ao redor de toda seção filtrante do poço, em forma cilíndrica (LIU *et al.*, 2019; USEPA, 1994).

Para determinar o raio (r) em relação a um tempo de trânsito (t) aplica-se a Equação (4-2):

$$r = \sqrt{\frac{(Qt)}{\pi nH + N\pi t}} \quad (4-2)$$

na qual,

r = Raio da zona de captura

Q = Vazão do poço

t = Tempo de trânsito

n = Porosidade efetiva

H = Espessura do aquífero

N = Taxa de infiltração

Kraemer & Haitjema (2018) recomendam que, para aquíferos livres, a espessura saturada do aquífero seja substituída pelo comprimento da seção filtrante do poço, para evitar resultados que subestimem as dimensões dos PPP.

4.3.3. Equação de Fluxo uniforme (EFU)

Diferentemente do RFC, que gera linhas isócronas circulares em relação ao poço de captação, a Equação de Fluxo Uniforme (EFU) é usada para delimitar PPPs em locais em que o bombeamento de um poço resulta em um cone de depressão assimétrico, devido ao gradiente hidráulico. Com isso, as fronteiras a montante e a jusante da zona de contribuição e dos PPP são calculadas individualmente. O limite a montante da zona de contribuição, em um poço que opera constantemente, coincide com o limite do aquífero. Já para delimitar um PPP a partir de um TDT específico, calcula-se r_x , que representa a distância do poço dos limites a montante e a jusante, para assim delimitar a zona de proteção (LIU *et al.*, 2019; USEPA, 1994; TODD & MAYS, 2004).

Segundo Todd & Mays (2004), as equações que governam esse método são:

$$XL = -\frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (4-3)$$

$$YL = \pm \frac{Q}{2Kbi} \quad (4-4)$$

$$tx = \frac{n}{Ki} \left[rx - \left(\frac{Q}{2\pi Kbi} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2\pi Kbi}{Q} \right) rx \right\} \right] \quad (4-5)$$

na qual,

XL = *Limite de fluxo a jusante*

YL = *Largura máxima da zona a montante*

tx = *Tempo de trânsito*

rx = *Distância do limite a montante (+) ou do limite a jusante (-)*

K = *Condutividade hidráulica*

b = *Espessura da zona saturada*

i = *Gradiente Hidráulico*

n = *Porosidade do aquífero*

Q = *Vazão de bombeamento*

Entretanto, o software WhAEM, descrito no item 4.3.4, possui uma solução própria de calcular PPP pelo método EFU, adaptando as equações descritas por Todd & Mays (2004), e exigindo para sua aplicação os seguintes dados de entrada:

- Sentido do fluxo da água subterrânea (azimute);
- Gradiente hidráulico;
- Transmissividade do aquífero;
- Taxa de bombeamento do poço;
- Tempo de trânsito de interesse.

4.3.4. Método WhAEM

WhAEM (USEPA, 2018) é um programa gratuito desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para facilitar o mapeamento da zona de captação e de PPP, utilizando métodos analíticos e semi-analíticos. Sua Interface Gráfica do Usuário (*Graphical User Interface* –

GUI) é do *Visual Basic* (VB6) e o código de elemento analítico é escrito em *Fortran*.

O WhAEM inclui os métodos de RFC e EFU, além de possuir suas soluções próprias, de natureza analítica e semi-analítica, para modelar poços com bombeamento fixo, conseguindo também estabelecer a influência de limites hidrogeológicos (LYU *et. al.*, 2019). O programa carece em alguns aspectos quando comparado a outros programas de modelamento numérico de água subterrânea, como, por exemplo, na capacidade de representar variações nas cotas de base do aquífero ou fluxo em mais de um aquífero ou mesmo permitir transigência de certas variáveis. Por outro lado, tal codificação simplificada resulta em um programa mais fácil de operar, e permite processar modelos de forma mais rápida (KRAEMER & HAITJEMA, 2018).

4.3.4.1. Solução analítica WhAEM (Simple WHPA)

O programa possui a opção de gerar PPP simples (*Simple Wellhead Protection Area*), baseada em uma série de soluções analíticas simples, que possibilita gerar PPP tanto para um poço quanto para múltiplos poços. Os dados de entrada necessários correspondem a:

- Transmissividade;
- Gradiente hidráulico;
- Condutividade hidráulica;
- Porosidade específica;
- Espessura do aquífero;
- Sentido de fluxo da água subterrânea na área dos poços;
- Tempo de trânsito;
- Vazão dos poços.

Kraemer & Haitjema (2018) descrevem como são gerados os PPP pela solução analítica *Simple WHPA*, a qual requer a definição da magnitude do fluxo uniforme da água subterrânea (Q_0 [m²/dia]), estimada mediante o produto entre condutividade hidráulica (K [m/dia]), gradiente hidráulico (i) e espessura do aquífero (H [m]). Os passos descritos pelos autores são apresentados a seguir.

$$Q_0 = K * i * H \quad (4-6)$$

A forma e o tamanho do PPP são relacionados ao parâmetro adimensional T , definido como:

$$T = \frac{t}{t_0} \quad (4-7)$$

onde, t é o tempo de trânsito desejado e t_0 é o tempo de referência definido como:

$$t_0 = \frac{nHQ}{2\pi Q_0^2} \quad (4-8)$$

onde, n é a porosidade do aquífero, H é a espessura do aquífero e Q (m³/dia) é a vazão do poço.

Quando $T < 0,1$ calcula-se o PPP por um raio fixo (R) partindo do poço através da seguinte equação:

$$R = 1.1543 \sqrt{\frac{Qt}{\pi Hn}} \quad (4-9)$$

Quando $0,1 < T < 1$, PPP é calculado por um raio fixo partindo do poço através da seguinte equação:

$$R = Ls[1.161 + \ln(0.39 + T)] \quad (4-10)$$

onde, Ls (m) é a distância do poço até o ponto de estagnação do fluxo a jusante do poço, calculado por:

$$Ls = \frac{Q}{(2\pi Q_0)} \quad (4-11)$$

E a excentricidade do PPP gerado é calculada por:

$$\delta = Ls[0.0028 + 0.652T] \quad (4-12)$$

Quando $T > 1$ gera-se o PPP com forma mais alongada, de comprimento x , no sentido de fluxo da água subterrânea, que pode ser definido como:

$$x = y/\tan\left(\frac{y}{Ls}\right) \quad (4-13)$$

onde y é limitado por:

$$-\frac{Q}{2Q_0} < y < +\frac{Q}{2Q_0} \quad (4-14)$$

E limitado a montante na distância Lu , calculada por:

$$Lu = Ls[T + \ln(e + T)] \quad (4-15)$$

onde e é o Número de Euler.

O método *Simple WHPA* possui uma solução que permite calcular PPP para múltiplos poços operando simultaneamente. Essa solução considera a interferência no fluxo de água subterrânea causada por cada um dos poços e, conseqüentemente, as formas de cada PPP gerado.

Nas comparações dos métodos utilizados nesse trabalho, optou-se por identificar esse método como *Simple WhAEM*.

4.3.4.2. Solução semi-analítica WhAEM

Para a solução semi-analítica, o programa utiliza a aproximação de Dupuit-Forchheimer, para o qual o fluxo em aquíferos freáticos é praticamente horizontal e a distribuição de pressão, hidrostática (BEAR & CHENG, 2010).

Os dados de entrada necessários para a construção do modelo são:

- Mapa base em formato *GEOTIFF*;
- Distribuição das cargas hidráulicas de corpos d'água superficial e aquífero (poços) dentro do domínio do modelo;
- Cota da base, espessura, condutividade hidráulica, porosidade efetiva e recarga do aquífero;
- Vazão e cota da base da seção filtrante de poços de bombeamento.

Após rodar o modelo pela primeira vez, inicia-se o processo de calibração, caracterizado pela comparação entre cargas hidráulicas observadas em campo e as cargas calculadas pelo modelo. Diferenças entre cargas observadas e calculadas são previstas, entretanto o que se espera de um bom modelo é que essas diferenças não sejam grandes quando comparadas à

espessura do aquífero, e que se tenha uma aleatoriedade entre cargas calculadas maiores e menores que as observadas nos diferentes pontos de observação, ao invés de um padrão de todas as cargas calculadas serem exclusivamente maiores ou menores que as observadas. Com o modelo calibrado, é definido o TDT para a geração dos perímetros de proteção.

Como todo modelo, as incertezas estão sempre presentes. No caso do WhAEM, são introduzidos valores médios de cada parâmetro, com base em uma faixa de valores constituída a partir de dados medidos em campo e presentes na literatura, por exemplo, através de testes de bombeamento, observações de campo, e valores presentes na literatura. Uma forma efetiva de tratar as incertezas é gerar modelos com os valores extremos dos parâmetros, dentro da faixa de valores encontrados para cada um. Essa operação permite analisar a sensibilidade tanto do modelo quanto das dimensões dos perímetros de proteção gerados, em relação a cada parâmetro.

4.3.5. Índice de comparação

Com o objetivo de definir o método de melhor aplicabilidade em condições hidrogeológicas semelhantes às da área de estudo, empregou-se a metodologia proposta por Paradis *et al.* (2007), que define um índice de comparação (C_i) (Equação (4-16)) para ranquear dentre os PPP gerados pelos diferentes métodos qual melhor se aproxima a um PPP de referência. O PPP de referência adotado nesse trabalho correspondeu àquele gerado pela modelagem numérica no *software* GMS.

$$C_i = \frac{CA}{CA + NPA + OPA} * 100 \quad (4-16)$$

onde, CA é a área comum (coincidente) entre o método de referência e o método testado, NPA é a área não protegida pelo método testado em relação ao método de referência e OPA é a área superestimada pelo método testado em relação à referência (Figura 13).

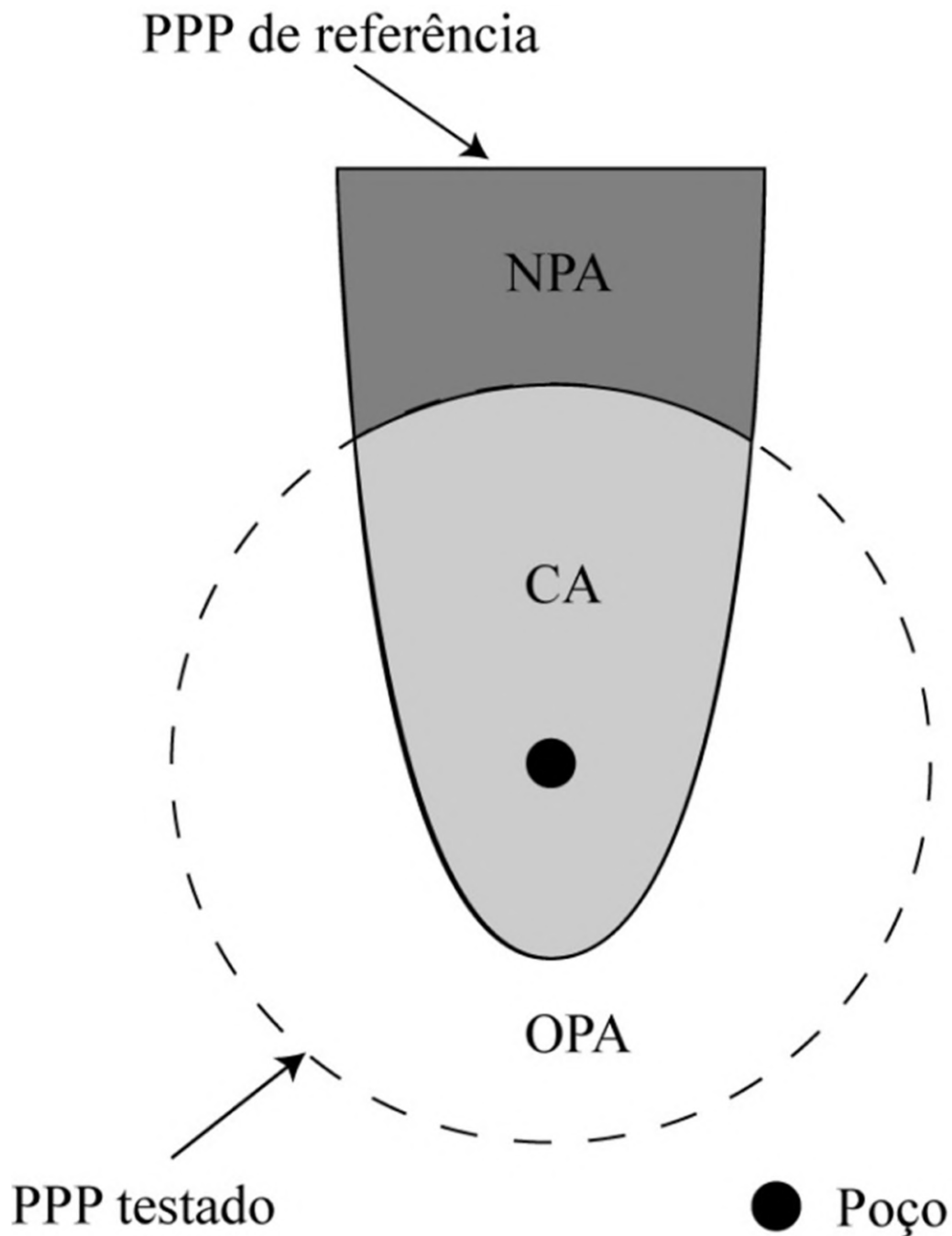


Figura 13 Nomenclaturas para análise comparativa dos métodos de definição de PPP. (Paradis *et al.*, 2007)

A adoção do índice C_i como método de se comparar os PPP gerados pelos diferentes métodos torna-se necessária, pois, em muitos casos, a principal diferença dos resultados obtidos está na forma dos PPP, e não em quanto de área superficial é abrangida. Por exemplo, no trabalho de Paradis *et al.* (2007), onde a área do PPP gerada pelo método RFC era muito similar em km^2 com a do método de referência, mas como o primeiro não considera o

gradiente hidráulico, o índice C_i ficou baixo por se tratar de um gradiente hidráulico alto, gerando uma área de proteção superestimada a jusante e subestimada a montante.

No presente estudo, são comparados os PPP tanto para todos os poços operando simultaneamente, quanto para apenas um poço operando simultaneamente, visando compreender se os resultados encontrados para um grupo de poços diferem daqueles obtidos para apenas um poço. Quando aplicado para os oito poços operando simultaneamente, são comparados os PPP de 50 dias de TDT para cada poço. Já para os PPP de 10 anos de TDT, como há sobreposição dos PPP gerados, a área comparada é uma só, correspondente à zona de TDT de 10 anos de todos os poços.

Os PPP gerados pelos *softwares* GMS e WhAEM foram exportados em arquivo *shapefile* para posteriormente serem passados para o *software* ArcGIS 10.3, com a finalidade de sobrepor os resultados encontrados, e calcular os elementos da Equação (4-16).

4.3.6. Parâmetros de entrada

Os principais parâmetros de entrada de cada método são apresentados na Tabela 4. No método RFC, a espessura saturada do aquífero é substituída pelo comprimento da seção filtrante do poço para evitar resultados que subestimem o tamanho dos PPP calculados (KRAEMER & HAITJEMA, 2018). A condutividade hidráulica e a espessura saturada nos métodos EFU, WhAEM e Simple WhAEM foram definidas durante a etapa de calibração do modelo WhAEM, pois como os três métodos foram aplicados usando o mesmo *software*, optou-se por avaliar os resultados dos mesmos a partir dos mesmos dados de entrada.

Tabela 4 Parâmetros de entrada para aplicação dos diferentes métodos testados.

Método	Espessura saturada (m)	Porosidade efetiva (%)	Taxa de recarga (m/dia)	Condutividade hidráulica (m/dia)	Gradiente hidráulico
RFC	14 - 18	22	0,0003	-	-
EFU	27	22	-	1,7	0,002318
WhAEM	27	22	0,0003	1,7	-
Simple WhAEM	27	22	-	1,7	0,002318
MODFLOW-MODPATH	Não constante	22	0,00017 - 0,00059	1,2 - 1,69	-

4.3.7. Outras análises

A construção de um modelo numérico calibrado permite que sejam realizadas simulações de diferentes cenários. A calibração do modelo foi realizada segundo as condições de um dia específico, conforme qualquer modelo estacionário. Entretanto, quando se trata de gerenciamento de uso de recursos naturais, é importante entender possíveis variações dos resultados quando as condições naturais são alteradas ao longo do tempo.

4.3.7.1. Redução da taxa de recarga

As dimensões de PPP dependem de diferentes parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. A taxa de recarga, diferentemente da maioria dos parâmetros inerentes à formação geológica, apresenta uma variação no tempo, e está sujeita a fatores como mudanças climáticas, e mudanças no uso e cobertura do solo que cobre as áreas de recarga de um aquífero.

Sendo assim, o presente estudo apresenta uma análise da sensibilidade das dimensões da zona de captura de um poço quando submetido a uma redução na taxa de recarga do aquífero. Esta simulação é feita utilizando o mesmo modelo conceitual e numérico aplicado nas outras análises, porém efetuando uma redução na taxa de recarga do aquífero em 50% dos valores de entrada iniciais (média, máximo e mínimo). A redução efetiva da taxa de recarga só é definida após o processamento do modelo estocástico, pois apesar de ter sido reduzido 50% nos valores de entrada, só são comparados os resultados das simulações que convergem.

4.3.7.2. Zona de contribuição x TDT de 10 anos x TDT de 20 anos

Alguns autores sugerem que a zona mais externa de proteção de um poço possa ser delimitada usando isócronas de 10 ou 20 anos de anos de TDT, como preconizam Landmeyer (1994), Foster *et al.* (2006) e Staboultzidis *et al.* (2016), ou até mesmo o governo da Dinamarca, que atribui a isócrona de 10 a 20 anos de tempo de trânsito como a maior zona de proteção (CHAVE *et al.*, 2006).

O presente estudo apresenta também uma comparação entre a área abrangida pela zona de contribuição de um poço operando individualmente, e os PPP de 10 e 20 anos de TDT, para determinar se, nas condições hidrogeológicas da área de estudo, é aconselhável a adoção de um PPP de 10 ou 20 anos para a proteção contra contaminantes persistentes.

5. Contexto geológico e hidrogeológico

5.1. Geologia regional

O município de Jaguaruna está localizado na província costeira da região Sul do Brasil, que representa aproximadamente 7% do litoral brasileiro. Sua localização é mais especificamente no setor sul da planície costeira do estado de Santa Catarina, que é limitado a norte pela Barra de Laguna, e a sul pelo Rio Mampituba (HORN FILHO *et al.*, 2014).

As províncias costeiras são superfícies geomorfológicas deposicionais de baixo gradiente, dominadas por sedimentação subaquosa, que margeiam corpos de água de grandes dimensões (SUGUIO, 2003). No sul de Santa Catarina, a província costeira é constituída principalmente por duas unidades geológicas principais: embasamento cristalino proterozoico e sedimentos cenozoicos.

A porção composta por sedimentos cenozoicos faz parte do Sistema Laguna-Barreira quaternário. Esse tipo de sistema implica na existência contemporânea e geneticamente interligada de três subsistemas deposicionais: o subsistema lagunar, o subsistema de barreira e o subsistema de canal de

ligação (*inlet*). Sua gênese está associada às variações do nível relativo do mar durante o Quaternário, cujos depósitos são dominados por sedimentos arenosos de origem marinha com retrabalhamento eólico, e as principais formas de relevo são terraços, dunas, cordões regressivos e planícies (HORN FILHO, 2003; VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007; CARUSO JR., 1997).

A disposição espacial dos sistemas laguna-barreira na região sul do Brasil indica a idade relativa entre eles. Esses sistemas foram predominantemente estudados no estado do Rio Grande do Sul devido à maior extensão da planície costeira, objetivando sua preservação. O Sistema Laguna-Barreira I é o mais interiorizado, e o Sistema Laguna-Barreira IV o mais externo, e são, respectivamente, o mais antigo e o mais recente (Figura 14b). Essa estruturação é atribuída a eventos transgressivos/regressivos controlados pela glacio-eustasia dos últimos 400.000 anos (VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007; TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000).

A planta de abastecimento da empresa Jaguaruna Saneamentos, a qual capta água de oito poços tubulares, está sobre depósitos eólicos do Pleistocênio superior, que corresponde ao Sistema Laguna-Barreira III (Figura 14a).

O Sistema Laguna-Barreira III está associado ao terceiro evento transgressivo-regressivo pleistocênico. O subsistema Barreira III faz parte deste sistema, e é constituído por fácies arenosas, com areias quartzosas de coloração amarelo-claro até castanho, finas a médias, bem selecionadas, com estratificações plano-paralelas, de baixo ângulo, acanaladas e *hummocky*, contendo tubos fósseis de *Callichirus* sp., interpretados como sendo de origem praial e marinho raso. Essas fácies estão recobertas por depósitos eólicos, compostos por areias quartzosas, bimodais, de coloração amarelo-acastanhado até avermelhado, por vezes enriquecidas em matriz secundária constituída por argilas e óxidos de ferro, com aspecto maciço. São ainda localmente marcados por bioturbação de raízes e, comumente, encontram-se intercalados com níveis centimétricos de paleossolos. Essa sucessão vertical de fácies indica um processo de regressão da linha de costa, sendo possível correlacionar com outros depósitos muito semelhantes que ocorrem ao longo da costa brasileira, com idades de aproximadamente 120 mil anos (MACHADO, 2014; MARTIN et al, 1988; VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007).

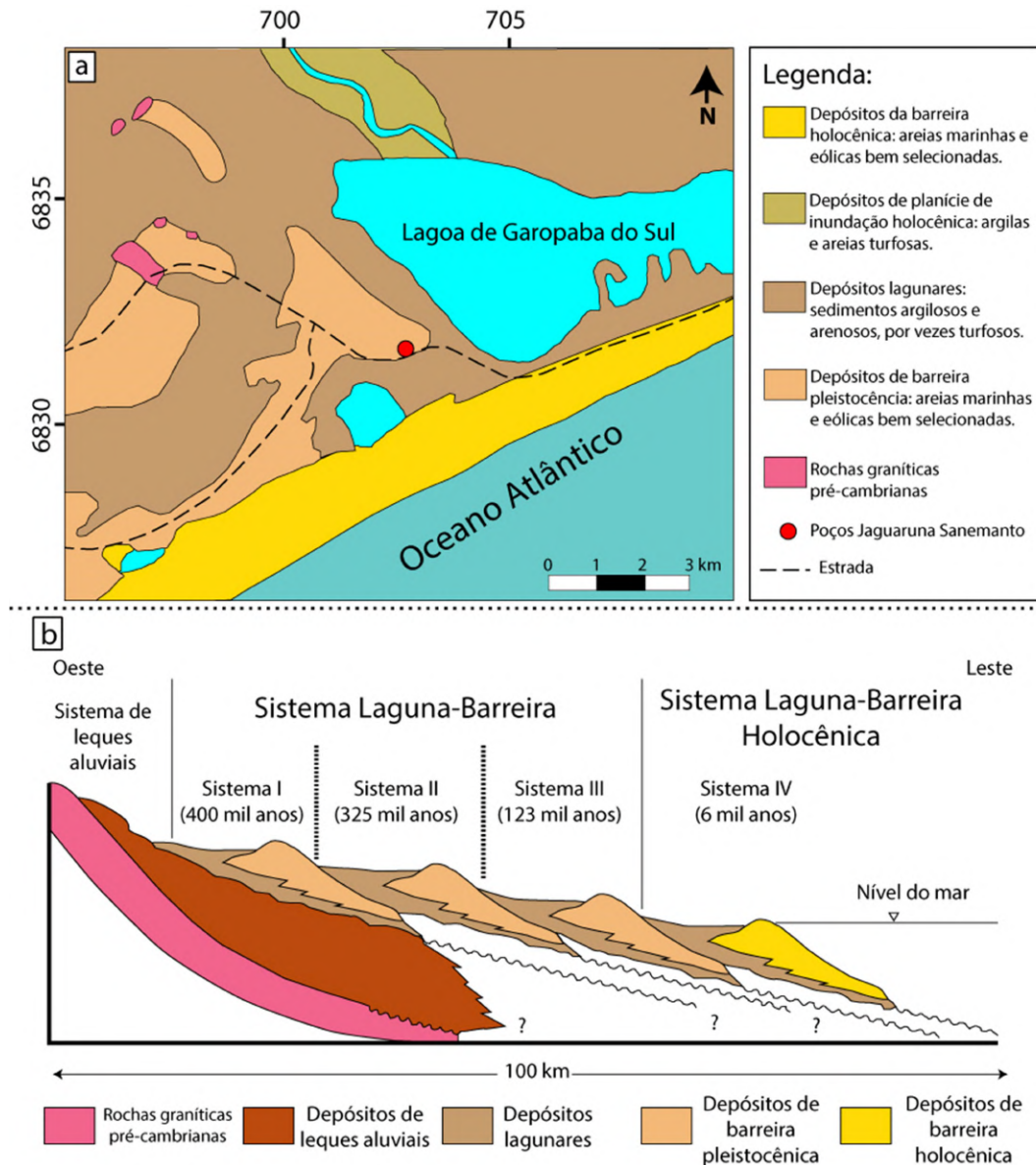


Figura 14 (a) Mapa geológico da área de estudo, adaptado de Martin *et al.* (1988); (b) Perfil esquemático, transversal aos Sistemas Laguna-Barreira. Fonte: Tomazelli & Villwock, 2000).

O subsistema Lagunar III corresponde a ambientes deposicionais instalados na região de retrobarreira, representados principalmente por areias finas silto-argilosas, mal selecionadas, com laminação plano-paralela e, frequentemente, com concreções carbonáticas e ferruginosas (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000).

5.2. Geologia local

A empresa S&A Geologia (2016) descreveu o substrato da área de estudo por meio de oito sondagens. A camada superficial é composta por areia branca a amarela, por vezes com presença de matéria orgânica, e espessura que varia de 4 m a 8 m. Sotoposta a esta camada ocorre uma camada de turfa argilosa de coloração preta, com espessura que varia de 1 m a 4 m. Abaixo ocorre uma camada de areia fina a média de coloração branca, de espessura que varia entre 15 m e 20 m, entremeada com fina camada de argila de cor cinza. A camada mais profunda encontrada é de argila de coloração amarelada, com espessura variando de 3 m a 4 m que, à medida que aumenta a profundidade, vai adquirindo uma coloração acizentada. A seção-tipo da geologia encontrada na área está representada na Figura 15.

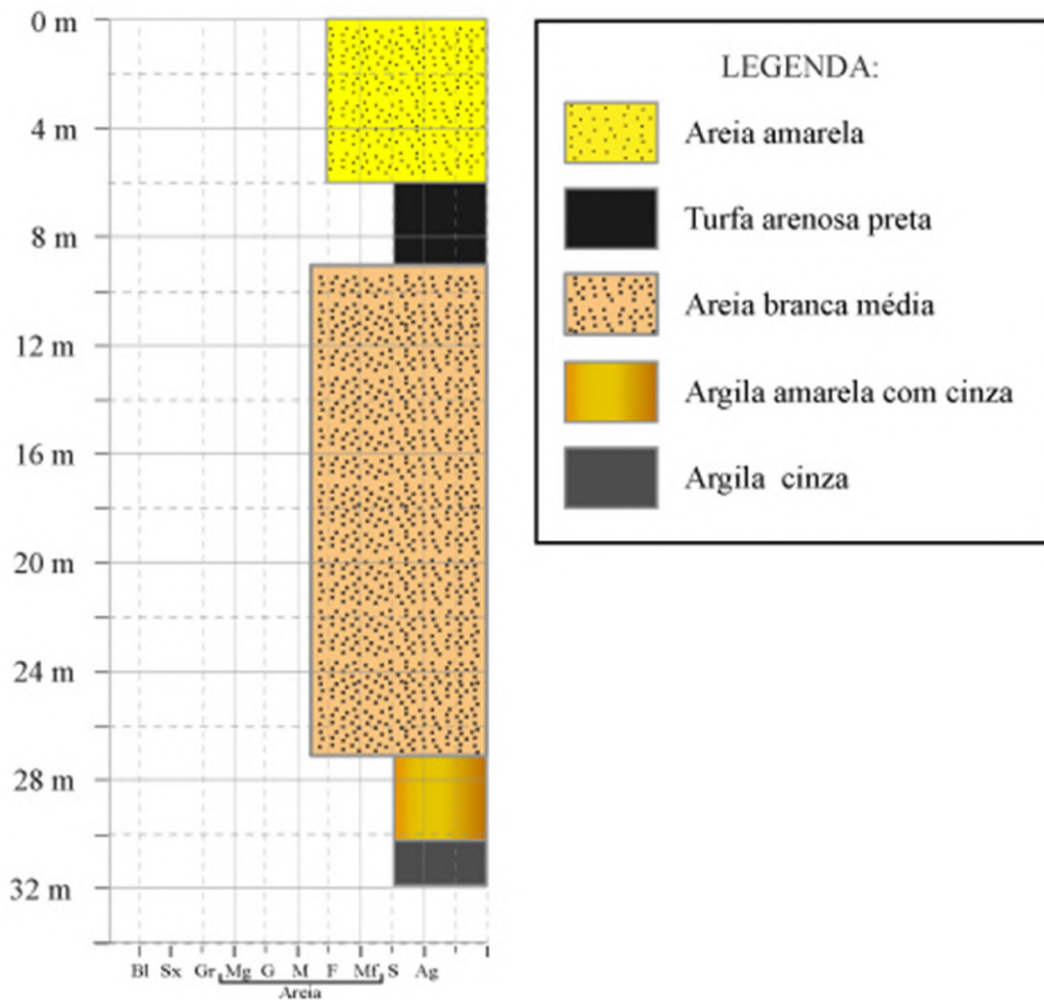


Figura 15 Seção-tipo que representa a geologia da área de estudo. Elaborada com os dados de S&A Geologia (2016).

5.3. Geomorfologia

O município de Jaguaruna está inserido no Domínio Morfoestrutural dos Depósitos Quaternários Inconsolidados, mais especificamente na Unidade Geomorfológica Planície Litorânea (IBGE, 2009), na qual são encontradas fácies deposicionais correlatas, como fluvial, lagunar, paludial, eólica e marinha. A linha de costa na região tem orientação preferencial NE-SW, e está situada ao sul do Cabo de Santa Marta, que representa a porção da plataforma de Florianópolis que separa as bacias de Santos, ao norte, e de Pelotas, ao sul (HORN FILHO, 2003).

Os depósitos do Sistema Laguna-Barreira III podem se apresentar morfologicamente como altos topográficos com altitudes médias de 20 m, enquanto que os depósitos circundantes, compostos predominantemente por

sedimentos turfosos e arenosos de depósitos lagunares e eólicos holocênicos, possuem cota altimétrica média de 6 m (MARTIN et al, 1988; MUDAT et al., 2006).

5.4. Hidrogeologia regional

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão, no domínio hidrogeológico poroso da Unidade Hidroestratigráfica Sedimentos Cenozóicos (UHSC), Subdomínio Depósitos Costeiros (Figura 16), que corresponde a uma extensa área de descarga das águas subterrâneas, que fluem da serra localizada a oeste da Planície Costeira em direção ao mar, sob regime de fluxo livre a semiconfinado, com nível estático próximo à superfície. Essa unidade hidroestratigráfica, correspondente aos depósitos dos sistemas laguna-barreira, é uma importante fonte de água subterrânea para as comunidades locais e industriais por permitir a captação de água a um custo reduzido, embora apresente alta vulnerabilidade natural na maior parte das áreas onde ocorre (CARDOSO *et al.*, 2007; KREBS & ALEXANDRE, 2000; MACHADO, 2014).

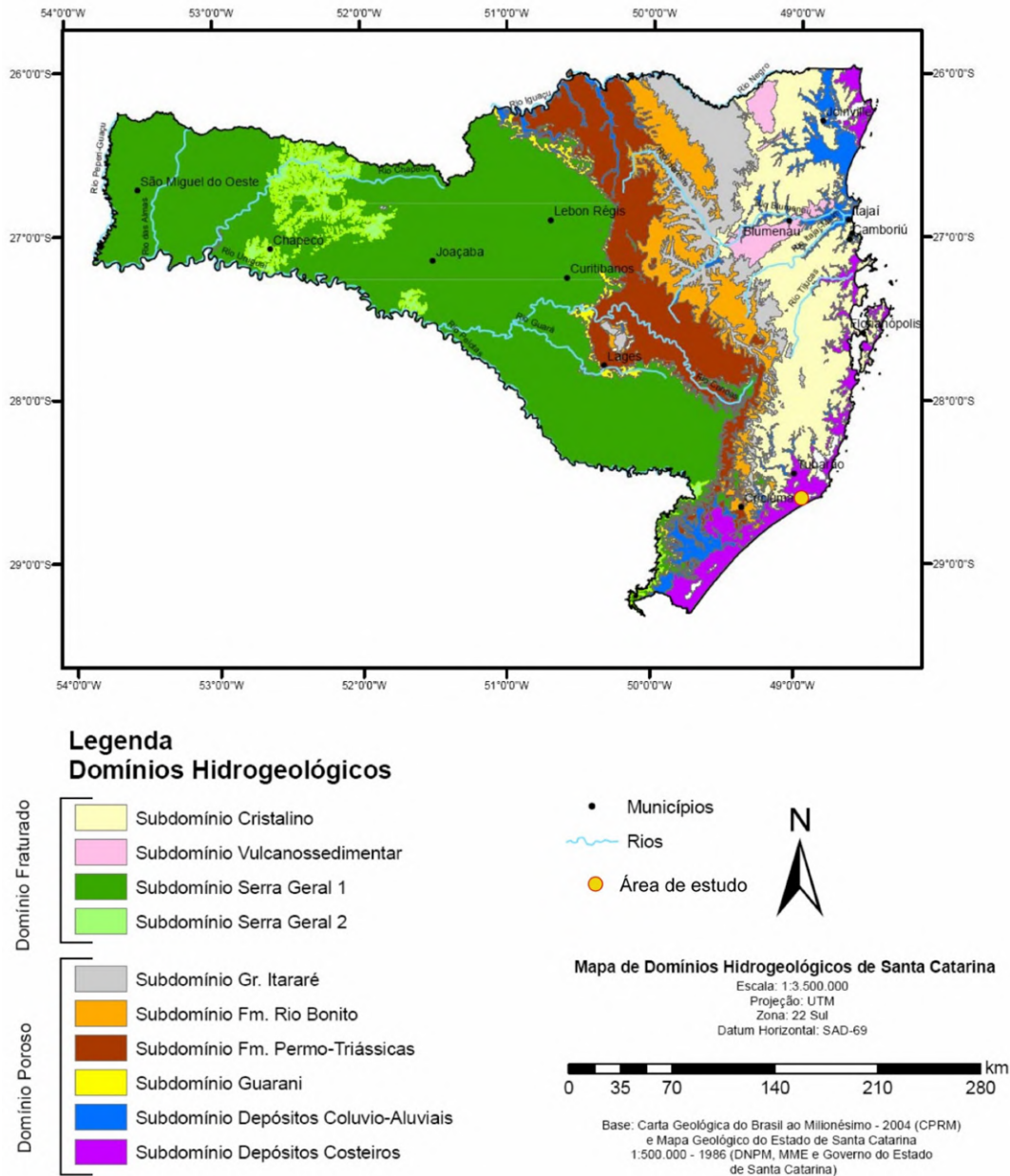


Figura 16 Mapa de Domínios Hidrogeológicos de Santa Catarina (CARDOSO, *et al.*, 2007)

Os cursos hídricos superficiais são dispostos com uma direção aproximada Leste-Oeste, com nascentes situadas principalmente no planalto representado pelo do Subdomínio Serra Geral 1 (Figura 16), e com foz nas lagoas e lagunas costeiras (Figura 17), ou no oceano Atlântico. Senhorinho *et al.* (2017) classificou a unidade hidroestratigráfica da área de estudo como Unidade Granular de Produtividade Moderada (Figura 17).

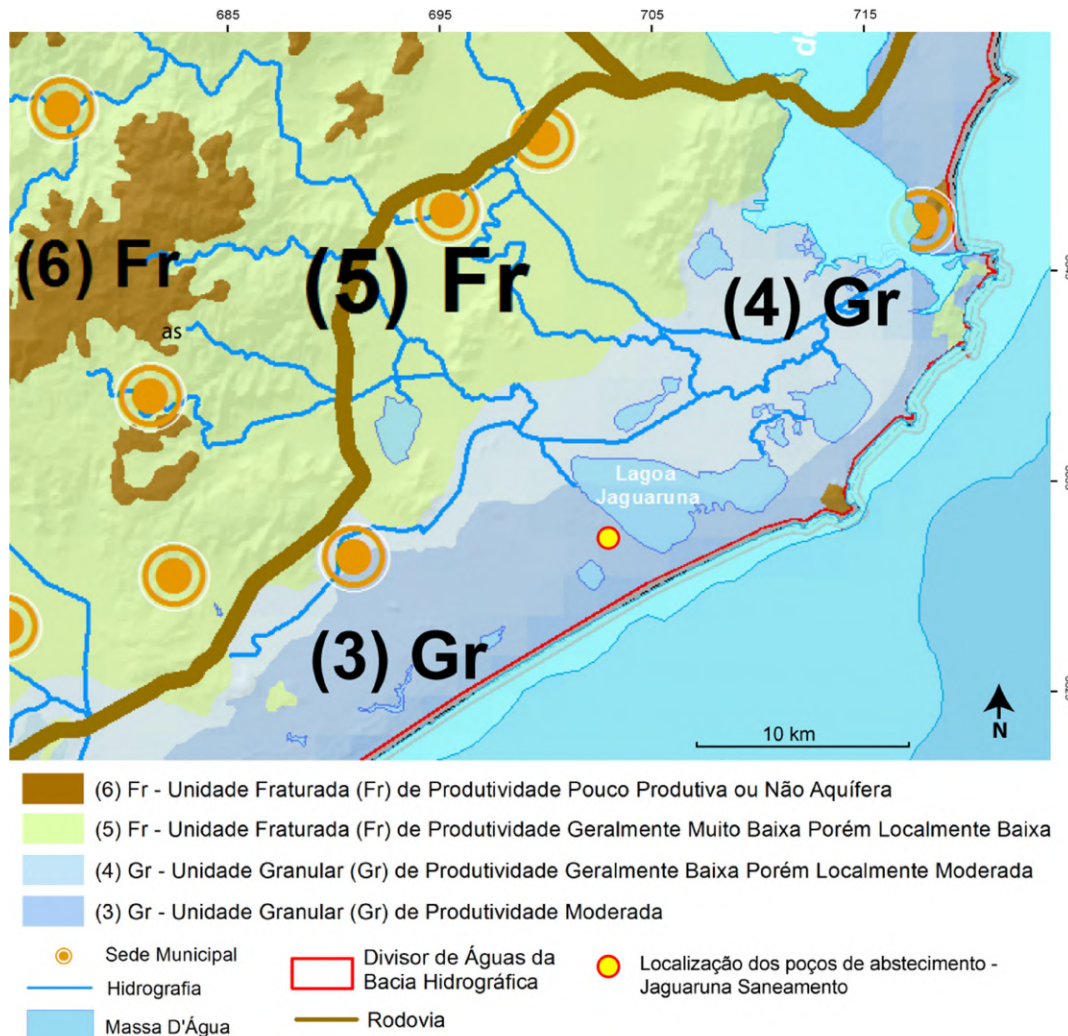


Figura 17 Mapa hidrogeológico do sudeste de Santa Catarina (Senhorinho *et al.*, 2017).

Os depósitos eólicos pleistocênicos podem se apresentar como altos topográficos em comparação aos sedimentos holocênicos, e nesses casos, o nível estático pode ser profundo, e o aquífero apresentar menor capacidade específica, resultando em poços com vazões diversas, variando de 5 a 60 m³/h (CARDOSO *et al.*, 2007). Segundo Machado (2014), no município de Laguna, vizinho do município de Jaguaruna, os poços de abastecimento público apresentam capacidade específica alta, de 6 m³/h/m, vazões superiores a 30 m³/h, transmissividade (T) de 199,7 m²/dia, porosidade efetiva de 4,6 x 10⁻² e condutividade hidráulica (K) de 6,66 m/dia, entretanto o autor não especifica se a água é captada dos depósitos pleistocênicos ou holocênicos.

Segundo Machado (2014), a falta de saneamento é o principal risco aos aquíferos presentes, já que estes possuem alta vulnerabilidade em virtude de sua litologia de elevada permeabilidade, dos níveis freáticos muito próximos à superfície do solo e das suas condições de recarga.

5.5. Hidrogeologia local

Para o licenciamento dos oito poços alvos deste trabalho, a empresa S&A Geologia (2016) conduziu um estudo técnico contemplando, entre outros levantamentos hidrogeológicos: (i) testes de bombeamento; e (ii) análises laboratoriais de granulometria, de definição da porosidade total e efetiva, e análises físico-químicas para amostras de água de seis poços para a verificação de sua qualidade.

Na área, ocorre um aquífero livre de geometria tabular e espessura variável entre 17 m e 20 m, composto por sedimentos inconsolidados de granulação areia média a areia muito fina. Com um gradiente hidráulico baixo, as águas subterrâneas mais rasas fluem principalmente em direção à Lagoa da Garopaba, localizada a leste dos poços, sendo esta a principal área de descarga (S&A Geologia, 2016).

O aquífero é limitado na base por uma camada de argila de pelo menos 4 m de espessura. Localmente, sobreposta à principal camada aquífera, pode ocorrer uma camada de turfa arenosa com espessura que varia de 1 m a 4 m. O nível estático pode ser encontrado de 3,7 a 12,6 m abaixo da superfície do solo (Figura 18).

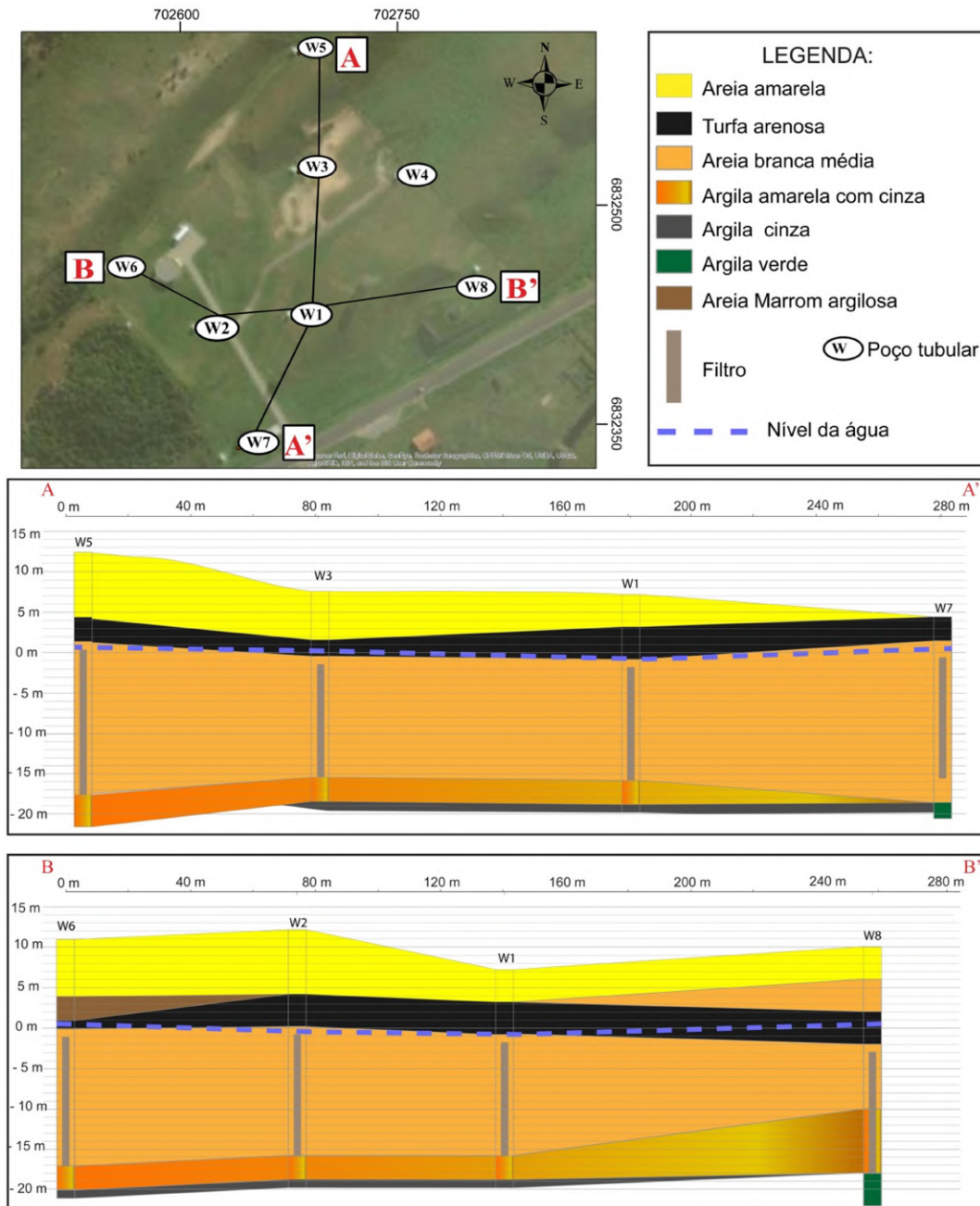


Figura 18 Seções gerados a partir dos perfis geológicos dos poços de abastecimento.

Os parâmetros hidrodinâmicos da camada de areia branca média, obtidos por meio de testes de bombeamento nos oito poços foram: condutividade hidráulica de 0,8 a 1,1 m/dia; porosidade efetiva de 15 a 22%; coeficiente de armazenamento médio 0,065, e vazão máxima de 48,5 m³/h. Dentre as características físico-químicas, a temperatura encontrada foi de 20,5°C, a condutividade elétrica média de 75,47 µS/cm, a turbidez entre 0,56 a 6,35, pH médio de 6,07, a alcalinidade 4,11 mg/L, a média de sólidos totais dissolvidos

de 49,06 mg/L, e a classificação das águas subterrâneas segundo diagrama de Piper varia entre sódica cloretada (33,33%) e mista cloretada (66,66%).

6. Resultados

6.1. Modelo numérico MODFLOW-MODPATH

6.1.1. Validação das simulações estocásticas

Por meio da metodologia descrita no item 4.2, foram obtidas 128 realizações com EMQN menor ou igual a 10% e erro de balanço de massa menor que 1%, atendendo aos requisitos estipulados para considerar um modelo calibrado. A Tabela 5 apresenta a média geométrica, e os valores máximos e mínimos do erro absoluto médio (EAM) e do EMQN para os 128 modelos, e a Figura 19 apresenta os histogramas dos mesmos.

Tabela 5 Médias geométricas, e valores máximos e mínimos, do erro absoluto médio (EAM) e do erro médio quadrático normalizado (EMQN), encontrados para os 128 modelos estocásticos.

	EAM (m)	EMQN (%)
Média Geométrica	0.77	8.64
Mínimo	0.61	7.20
Máximo	0.92	10

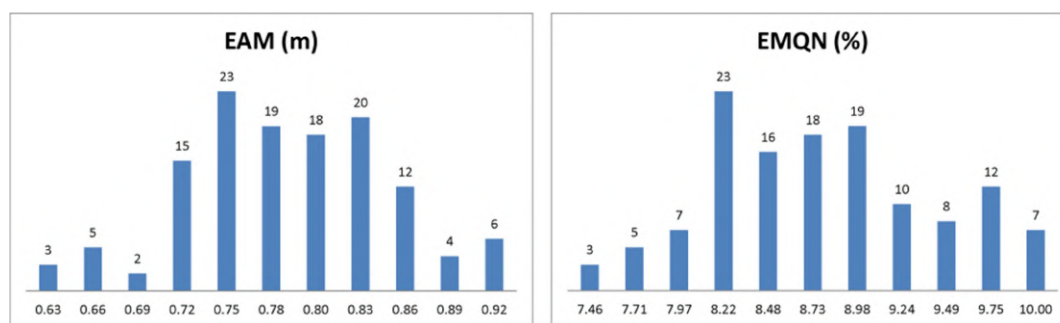


Figura 19 Histogramas gerados para o erro absoluto médio (EAM) e erro médio quadrático normalizado (EMQN), encontrados nos 128 modelos estocásticos.

A calibração de um modelo estacionário é realizada de acordo com as condições de vazões e cargas de um dia específico. Com o modelo calibrado é possível simular diferentes cenários, que no caso do presente estudo, é a geração de PPP para dois cenários: oito poços operando simultaneamente com

as vazões máximas licenciadas, para um poço operando individualmente com a vazão máxima licenciada. A geração dessas simulações exige que o modelo seja rodado novamente, podendo culminar na não convergência de algumas simulações anteriormente calibradas. Para o caso do cenário de múltiplos poços operando, todas as 128 simulações convergiram. Entretanto, para um poço operando individualmente, apenas 37 das 128 simulações convergiram.

Visando avaliar se o número de simulações é suficiente para uma análise estocástica do modelo, foi usada a metodologia usada por Wottrich (2012), que consiste na análise do comportamento da média acumulada dos resíduos em cada realização, que, demonstrando uma tendência de estabilização ao longo das realizações, atesta que o número é suficiente. Os resíduos são as diferenças, em metros, entre as cargas observadas em campo, e as cargas calculadas pelo modelo. O autor salienta que, caso a média acumulada dos resíduos permanecesse oscilando, seriam necessárias mais realizações para que o fenômeno estudado fosse representado. Os gráficos apresentados nas Figura 20 e Figura 21 confirmam a tendência de estabilização das médias dos resíduos acumuladas tanto para 128 simulações, quanto para 37 simulações.



Figura 20 Média acumulada dos resíduos de cargas, no cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.

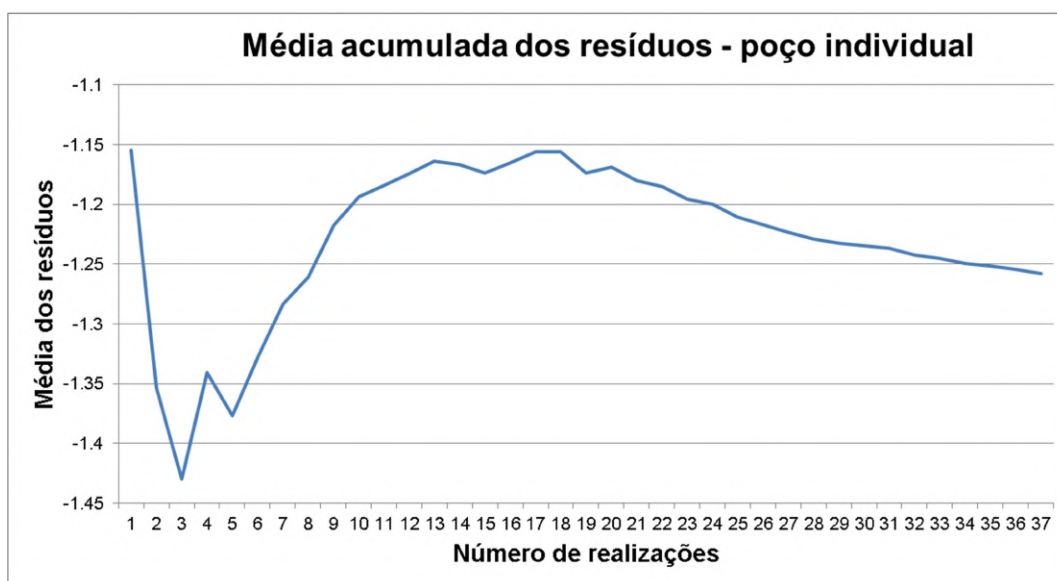


Figura 21 Média acumulada dos resíduos de cargas, no cenário de um poço operando individualmente.

6.1.2. Parâmetros hidrogeológicos

Os histogramas das distribuições dos parâmetros amostrados pelo método hipercubo latino possibilitaram confirmar que, dentre as realizações calibradas, foi contemplada a distribuição probabilística gerada através dos dados de entrada de máximo, mínimo e médio, apresentados na (Figura 22). Os valores máximos, mínimos e médios, de cada parâmetro dentro das 128 soluções, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Faixa de valores de parâmetros amostrados de forma estocástica no modelo numérico MODFLOW-MODPATH.

	Argila		Areia branca média		Turfa arenosa		Areia amarela		Recarga (m/dia)	EVPT (m/dia)
	K_H (m/dia)	K_V (m/dia)	K_H (m/dia)	K_V (m/dia)	K_H (m/dia)	K_V (m/dia)	K_H (m/dia)	K_V (m/dia)		
Média Geom.	0,009906	0,000997	1,5077	0,1008	1,0326	0,2934	0,7084	0,2593	0,00029	0,00812
Média Aritm.	0,009906	0,000997	1,5121	0,1008	1,0522	0,2960	0,7482	0,263	0,00030	0,00815
Máx	0,009933	0,000998	1,69	0,1095	1,3963	0,3946	1,3885	0,4113	0,00059	0,009
Mín	0,009881	0,000995	1,206	0,0894	0,5063	0,1799	0,3042	0,1443	0,00017	0,00567

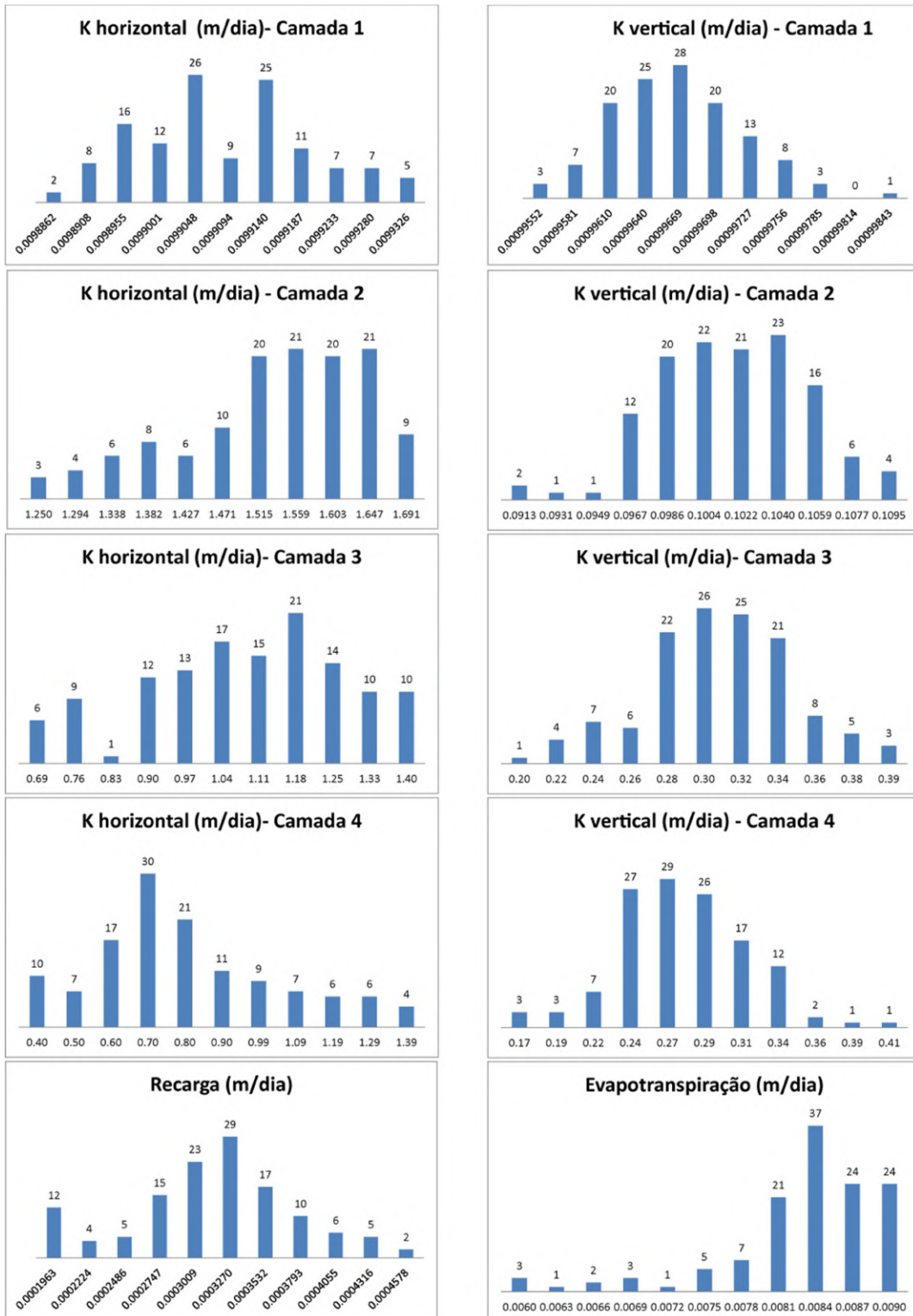


Figura 22 Histogramas dos parâmetros usados nos modelos gerados de forma estocástica.

6.1.3. Dinâmica de fluxo de águas subterrâneas

A potenciometria da área de estudo indica um fluxo da água subterrânea controlado pela topografia local, que ocorre de forma radial partindo do alto topográfico a noroeste da planta de abastecimento, com descarga nas Lagoas da Garopaba e da Encantada, e para fora do domínio do modelo nas porções norte e noroeste (Figura 23). Na porção sudeste da área, as incertezas quanto ao real comportamento de fluxo da água subterrânea são maiores, devido à escassez de dados de cargas hidráulicas observadas.

A recarga do aquífero ocorre de forma direta pela infiltração da água da chuva em toda a área modelada. O alto topográfico presente a noroeste da planta de abastecimento público representa a principal área de recarga da água, que flui pela área dos poços com um gradiente hidráulico de aproximadamente 0,0023.

Baseado no comportamento de fluxo de partículas, a Figura 24 ilustra que quando os poços operam simultaneamente, os poços P01, P02, P03, P04, P05 e P06, a noroeste, atuam como uma barreira hidráulica para os poços P07 e P08, captando majoritariamente águas que infiltram no alto topográfico, forçando com que os dois últimos mencionados captem predominantemente águas com menor tempo de residência, que infiltram nas imediações dos poços em cotas topográficas menores, resultando em um cone de rebaixamento maior nestes poços. Cabe ressaltar que as 128 soluções apresentaram este mesmo padrão.

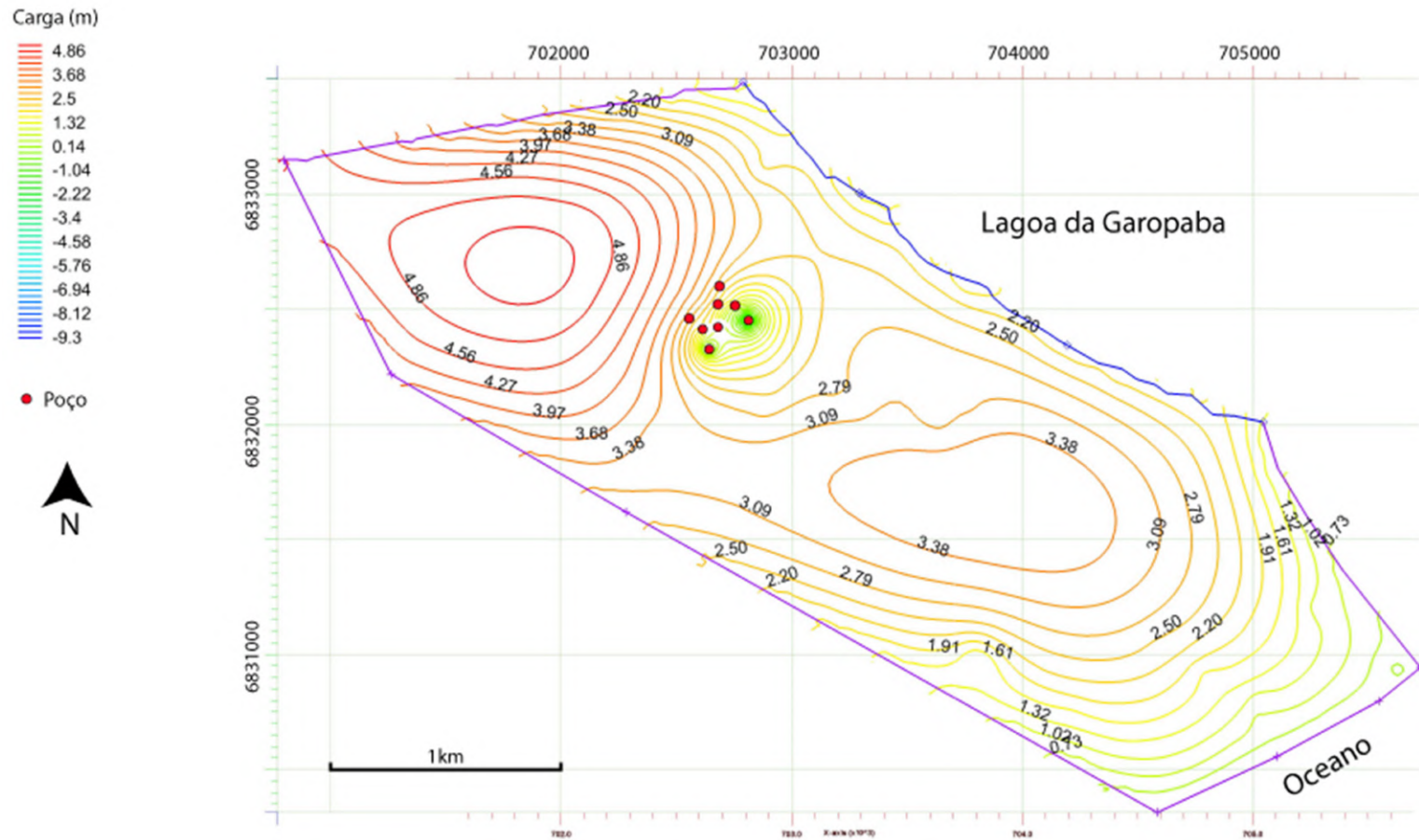


Figura 23 Mapa potenciométrico do domínio do modelo, com os oito poços em operação, em uma das 128 soluções geradas de forma estocástica, correspondente à cota de 6 metros no grid vertical.

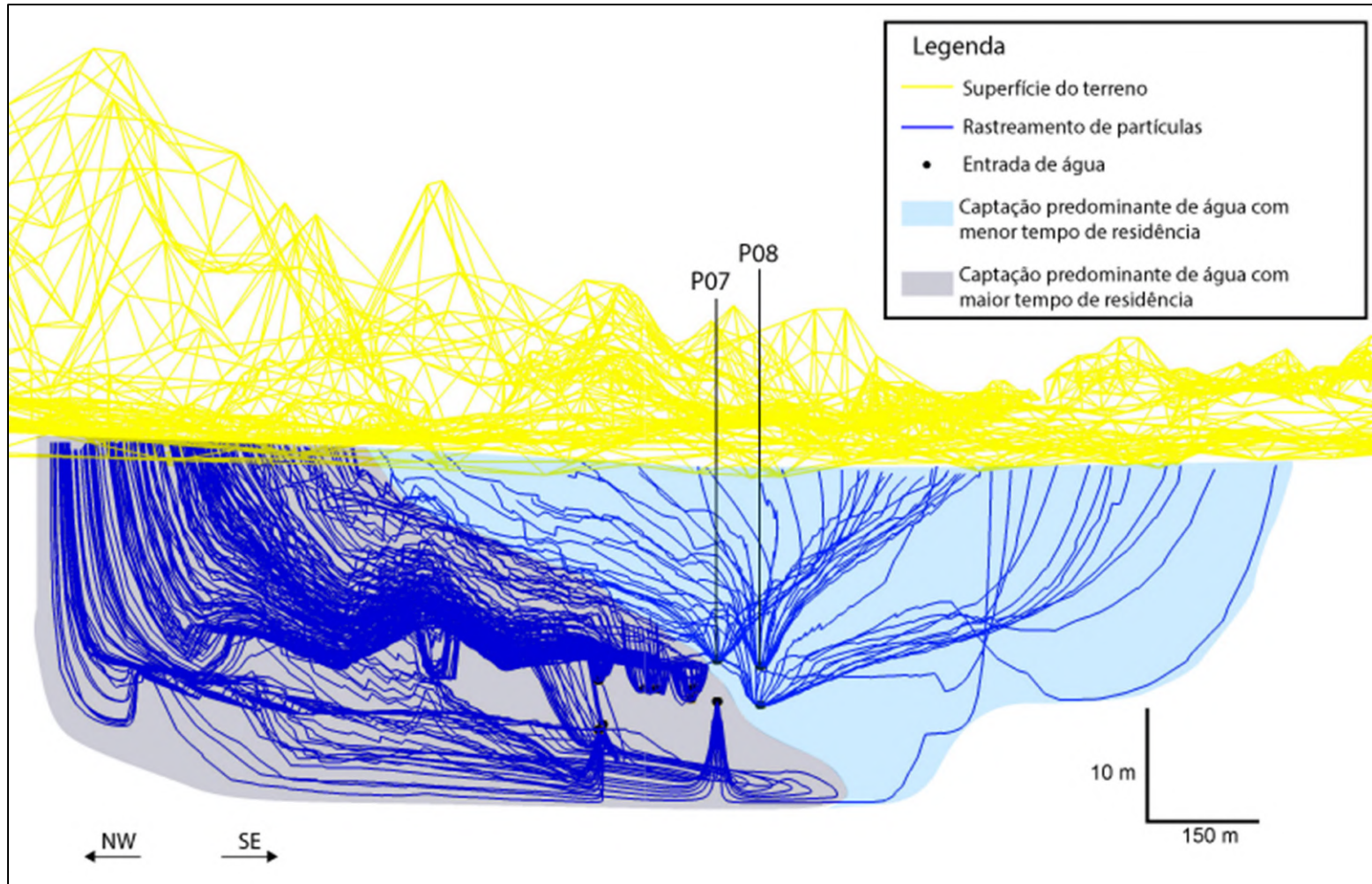


Figura 24 Representação em perfil da zona de captura dos poços por rastreamento de partículas

Considerando as principais equações usadas para delimitar PPP, entende-se que as dimensões dos PPP são diretamente proporcionais às vazões dos poços. Entretanto, ao construir um modelo numérico tridimensional com múltiplos poços operando simultaneamente, nota-se que essa relação não é regra. Os poços P07 e P08 apresentaram PPP consideravelmente maiores, mesmo que suas vazões sejam as mesmas da maioria dos demais poços, inclusive sendo menores que a do poço P02 (Tabela 3). Tal observação evidencia que, em determinados casos, o uso de modelos numéricos tridimensionais é indispensável para a compreensão do fluxo de partículas em um aquífero.

6.1.1. Análise de sensibilidades

Ao rodar o modelo no módulo PEST, automaticamente o *software* GMS gera um arquivo com as sensibilidades do modelo a cada parâmetro estimado. A recarga foi o parâmetro com maior sensibilidade no modelo (

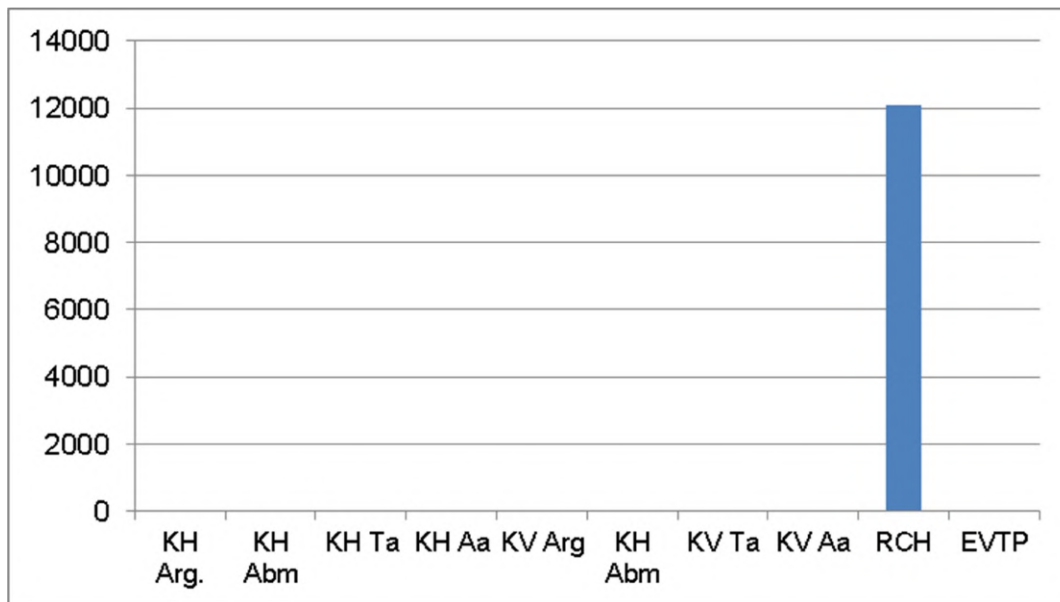


Figura 25), seguida da evapotranspiração. Entende-se que a causa dessa alta sensibilidade é por se tratar de um aquífero livre, com nível da água raso e recarga direta por infiltração.

Para entender quais condutividades hidráulicas, horizontais e verticais, das litologias presentes no modelo, apresentariam maior sensibilidade, retiraram-se a recarga e a evapotranspiração da comparação. O resultado foi que a condutividade hidráulica horizontal da camada de areia branca média, que é a principal unidade aquífera, apresentava maior sensibilidade, seguida da condutividade horizontal a argila da base do modelo (

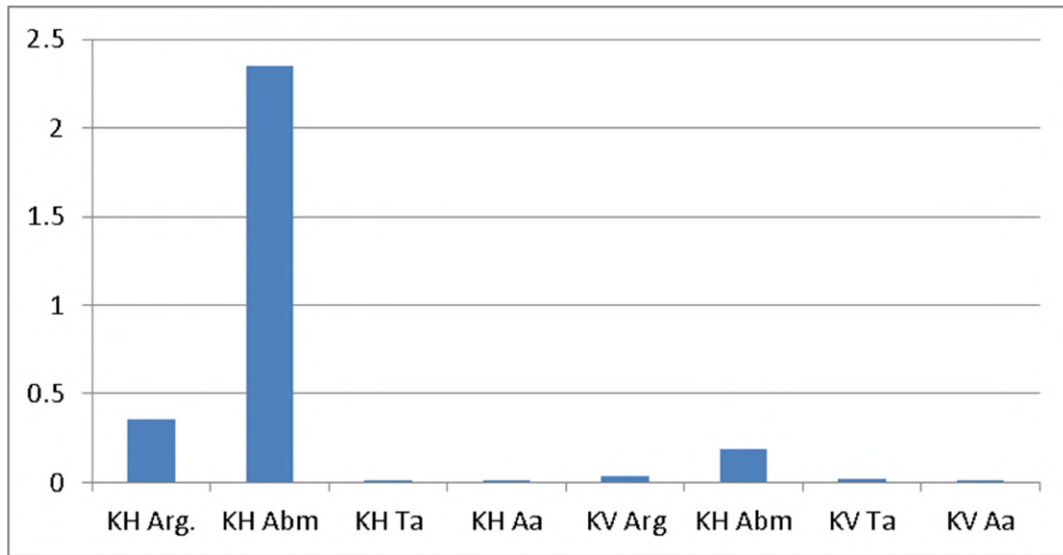


Figura 26).

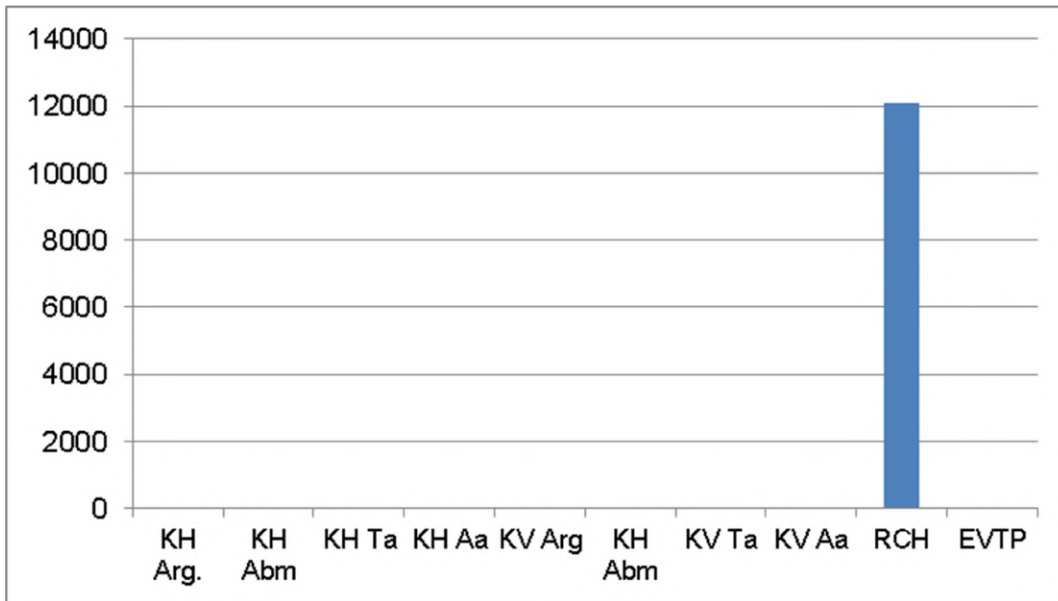


Figura 25 Gráfico de análise de sensibilidade dos parâmetros estimados no módulo PEST. A recarga foi o parâmetro com maior sensibilidade. KH = Condutividade hidráulica horizontal; KV = Condutividade hidráulica vertical; Arg = Argila; Abm = Areia branca média; Ta = Turfa arenosa; Aa = Areia amarela.

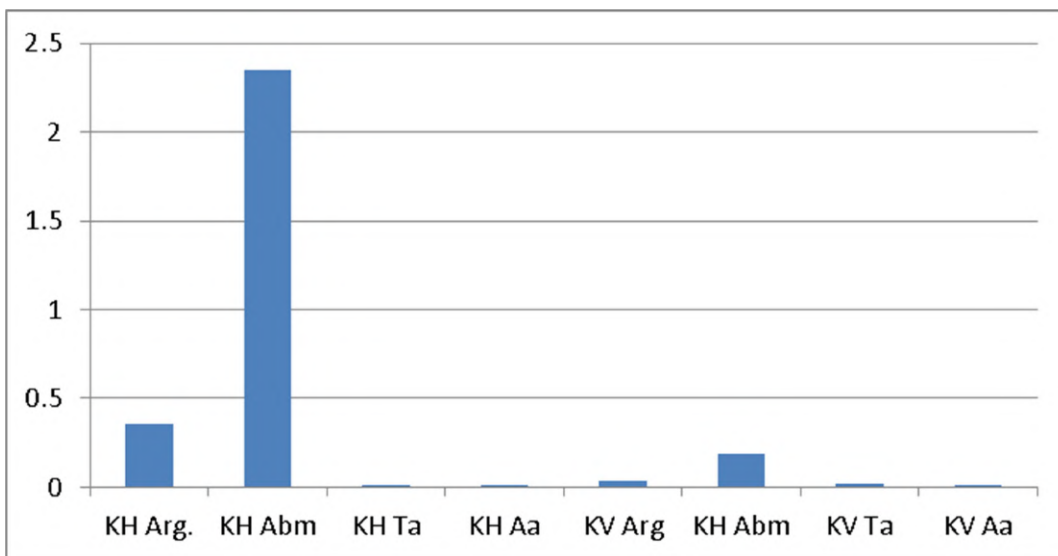


Figura 26 Gráfico de análise de sensibilidades das condutividades hidráulicas das formações geológicas presentes no modelo. KH = Condutividade hidráulica horizontal; KV = Condutividade hidráulica vertical; Arg = Argila; Abm = Areia branca média; Ta = Turfa arenosa; Aa = Areia amarela.

6.2. Perímetro de proteção de poços (PPP)

Neste item são apresentados os resultados obtidos pelos diferentes métodos referentes a dois cenários diferentes. Um onde os oito poços presentes na planta de abastecimento estão operando simultaneamente, com

as vazões máximas licenciadas pelos órgãos responsáveis (Tabela 3). No outro cenário apenas o poço P01 está operando em sua vazão máxima licenciada. Para ambos os cenários são apresentados os PPP correspondentes a 50 dias de TDT e a 10 anos de TDT.

6.2.1. Múltiplos poços - MODFLOW-MODPATH

As zonas de proteção para múltiplos poços operando foram geradas por meio de uma análise estatística com base em 128 realizações calibradas, correspondentes à probabilidade de uma partícula de água que infiltra o solo ser capturada pelo poço, dentro do tempo de trânsito em questão. As cores mais quentes, nas figuras apresentadas a seguir, representam zonas que predominam a sobreposição das 128 realizações geradas, e quanto mais frias as cores, menos realizações cobriram essas regiões. Desta forma, os resultados levam em conta as incertezas inerentes ao processo de modelagem, possibilitando visualizar em mapa as regiões que mesmo em diferentes cenários foram delimitadas como zonas de proteção, bem como aquelas que têm chance de não corresponder a uma zona de proteção, mesmo que algumas realizações tenham apontado como tal.

Para PPP referentes a 50 dias de TDT, os poços mais a montante da área, P01, P02, P03, P04, P05 e P06, apresentaram perímetros de proteção menores quando comparados aos dois poços mais a jusante, P07 e P08 (Figura 27 e Tabela 7). Entende-se que a captação de águas de maior tempo de residência, ou seja, que percorrem maiores distâncias dentro do aquífero é a principal razão por essa diferença (Figura 24). Além disso, a topografia do terreno pode estar influenciando para que os poços P07 e P08 captem água que infiltram nas suas imediações em topografias menores, tendo em vista que os mesmos estão no limite com a planície que circunda o alto topográfico no qual a planta de abastecimento está inserida.

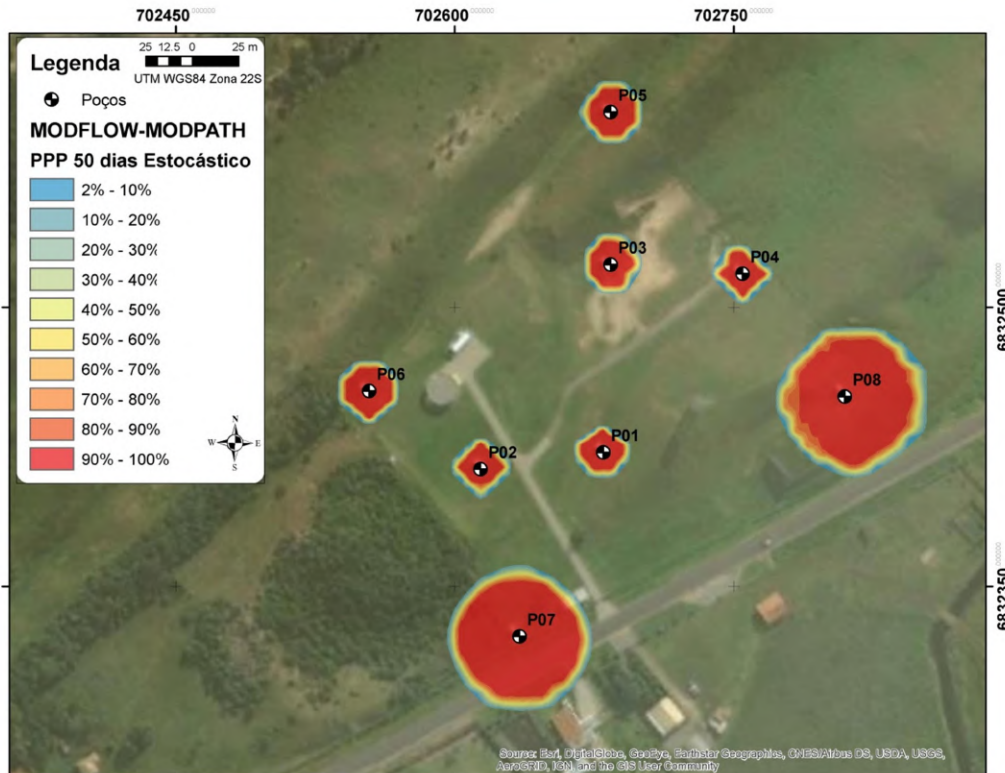


Figura 27 Perímetros de proteção de 50 dias de tempo de trânsito em múltiplos poços operando, gerados de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser capturada pelo poço em até 50 dias.

Tabela 7 Áreas com probabilidade maior ou igual a 2% de partículas lançadas ao solo serem capturadas em 50 dias de TDT, geradas de forma estocástica, para cada poço em um cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.

Poço	Área PPP (m ²)
P01	611,25
P02	636,45
P03	773,89
P04	619,81
P05	854,26
P06	829,26
P07	4396,87
P08	2980,58

Com o aumento do TDT de 50 dias para 10 anos, aumenta-se a área de influência dos poços, conseqüentemente incrementando incertezas nos resultados. Devido à sobreposição dos perímetros de proteção de 10 anos de

TDT, os resultados são apresentados praticamente como um único perímetro, abrangendo todos os poços. A área total medida é de 291.800,0 m².

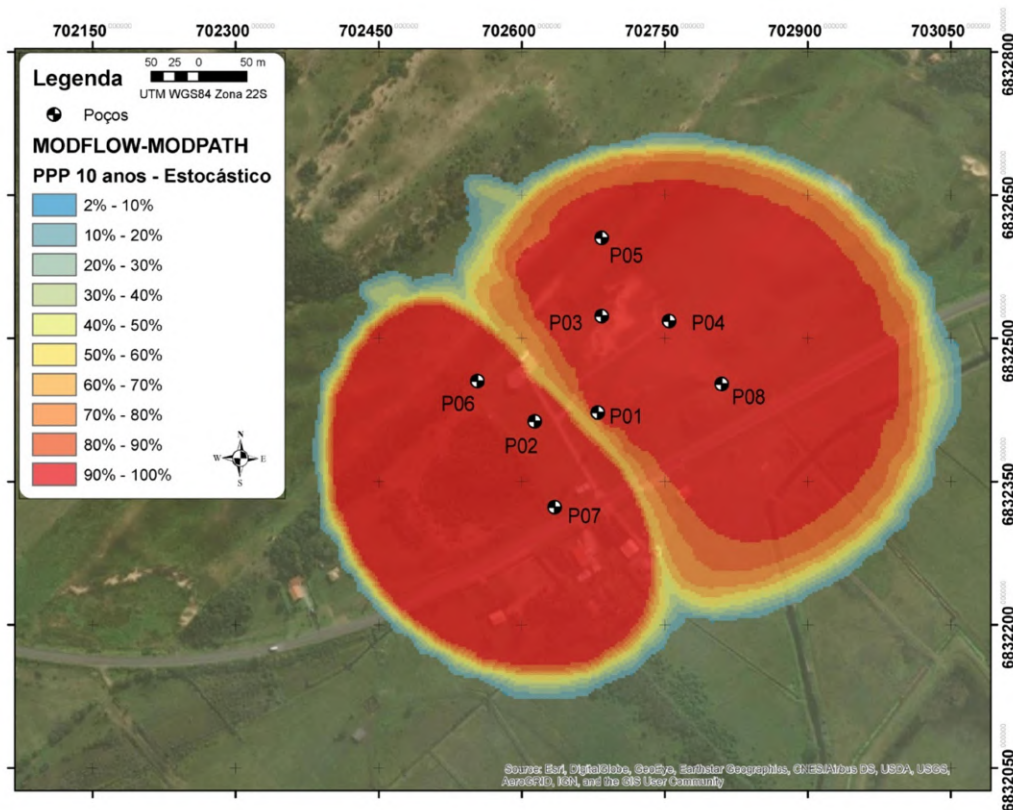


Figura 28 Perímetros de proteção de 10 anos de tempo de trânsito em múltiplos poços operando, gerados de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelos poços em até 10 anos.

6.2.2. Poço individual – MODFLOW-MODPATH

Além de gerar PPP para múltiplos poços, é importante entender os resultados e as características de PPP em locais com apenas um poço funcionando. Para isso, todos os poços foram desativados no modelo calibrado, com exceção do poço P01, que foi mantido em operação com uma vazão de 360 m³/dia.

Qualquer mudança feita no modelo conceitual e numérico exige que o modelo seja processado novamente. Dos 128 modelos calibrados com múltiplos poços operando, apenas 37 convergiram com apenas o poço P01 em operação.

O PPP gerado de forma estocástica para um poço individual apresentou um aumento das incertezas quanto a real área que corresponde a 50 dias de TDT (Figura 29), quando comparado aos resultados de múltiplos poços operando apresentados no item 6.2.1.

Entende-se que esse incremento de incertezas está vinculado ao cenário em que foi realizada a calibração do modelo, em que havia sete poços operando. Considerando a influência que o bombeamento dos poços tem nas linhas equipotenciais (Figura 23), ao simular a operação de apenas um poço, a mudança das condições de fluxo na área é mais brusca quando comparada à simulação dos oito poços em operação. Portanto espera-se que quanto mais próximo ao cenário inicial calibrado (com sete poços), menos incertezas estarão presentes nas simulações realizadas com o modelo.

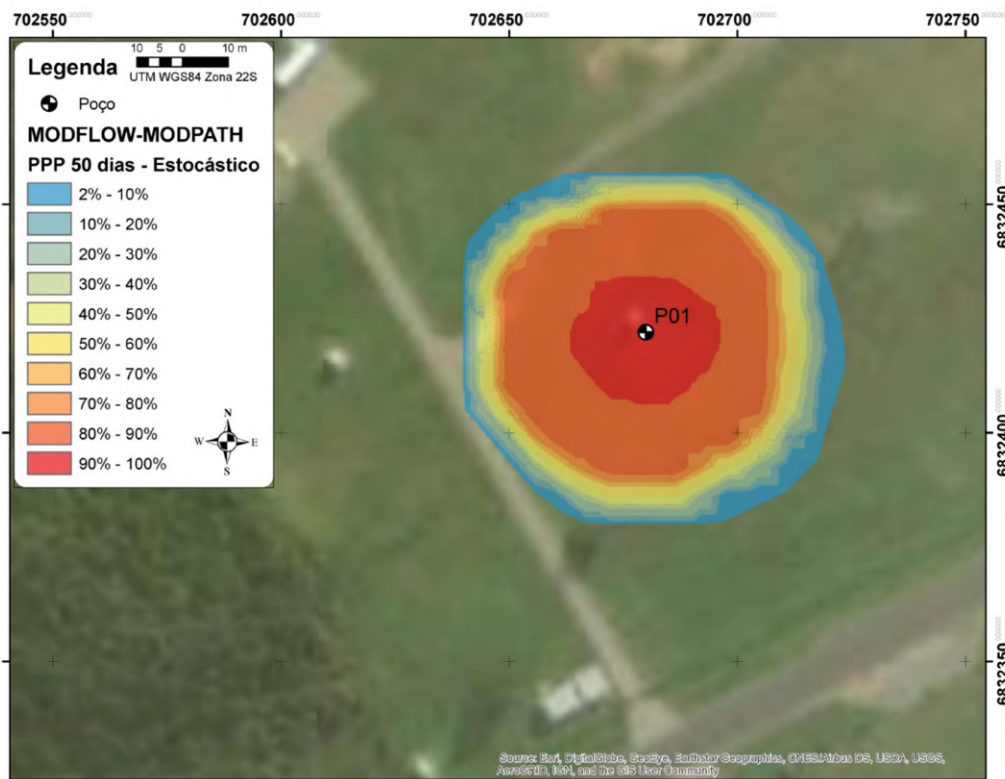


Figura 29 Perímetro de proteção de 50 dias de tempo de trânsito, gerado de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelo poço em até 50 dias.

Quando foi modelado o PPP para múltiplos poços, o poço P01 apresentou uma área de proteção, com confiabilidade maior ou igual a 2%, equivalente a 611 m². Essa área aumenta para 5.232 m² quando o poço P01 passa a operar

individualmente, confirmando assim a forte influência que poços adjacentes podem ter no fluxo da água subterrânea. Essa diferença também pode ser influenciada pelas incertezas incorporadas ao modelo.

O PPP de 10 anos de TDT gerado pelo modelo estocástico MODFLOW-MODPATH para um poço operando individualmente é apresentado na Figura 30, e apresenta uma área de 128.900 m². A maior parte da zona possui uma confiabilidade maior do que 70%.

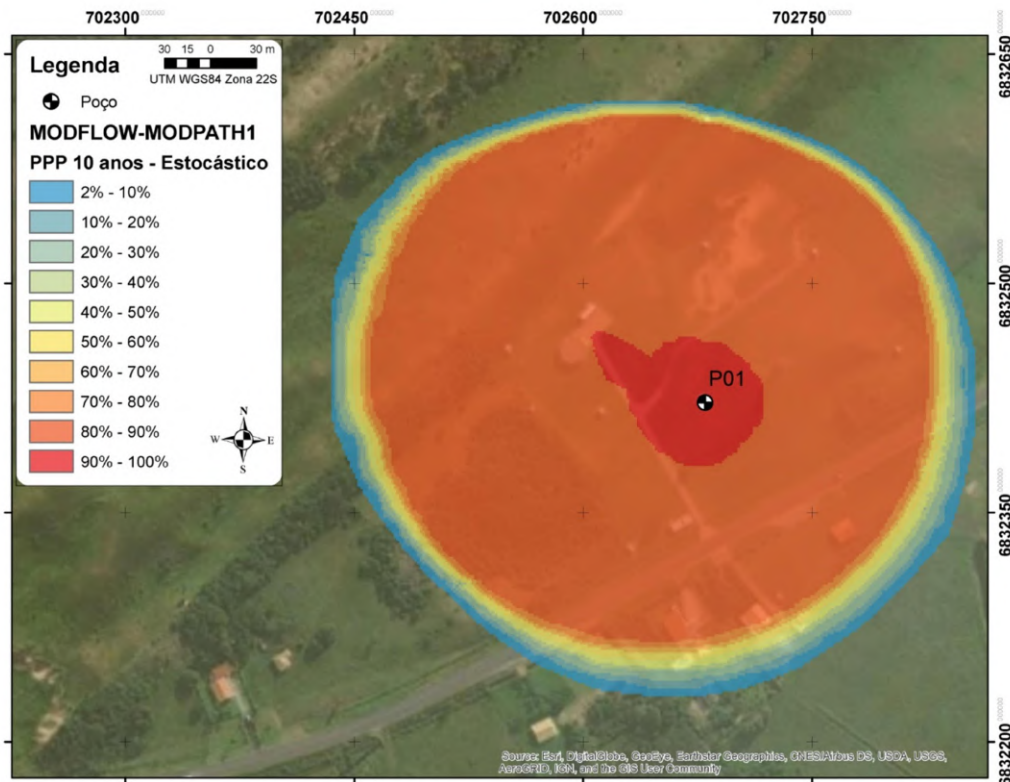


Figura 30 Perímetro de proteção de 10 anos de tempo de trânsito, gerado de forma estocástica pelo modelo numérico MODFLOW-MODPATH para o poço P01 operando individualmente. Zonação de cores representa a probabilidade de uma partícula de água que infiltra no solo, e atinge o nível freático, ser captada pelo poço em até 10 anos.

A seguir são apresentados os resultados referentes aos PPP 50 dias de tempo de trânsito para múltiplos poços operando simultaneamente, com as vazões apresentadas na Tabela 3, gerados no *software* GMS e posteriormente tratados no *software* ArcGIS 10.3.

Para comparar o método de referência com os demais métodos de delimitação de PPP, foi necessária a delimitação de um PPP único, e não zonado. Para tal, determinou-se que o PPP do método de referência seria da

área correspondente a uma chance de captura de partículas maior ou igual a 2%.

6.2.3. PPP Determinístico x Estocástico

Com o intuito de avaliar a importância da aplicação de modelos estocásticos, foi selecionada a solução que apresentou menor EMQN dentre as 128 soluções, e com a mesma foram gerados os PPP de forma determinística para os diferentes cenários apresentados no presente estudo. Em seguida, para quantificar a diferença entre os PPP gerados pelos modelos determinístico e estocástico, foi usado o mesmo índice de comparação (C_i) aplicado nas demais comparações. Os PPP determinísticos foram comparados com os PPP estocásticos que correspondem a uma chance maior ou igual a 2% de partículas lançadas ao solo serem capturadas por algum dos poços (Figura 31).

Essa comparação é particularmente importante, pois, apesar de modelos numéricos contemplarem as heterogeneidades do sistema, sendo considerada a forma mais confiável de realizar previsões e simulações, quando aplicados de forma determinística não é possível visualizar as incertezas inerentes aos mesmos.

O uso do modelo numérico determinístico para delimitar os PPP resultou no subdimensionamento dos PPP quando comparados aos resultados encontrados pelo modelo numérico estocástico. Esse subdimensionamento já era esperado, pois o resultado gerado de forma estocástica contempla em suas soluções o modelo determinístico comparado.

O valor médio de C_i encontrado para todos os cenários foi de 73,4%, o valor mínimo de 58,5%, para 50 dias de TDT do poço P03, na situação de múltiplos poços operando simultaneamente, e máximo de 95,3%, para a zona total de captura do poço P01 operando individualmente (Tabela 8). Os valores de C_i demonstram que os PPP gerados pelos dois tipos de modelos numéricos apresentam formas e áreas semelhantes. Entretanto, o fato de modelos determinísticos apresentarem PPP subdimensionados, evidencia a necessidade da aplicação de modelos estocásticos, especialmente em situações que envolvam a preservação e manutenção da qualidade da água captada para consumo humano.

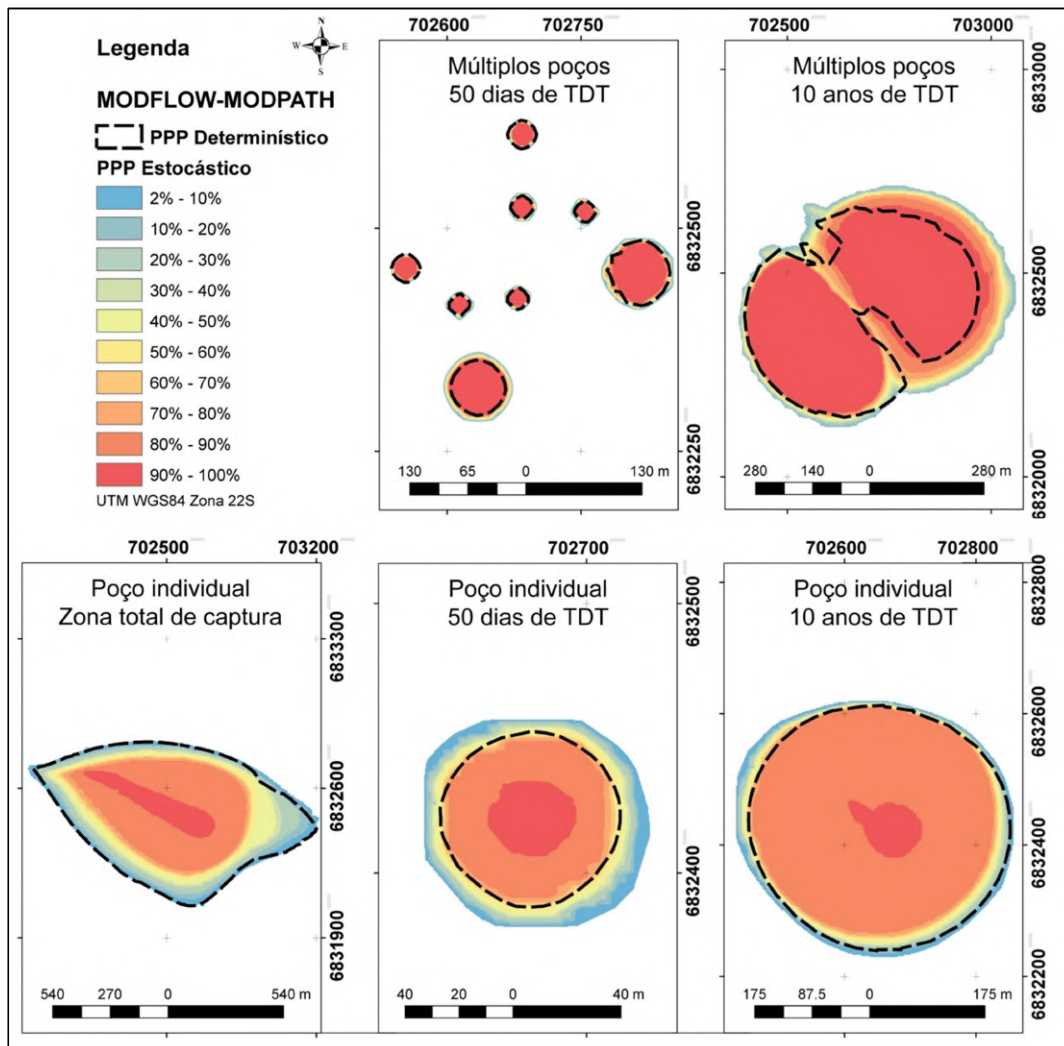


Figura 31 Comparações entre os PPP gerados pelos modelos MODFLOW-MODPATH determinístico e estocástico, nos diferentes cenários.

Tabela 8 Índices de comparação C_i entre os PPP gerados pelos modelos MODFLOW-MODPATH determinístico e estocástico, e suas respectivas áreas, para os diferentes cenários.

Cenário	Poços	Área total determinístico (m ²)	Área total estocástico (>=2%) (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	C_i (%)
50 dias múltiplos poços	P01	385.0	611.3	385.0	226.3	0	63.0
	P02	378.6	636.5	378.6	257.8	0	59.5
	P03	452.5	773.9	452.5	321.4	0	58.5
	P04	386.5	619.8	386.5	233.3	0	62.4
	P05	737.0	854.3	737.0	117.3	0	86.3
	P06	741.6	829.3	741.6	87.7	0	89.4
	P07	2856.0	4643.4	2856.0	1787.5	0	61.5
	P08	3682.3	4923.5	3682.3	1241.2	0	74.8

10 anos múltiplos poços	Todos	196414.5	291800	196414.5	95385.5	0	67.3
50 dias poço individual	P01	3300.2	5232.3	5232.3	1932.1	0	73.0
10 anos poço individual	P01	115521.4	128900	115521.4	13378.6	0	89.6
Zona total de captura Poço individual	P01	611200.52	641200	611200.5	29999.48	0	95.3

CA = Área comum entre os métodos comparados; NPA = Área não protegida pelo modelo determinístico, e protegida pelo modelo estocástico; OPA = Área protegida pelo modelo determinístico, e não protegida pelo modelo estocástico; C_i = índice de comparação entre os métodos (Paradis et al, 2007).

6.2.4. Comparações entre os métodos

A seguir são apresentados os PPP de 50 dias e de 10 anos de TDT gerados pelos métodos RFC, EFU, *Simple WhAEM* e *WhAEM*, e comparados com o método de referência MODFLOW-MODPATH. As comparações são feitas tanto para o cenário de múltiplos poços operando simultaneamente, quanto para apenas um poço operando.

6.2.4.1. Múltiplos poços

Os PPP de 50 dias de TDT gerados pelos diferentes métodos apresentaram em sua maioria um padrão de áreas superestimadas quando comparados aos PPP gerados pelo método de referência MODFLOW-MODPATH (Figura 32a). No entanto, esse padrão não é observado para os poços P07 e P08, que apresentaram, no método de referência, áreas significativamente maiores do que nos demais poços. Essa diferença de área é explicada pela captação de águas mais superficiais por esses poços, aumentando assim a área de influência na superfície do terreno. No caso desses dois poços, o único método que não subestimou a área de proteção foi o RFC, entretanto, para o restante dos poços, o método RFC superestimou mais que os demais métodos.

Considerando a média geométrica dos Índices de Comparação (C_i) dos PPP de 50 dias de TDT dos oito poços, o método que obteve os melhores resultados foi o *Simple WhAEM*, com C_i igual a 30,22% (

Tabela 9). Cabe salientar que usar a média foi uma forma simplificada de se comparar os resultados, já que, em termos práticos, os PPP de 50 dias dos poços P07 e P08 gerados por esse método foram subestimados em relação aos métodos de referência, o que representaria um risco de não se proteger áreas sensíveis à contaminação no caso do estabelecimento de eventuais atividades antrópicas.

Os resultados obtidos pelas soluções analíticas e semi-analíticas presentes no *software WhAEM* são reflexos de um modelo em duas dimensões. As assimetrias de cada PPP, para cada método com exceção do RFC, refletem uma condição de fluxo em que todos os poços extraem água de um mesmo nível, ao passo que o modelo numérico de referência possui a capacidade de gerar soluções para três dimensões. Os baixos valores dos Índices de Comparação C_i encontrados em todos os métodos testados indicam que os esses apresentam um potencial limitado para simular perímetros de proteção em uma planta de abastecimento composta por múltiplos poços, em situações hidrogeológicas semelhantes às do presente estudo. Os resultados dos índices de comparação C_i obtidos para os diferentes métodos, e para cada poço da planta de abastecimento, são apresentados nas Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14.

Todos os métodos testados para múltiplos poços operando simultaneamente com PPP de 10 anos de TDT geraram PPP superdimensionados quando comparados ao método de referência MODFLOW-MODPATH (Tabela 10 e Figura 32b). O método RFC foi o que apresentou o maior valor de C_i (50,98%).

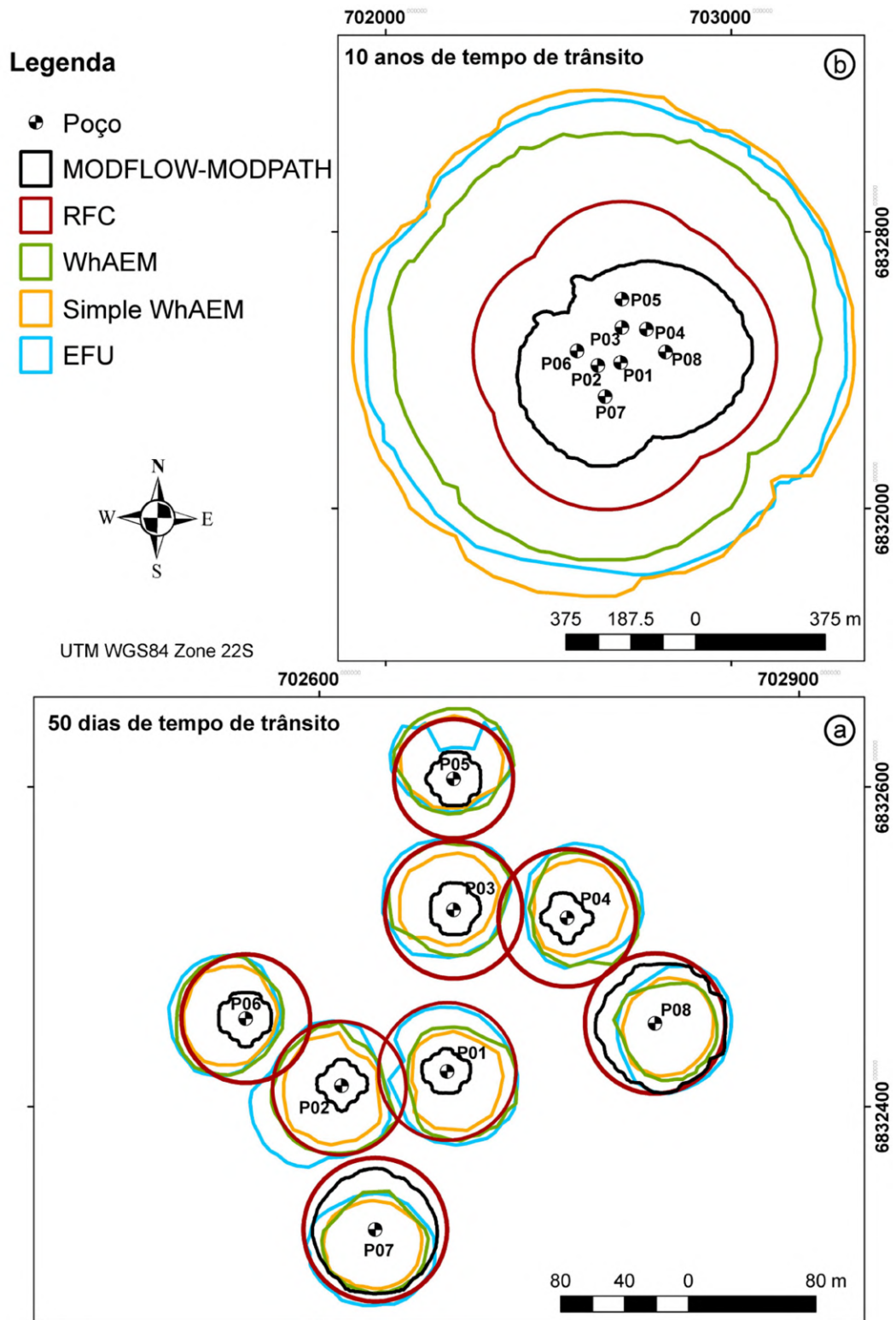


Figura 32 PPP gerados pelos diferentes métodos para o cenário de múltiplos poços operando simultaneamente.

Tabela 9 Índices de Comparação C_i dos diferentes métodos testados para delimitação de PPP de 50 dias de TDT, para múltiplos poços operando simultaneamente. Valor de C_i para cada método é apresentado como a média geométrica dos resultados dos oito poços.

Método	C_i médio (%)
WhAEM	28,15
Simple WhAEM	30,22
EFU	21,25
RFC	20,06

Tabela 10 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 10 anos de TDT, para múltiplos poços operando simultaneamente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, *et al* (2007).

Método	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	C_i (%)
WhAEM	1177000	291800	0	885200	24.79
Simple WhAEM	1600000	291800	0	1308200	18.24
EFU	1477000	291800	0	1185200	19.76
RFC	572400	291800	0	280600	50.98

CA = Área comum entre o método testado e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método testado, e protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; OPA = Área protegida pelo método testado, e não protegida pelo método de referência; C_i = Índice de Comparação entre o método testado e o método de referência.

Tabela 11 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método RFC para múltiplos poços operando simultaneamente.

Poços	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	C_i (%)
P01	5802,3	611,251	0	5191,05	10,53
P02	5927,0	636,45	0	5290,53	10,74
P03	5802,3	773,89	0	5028,40	13,34
P04	5802,3	619,81	0	5182,49	10,68
P05	4364,7	854,26	0	3510,41	19,57
P06	5078,1	829,26	0	4248,84	16,33
P07	5323,8	4396,87	0	806,11	84,51
P08	5078,1	2980,58	0	1974,22	60,16
Média geométrica					20,06

CA = Área comum entre o método RFC e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método RFC, e protegida pelo método de referência; OPA = Área protegida pelo método RFC, e não protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; C_i = Índice de Comparação entre o método RFC e o método de referência (Paradis *et al*, 2007).

Tabela 12 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método EFU para múltiplos poços operando simultaneamente.

Poço	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
P01	5297,5	611,25	0	4686,25	11,54
P02	5799,89	636,45	0	5163,43	10,97
P03	4706,82	773,89	0	3932,93	16,44
P04	4359,02	619,81	0	3739,20	14,21
P05	2861,82	854,26	0	2007,56	29,85
P06	3999,64	829,26	0	3170,39	20,73
P07	4018,73	3212,63	1184,24	806,11	61,75
P08	4106,65	2132,43	848,149	1974,22	36,75
Média					21,25

CA = Área comum entre o método EFU e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método EFU, e protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; OPA = Área protegida pelo método EFU, e não protegida pelo método de referência; Ci = Índice de Comparação entre o método EFU e o método de referência (Paradis *et al*, 2007).

Tabela 13 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método Simple WhAEM para múltiplos poços operando simultaneamente.

Poços	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
P01	2808,25	611,25	0	2197	21,77
P02	3216,03	636,45	0	2579,58	19,79
P03	2764,1	773,89	0	1990,21	28,00
P04	2761,45	619,81	0	2141,64	22,45
P05	2832,85	854,26	0	1978,59	30,16
P06	2850,53	829,26	0	2021,27	29,09
P07	2836,92	2793,07	1603,8	43,5	44,40
P08	2838,68	1639,88	1340,7	1198,80	65,97
Média					30,22

CA = Área comum entre o método *Simple WhAEM* e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método *Simple WhAEM*, e protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; OPA = Área protegida pelo método *Simple WhAEM*, e não protegida pelo método de referência; Ci = Índice de Comparação entre o método *Simple WhAEM* e o método de referência (Paradis *et al*, 2007).

Tabela 14 Dados referentes aos PPP de 50 dias de TDT, gerados pelo método WhAEM para múltiplos poços operando simultaneamente.

Poço	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
P01	3502,7	611,25	0	2891,44	17,45
P02	4098,87	636,45	0	3462,41	15,53
P03	3624,43	773,89	0	2850,54	21,36
P04	3238,51	619,81	0	2618,7	19,14
P05	2735,88	854,26	0	1881,62	31,22
P06	2941,72	829,26	0	2112,46	28,19
P07	3113,74	3113,7	1529,69	0	67,06
P08	2966,53	2966,5	1956,99	0	60,26
Média					28,15

CA = Área comum entre o método WhAEM e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método WhAEM, e protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; OPA = Área protegida pelo método WhAEM, e não protegida pelo método de referência; C_i = Índice de Comparação entre o método WhAEM e o método de referência (Paradis et al, 2007).

6.2.4.2. PPP- Poço individual

Os PPP de 50 dias de TDT gerados por todos os métodos testados para o poço P01 operando individualmente apresentaram PPP com dimensões muito semelhantes ao PPP gerado pelo modelo numérico (Figura 33a). Considerando a pequena diferença entre os índices C_i (máximo $C_i = 89,67\%$ e mínimo $C_i = 84,98\%$)(Tabela 15), e as distorções que podem ocorrer mediante o tratamento dos dados de imagens, como a transformação dos resultados do GMS para arquivo *shapefile*, ou o desenho dos PPP no *software WhAEM*, concluiu-se que todos os métodos tiveram o mesmo grau de confiabilidade de aplicação.

Os PPP de 10 anos de TDT gerados para um poço operando individualmente pelos diferentes métodos apresentaram áreas superestimadas em comparação com o método de referência MODFLOW-MODPATH (Figura 33b). Diferentemente dos PPP de 50 dias para o poço individual, os índices C_i apresentam valores abaixo de 46% para todos os métodos (Tabela 16), sendo o método *WhAEM* o que obteve o maior valor.

Tabela 15 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 50 dias de TDT, para um poço operando individualmente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, *et al* (2007).

Método	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	C_i (%)
WhAEM	4564,58	4500,77	731,52	63,81	84,98
Simple WhAEM	5678,55	5128,95	60,95	549,6	89,36
EFU	5099,94	4885,62	348,59	214,32	89,67
RFC	5802,30	5186,31	45,9373	615,99	88,68

CA = Área comum entre o método testado e o método de referência; NPA = Área não protegida pelo método testado, e protegida pelo método de referência MODFLOW-MODPATH; OPA = Área protegida pelo método testado, e não protegida pelo método de referência; C_i = Índice de Comparação entre o método testado e o método de referência.

Tabela 16 Resultados encontrados para os diferentes métodos testados para a delimitação de PPP de 10 anos de TDT, para um poço operando individualmente, seguindo a metodologia proposta por Paradis, *et al* (2007).

Método	Área total (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	C_i (%)
WhAEM	281474,92	128900	0	152574,9	45,79
Simple WhAEM	418685,68	128900	0	289785,7	30,79
EFU	313523,94	128900	0	184623,9	41,11
RFC	314800	128900	0	185900	40,95

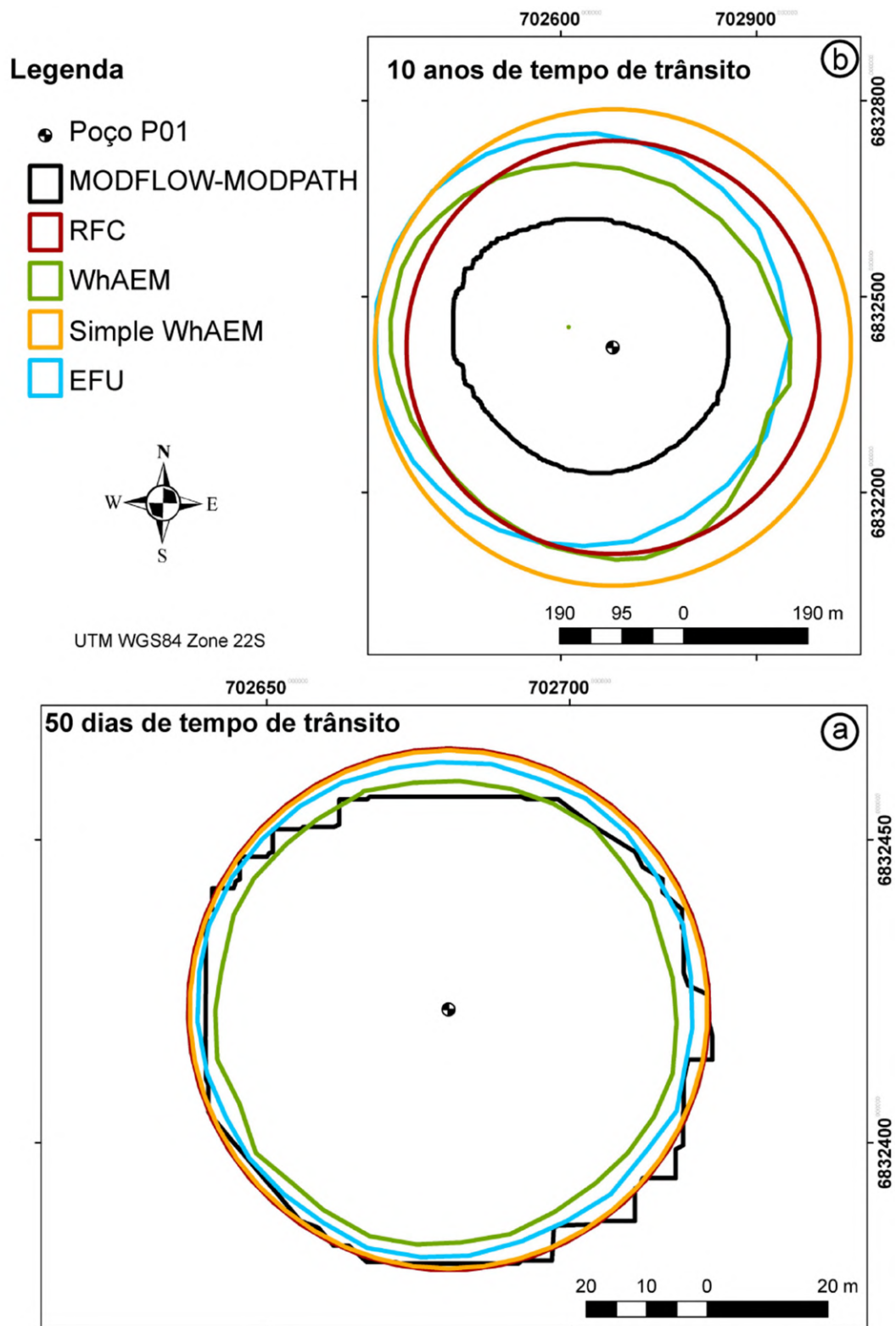


Figura 33 PPP gerados pelos diferentes métodos para o cenário de apenas um poço operando.

6.2.4.3. Discussão integrada dos resultados

Neste item são comparados e discutidos os resultados encontrados com os diferentes métodos de delimitação de PPP, nos diferentes cenários, usando o método MODFLOW-MODPATH como referência (Figura 34 e Tabela 17).

No primeiro cenário, de PPP de 50 dias de TDT com múltiplos poços operando, o método que apresentou o melhor resultado foi o *Simple WhAEM*, com *Ci* médio de 30%, seguido do método *WhAEM* com *Ci* médio de 28%. Já os piores resultados foram obtidos pelo método RFC, com *Ci* médio de 20%. Entretanto, a análise individual dos poços para esse cenário mostrou que o maior *Ci* obtido dentre todos os métodos testados foi alcançado pelo método RFC para o poço P07, com *Ci* de 84,5%, seguido pelo método *WhAEM*, com *Ci* igual a 67,1% também para o poço P07.

O segundo cenário, de PPP de 10 anos de TDT com múltiplos poços operando, o método que apresentou o melhor resultado foi o RFC, com um *Ci* de 51%, seguido do método *WhAEM*, com *Ci* de 24,8%. O pior resultado foi obtido pelo método EFU, com *Ci* de 19,8%.

No terceiro cenário, de PPP de 50 dias para o poço 01 operando individualmente, todos os métodos apresentaram bons resultados. Os métodos EFU, *Simple WhAEM* e RFC tiveram *Ci* de 89,7%, 89,4% e 88,7%, respectivamente. Já o método *WhAEM* mostrou um *Ci* ligeiramente inferior, de 85%.

No quarto e último cenário testado, de PPP de 10 anos de TDT com um poço individual operando, o método que apresentou o melhor resultado foi o *WhAEM*, com *Ci* de 45,8%, seguido do método RFC, com *Ci* de 41%. O método com menor *Ci* correspondeu ao *Simple WhAEM*, com *Ci* de 30,8%.

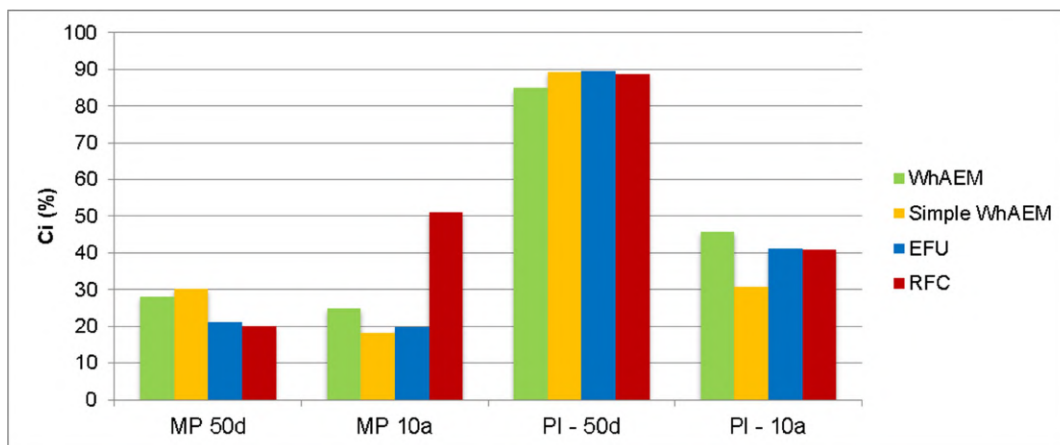


Figura 34 Variação dos Índices de Comparação C_i para os métodos testados nos distintos cenários de PPP. MP = múltiplos poços; PI = poço individual; 50a = 50 anos de TDT; 10a = 10 anos de TDT.

Tabela 17 Valores dos Índices de Comparação C_i obtidos pelos métodos testados, nos distintos cenários de PPP.

Métodos	C_i múltiplos poços 50 dias TDT (média)	C_i múltiplos poços 10 anos TDT	C_i poço individual 50 dias TDT	C_i poço individual 10 anos TDT	Média C_i por método (%)
WhAEM	28,15	24,79	84,98	45,79	40,60
Simple WhAEM	30,22	18,24	89,36	30,79	35,09
EFU	21,25	19,76	89,67	41,11	35,27
RFC	20,06	50,98	88,68	40,95	43,90

A Figura 35 apresenta a razão entre a área dos PPP gerados por cada um dos métodos testados (MT) e a área dos PPP gerados pelo método de referência (MR), sendo os melhores resultados os que mais se aproximam de 1.

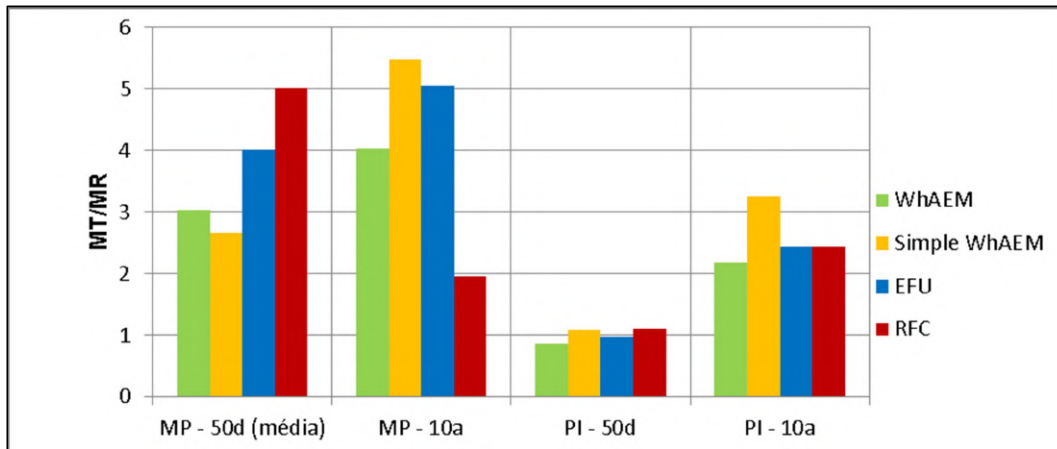


Figura 35 Variações encontradas na razão entre a área total abrangida pelo método testado (MT) e a área obtida pelo método de referência (MR), nos diferentes cenários. Quanto mais próximo a 1, maior a precisão da área do método testado. MP = múltiplos poços; PI = poço individual; 50a = 50 anos de TDT; 10a = 10 anos de TDT.

Constatou-se que todos os métodos analíticos, e o semi-analítico *WhAEM*, em geral, apresentaram maiores valores de C_i quando aplicados para um poço operando individualmente (Figura 34). Essa tendência também é observada quando comparadas as razões MT/MR (Figura 35).

Cabe ressaltar que para o método RFC, em situações de maior gradiente hidráulico, seria possível ver uma relação MT/MR bem próxima a 1, mas com valores baixos de C_i , como reportado por Paradis *et al* (2007). Maiores gradientes hidráulicos causam uma distorção nas dimensões dos PPP, ficando mais alongados no sentido de fluxo da água subterrânea, e abrangendo uma área maior a montante do que a jusante do poço. Nessas situações, como o método RFC não considera o sentido de fluxo nem o gradiente hidráulico, a tendência é superestimar a proteção a jusante, e subestimar a proteção a montante.

O aumento do TDT e a presença de múltiplos poços operando são fatores que contribuem para a perda de precisão dos métodos analíticos e semi-analíticos testados. Quanto maior o TDT, maior a área de influência e, conseqüentemente, maiores são as incertezas de variações espaciais dos parâmetros hidrogeológicos. Da mesma forma, em uma área com múltiplos poços operando, a complexidade do fluxo da água subterrânea e do transporte de partículas aumenta, impossibilitando que esses métodos consigam incorporá-las em suas soluções (PARADIS *et al.*, 2007; CARVALHO & HIRATA, 2012; DONG *et al.*, 2013; LYU *et al.*, 2019).

A predisposição de se superestimar as áreas de proteção pelos métodos testados também é encontrada nos trabalhos de Carvalho & Hirata (2012), que testaram os métodos RFC e EFU, e de Lyu *et al.* (2019), que investigaram os métodos RFC, EFU e WhAEM. Ademais, em ambos os estudos constatou-se que em situações de TDT mais curto e baixo gradiente hidráulico, a tendência é que os resultados se aproximem dos obtidos pelo modelo numérico de referência, com exceção do método EFU, que, segundo os autores, tem melhores resultados em aquíferos com gradientes hidráulicos maiores.

Já no trabalho desenvolvido por Fillecia (2015), os métodos RFC e WhAEM subdimensionaram em área os PPP quando comparados ao modelo numérico de referência. O mesmo padrão de resultados foi obtido por Goodarzi & Eslamian (2019) e por Paradis *et al.* (2007) para o método WhAEM, e por Dong *et al.* (2013) para o método RFC. Isso demonstra a não linearidade dos resultados obtidos por cada método, dependendo diretamente das características do meio físico.

No trabalho desenvolvido por Lyu *et al.* (2019), o método que mais superestimou as áreas dos PPP foi o RFC. Este resultado não foi observado no presente estudo por dois motivos principais: (1) o clima na costa israelense é significativamente mais árido que na costa do sul do Brasil; (2) as vazões dos poços no trabalho de Lyu *et al.* (2019) são maiores. E ao analisar a Equação (4-2), é possível observar que as dimensões do PPP são inversamente proporcionais à taxa de recarga do aquífero, e diretamente proporcionais à vazão do poço em questão.

Mesmo sendo o método mais simples dentre todos os testados, o RFC foi o que apresentou, em geral, os resultados mais semelhantes aos obtidos pelo modelo numérico. Não se pode deixar de salientar que isso se deve às características locais, pois o método não considera elementos como corpos de água adjacentes a poços, heterogeneidades geológicas verticais ou horizontais, o gradiente hidráulico, entre outros.

6.3. Relação da zona total de captura com PPP de 10 e 20 anos de TDT

Conforme mencionado no item 4.3.7.2, diversos autores sugerem a adoção de PPP de 10 ou 20 anos de TDT como zona total de captura. Sendo assim, foram comparadas as dimensões de cada uma dessas zonas, para avaliar se é possível adotar PPP de 10 ou 20 anos como zona total de captura para os oito poços da empresa Jaguaruna Saneamento, em um cenário onde todos os poços operam simultaneamente, com as vazões máximas licenciadas.

Os resultados apontam que a zona de captura possui uma área 2,2 vezes maior que o PPP de 20 anos de TDT, e 2,7 vezes maior que o PPP de 10 anos de TDT (Figura 36 e Tabela 18) e, portanto, não se recomenda a adoção desses valores de TDT para a gestão de longo prazo da qualidade da água subterrânea para essa área ou quaisquer outras inseridas em condições hidrogeológicas semelhantes. No caso da empresa Jaguaruna Saneamento, que possui a outorga para abastecer a população até o ano 2056, o ideal é adotar e gerenciar toda a zona de captura como PPP, limitando o desenvolvimento de atividades que apresentam risco de contaminar o aquífero com contaminantes persistentes.

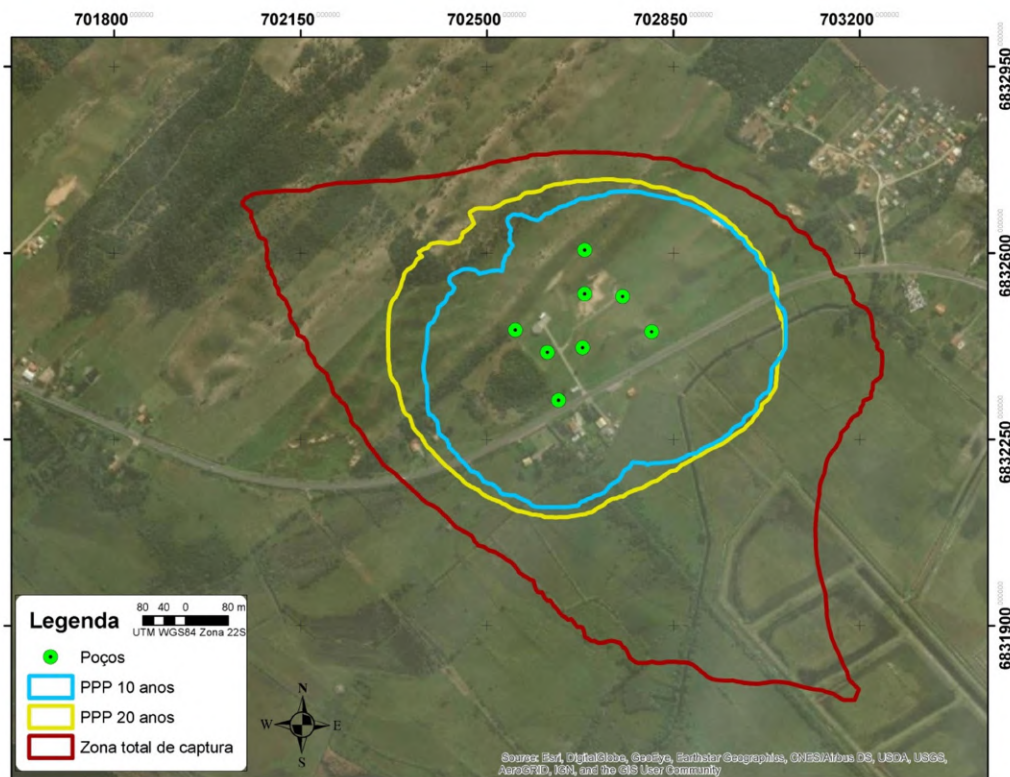


Figura 36 Representação da zona total de captura, e dos PPP de 10 e 20 anos de TDT, para os oito poços da planta de abastecimento público da empresa Jaguaruna Saneamento.

Tabela 18 Áreas dos PPP de 10 e 20 anos de TDT, e da zona total de captura dos oito poços da empresa Jaguaruna Saneamento.

Zona	Área total (m ²)
PPP 10 anos TDT	291800
PPP 20 anos TDT	355100
Zona total de captura	788400

6.4. Efeitos da diminuição na taxa de recarga

Delimitar a zona de contribuição de um poço tem extrema importância na gestão da qualidade da água extraída em plantas de abastecimento público, possibilitando planejamentos de uso e ocupação de longo prazo. Considerando que a recarga, dentre os dados de entrada de um modelo hidrogeológico, é o principal parâmetro sujeito às mudanças climáticas ou intervenções na cobertura do solo, torna-se necessário avaliar se as áreas definidas como zona de captura continuam cumprindo seu papel protetivo em situações de diminuição da taxa de recarga de um aquífero.

A partir das mesmas simulações estocásticas calibradas, foi determinada a zona de contribuição do poço P01, operando individualmente com uma vazão de 360 m³/dia. Em seguida, reduziu-se 50% dos valores de entrada médio, máximo e mínimo da recarga, e o modelo foi processado novamente. O resultado foi a geração de 36 soluções que apresentaram recarga média 34% menores em relação às 36 soluções calibradas (Tabela 19), possibilitando analisar os efeitos nas dimensões da zona de captura.

Tabela 19 Valores de recarga aplicados nos modelos calibrados (cenário atual), e nos modelos que simulam um período de estiagem, com redução na taxa de recarga.

	Recarga atual (m/dia)	Recarga estiagem (m/dia)	Redução da recarga na estiagem (%)
Média geométrica	0,00029	0,0001908	34%
Média aritmética	0,0003	0,0001949	35%
Mínimo	0,00017	0,0001208	29%
Máximo	0,00059	0,0002784	53%

Além das variações na zona total de captura, avaliou-se a influência que a mesma redução de recarga poderia ter nas dimensões de um PPP de 50 dias de TDT. Os resultados sobre os efeitos na zona de captura são apresentados na Tabela 20 e na Figura 37, e dos efeitos no PPP de 50 dias de TDT na Tabela 21 e na Figura 38.

A redução de, em média, 34% da taxa de recarga resultou em um aumento de 68% da área total da zona de captura do poço P01, enquanto que para o PPP de 50 dias de TDT o aumento foi de apenas 2%.

Tabela 20 Área da zona de captura do poço P01 no cenário atual, e no cenário de estiagem simulado.

Zona total de captura	Área (m ²)
Atual	641200
Estiagem	1080000

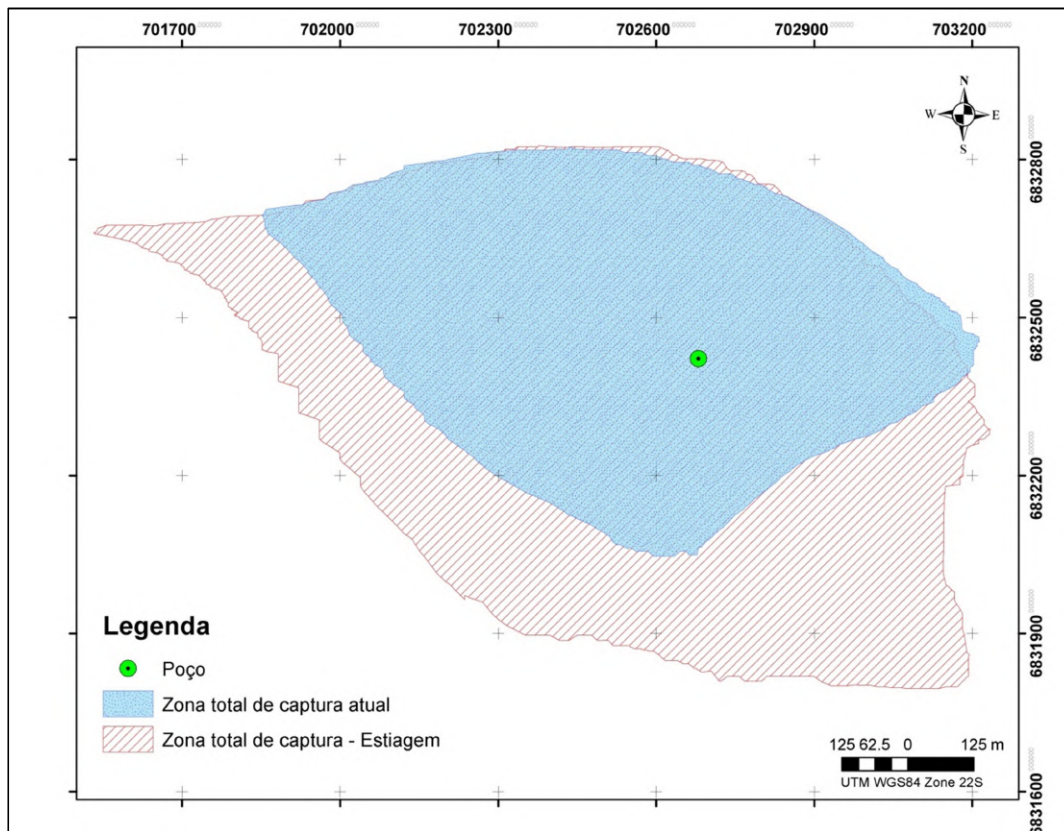


Figura 37 Representação da área da zona total de captura do poço P01 no cenário atual, e da área em uma simulação de situação de estiagem.

Tabela 21 Área do perímetro de proteção do poço P01 de 50 dias de TDT, no cenário atual, e no cenário de estiagem simulado.

PPP 50 dias	Área (m ²)
Atual	5232,29
Estiagem	5347,82

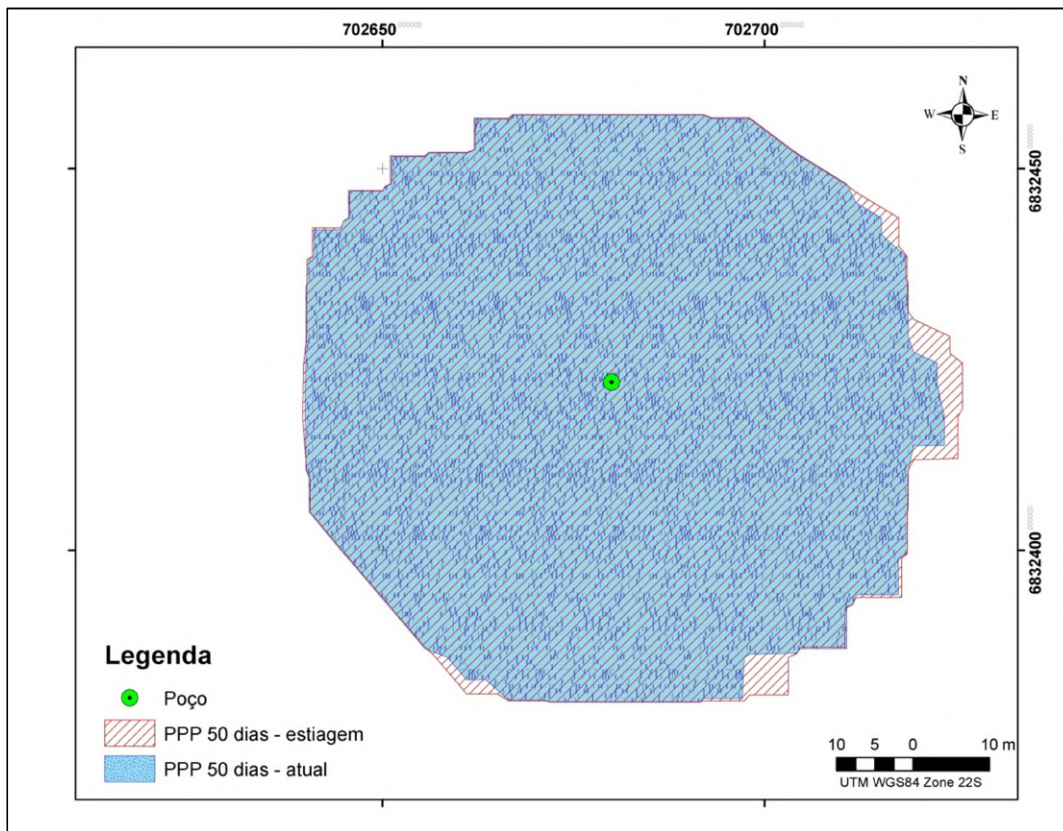


Figura 38 Representação da área do PPP de 50 dias de TDT no cenário atual, e da área em uma simulação de situação de estiagem.

Verificou-se que a redução da recarga é mais relevante na zona total de captura quando comparados com os efeitos em PPP de TDT curtos, como 50 dias, possivelmente devido a fatores como o trânsito na zona não saturada que, por curtos períodos, pode amortecer os efeitos das variações climáticas (CORONA *et al.*, 2017). Com isso entende-se que é necessário dentro do planejamento urbano que se busque quais são as projeções de mudanças climáticas em uma região, bem como se o plano diretor definido pode resultar em uma redução na taxa de recarga do aquífero, afetando então as dimensões da zona total de captura de um poço.

7. Conclusões

Ao analisar os resultados de presente estudo, conclui-se que:

- O uso de modelos estocásticos é essencial quando o objetivo do modelo é assegurar a qualidade e quantidade de água para consumo humano, tendo

em vista que as incertezas presentes em modelos determinísticos não são mensuráveis.

- Todos os métodos apresentam bons resultados quando aplicados para tempos de trânsito curtos (50 dias), para um poço operando individualmente, em condições hidrogeológicas e climáticas semelhantes as do local da planta de abastecimento da Jaguaruna Saneamento. Sendo o método RFC o de melhor custo-benefício.

- Para perímetros de proteção com tempos de trânsito maiores, todos os métodos superestimaram as áreas, tanto para múltiplos poços quanto para um poço individual. Sendo assim, se juntamente com o objetivo de proteção dos poços, há interesse socioeconômico de uso da área, se faz necessária aplicação de métodos numéricos, como o MODFLOW-MODPATH, para melhorar a eficiência das ações de proteção.

- Dependendo da importância que uma planta de abastecimento com múltiplos poços possa ter em termos de abastecimento público, é recomendada, inclusive para TDT curtos, a aplicação de modelos numéricos tridimensionais, pois como foi visto, métodos analíticos e semi-analíticos em duas dimensões não conseguem incorporar certas complexidades do fluxo, podendo em alguns casos superestimar, e em outros subestimar as áreas de proteção.

- Não deve se adotar PPP de 10 ou 20 anos de TDT como zona total de captura de poços em condições hidrogeológicas semelhantes as do presente estudo, tendo em vista que a zona total de captura se mostrou substancialmente maior que os TDT testados.

- As dimensões da zona total de captura de um poço aumentam em resposta à redução da taxa de recarga de um aquífero, seja por redução na precipitação por mudanças climáticas, ou por alterações na cobertura do solo. Já PPP de TDT curto, como de 50 dias, não apresentou mudanças significativas em sua área.

8. Bibliografia

ADAMS, B.; FOSTER, D., 1992. Land-Surface Zoning for Groundwater Protection. *Journal of Institution of Water and Environmental Management* 6. P. 312-320.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W., 1992. Model Execution and the Calibration Process. Chapter 8 in: Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. First Edition. Academic Press, February, 1992. 381 p.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W.; HUNT, R.J., 2015. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Second Edition. Academic Press, August, 2015. 630 p.

AQUAVEO, 2014. Software GMS 10.0 Groundwater Modeling System <https://www.aquaveo.com/announcements>.

AQUAVEO, 2016a. GMS 10.1 Tutorial: MODFLOW – Stochastic Modeling, Parameter Randomization. 14 p.

AQUAVEO, 2016b. GMS 10.1 Tutorial: MODFLOW – Stochastic Modeling, Indicator Simulations. 9 p.

BAALOUSHA, H., 2011. Fundamentals of Groundwater Modelling, Chapter 4, in: Groundwater Modelling, Management. P. 113-130. Editors: L.F. Konig and J.L. Weiss. January, 2011.

BEAR, J., CHENG, A.F.D., 2010. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport: Theory and Applications of Transport in Porous Media. Vol. 23. Publisher: Springer Netherlands.

CABRAL, J.S.P., DEMETRIO, J.G.A., 2008. Aplicação de Modelos em Hidrogeologia. In: FEITOSA, F.A.C., FILHO, J.M., FEITOSA, E.C., DEMETRIO, J.G.A., 2008. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3° edição. CPRM.

CARDOSO, F.B.F.; OLIVEIRA, F.B.; NETO, P.L.V.; PAZ, R.N.P., 2007. MAPA DOS DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DE SANTA CATARINA: UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO. XV Encontro nacional dos Perfuradores de Poços – I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste. 27 p.

CARUSO Jr. F., 1997. Mapa Geológico da Região Sul de Santa Catarina. Escala 1:100.000. Itajaí. UNIVALI/OSNLR/UFRJ.

CARVALHO, A.M.; HIRATA, R., 2012. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. Revista do Instituto de Geociências – USP. São Paulo, v. 12, n.1., p. 53-70, Abril, 2012.

CHAVE, P., HOWARD, G., SCHIJVEN, J., APPLEYARD, S, FLADERER, F., SCHIMON, W., 2006. Groundwater protection zones. Chapter 17 in: World Health Organization. Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources. Edited by O. Schmoll, G. Howard, J. Chilton and I. Chorus. ISBN: 1843390795. Published by IWA Publishing, London, UK.

CLARICH, A.; RUSSO, R., 2019. Screening Analysis and Adaptive Sparse Collocation Method. P. 185 – 201. In: HIRSCH, C.; WUNSCH, D.; SZUMBARSKI, J.; LANIEWSKI-WOLLK, L.; PONS-PRATS, J., 2019. Uncertainty Management for Robust Industrial Design in Aeronautics – Findings and Best Practice Collected During UMRIDA, a Collaborative Research Project (2013-2016) Funded by the European Union. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. V. 140. 799 p.

CLEARY, T.B.F.; CLEARY, R.W., 1991. Delineation of Wellhead Protection Areas: Theory and Practice. Water Science Technology. Vol. 24, No. 11, p. 239 – 250, 1991.

CORONA, C.R.; GURDAK, J.J.; DICKINSON, J.E.; FERRÉ, T.P.A.; MAURER, E.P., 2017. Climate variability and vadose zone controls on damping of transient recharge. Journal of Hydrology. Article in press. 11p.

DOHERTY, P., 1994. PEST. Corinda, Australia: Watermark Computing.

DONG, Y., XU, H., Li, G., 2013, Wellhead protection área delineation using multiple methods: A case study in Beijing. Environmental Earth Sciences, Springer, p. 481-488.

EMBRAPA, 2012. Atlas climático da região sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2º edição. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

ESRI, 2011. ArcGIS Desktop Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

FERRARI, L.C.K.M., 2006. Modelagem Tridimensional de Fluxo de Águas Subterrâneas em um Aquífero Livre e Raso: Aplicações no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo.

FILECCIA, A., 2015. Some simple procedures for the calculation of the influence radius and well head protection areas (theoretical approach and a filed case for a water table aquifer in an alluvial pain). *Acque Sotteranee – Italian Journal of Groundwater* (2015) – AS14065:007 – 23.

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

FRIND, E.O., MOLSON, J.W., 2018. Issues and Options in the Delineation of Well Capture Zones under Uncertainty. *Groundwater*, National Ground Water Association. February, 2018. 12 p.

GOLDEN SOFTWARE, LLC, 2018. Surfer16®. Golden Software, LLC. 809, 14th Street, Golden, Colorado 80401. www.goldensoftware.com.

GOODARZI, M., ESLAMIAN, S.S., 2019. Evaluation of WhAEM and MODFLOW models to determine the protection zone of drinking wells. *Environmental Earth Sciences*, 78:195. 8 p.

GOOVAERTS, P., 2007. Geostatistical Modeling of the Spaces of Local, Spatial, and Response Uncertainty for Continuous Petrophysical Properties. Chapter 6 in: COBURN, T.C.; YARUS, J.M., CHAMBERS, R.L., 2007.

Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies, Volume II.

GUILLAUME, J.H.A., HUNT, R.J., COMUNIAN, A., BLAKERS, R.S., FU, B., 2016. Methods for Exploring Uncertainty in Groundwater Management Predictions. Chapter 28 in: JAKEMAN, A.J., BARRETEAUS, O., HUNT, R.J., RINUALDO, J., ROSS, A., Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges. Springer.

HAITJEMA, H.M., 1995. Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. Academic Press. INC. 407 p.

HARBAUGH, A.H.; BANTA, E.R.; HILL, M.C.; McDONALD, M.G., 2000. MODFLOW-2000, U.S. Geological Survey.

HORN FILHO, N. O. 2003. Setorização da Província Costeira de Santa Catarina em base aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geográficos. Geosul, Florianópolis, v.18, n.35, p.71-98, jan/jun.2003.

HORN FILHO, N.O., SCHMIDT, A.D., BENEDET, C., NEVES, J., PIMENTOA, L.H.F., PAQUETTE, M., ALENCAR, R., SILVA, W.B., VILLELA, E. GENOVEZ, R., SANTOS, C.G., 2014. Estudo Geológico dos Depósitos Clásticos Quaternários Superficiais da Planície Costeira de Santa Catarina, Brasil. Gravel, Dezembro, 2014, v.12. p. 41-107, Porto Alegre.

HUNT, R.J.; WELTER, D.E., 2010. Taking Account of “Unknown Unknowns”. Ground Water, Vol. 48, No. 4, p. 477, August, 2010.

IBGE, 2009. Manual técnico de geomorfologia / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro. 182 p.

182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598 ; n. 5)

IBGE, 2021. Panorama do município de Jaguaruna/SC. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/jaguaruna.html> acesso em maio/2021.

IMAN, R. L., CONOVER, W., 1980. Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment. *Commun. Stat. Theory Methods* 9(17), 1749–1842.

KINZELBACH, W.; VASSOLO, S.; LI, G., 1996. Determination of capture zones of wells by Monte Carlo simulation. *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling (Proceedings of the ModelCARE 96 Conference, Golden, Colorado. IAHS Publ. no 237, 1996.*

KRAEMER, S.R.; HAITJEMA, H.M., 2018. Working with WhAEM: Demonstration of Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer for Wellhead Protection. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. June, 2018.

KREBS, A.S.J.; ALEXANDRE, N.Z., 2000. Recursos Hídricos da Bacia hidrográfica do Rio Araranguá-SC: Disponibilidade e Conflitos. 1° Joint Word Congresso in Groundwater, Fortaleza.

LANDMEYER, J.E., 1994. Description and Application of Capture Zone Delineation for a Wellfield at Hilton Head Island, South Carolina. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 94-4012. Columbia, South Carolina.

LIU, Y., WEISBROD, N., YAKIREVICH, A., 2019, Comparative Study of Methods for Delineating the wellhead Protection Area in an Unconfined Coastal Aquifer. *Water*, MDPI. 17 p.

MACHADO, J.L.F., 2014. UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte/MG. 20p.

MARTIN, L.; SUQUIO, K.; FLEXOR, J.M.; DE AZEVEDO, A.E.G.; 1988. MAPA GEOLÓGICO DO QUATERNÁRIO COSTEIRO DOS ESTADOS DO PARANÁ E SANTA CATARINA. Ministério de Minas e energia, Série Geológica, nº 28. Seção Geologia Básica, nº 18. Brasil. 1988.

MARTINS, E.M. *et al.*, 2017. Subsídios para o planejamento estratégico costeiro do município de Jaguaruna, Santa Catarina. Desenvolvimento e Meio Ambiente. Edição especial: X Encontro Nacional de Gerenciamento Costeiro, UFPR.

MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., 1984. A MODULAR THREE-DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL. United States Department of the Interior. U.S. Geological Survey. 539 p.

MOGHEIR, Y., TARAZI, G., 2010. Comparative Identification of Wellhead Protection Areas for Municipal Supply Wells in Gaza. J. Water Resource and Protection. P. 105-114.

MCKAY, M.D., BECKMAN, R.J., CONOVER, W.J., 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 42(1), 55–61.

MOLSON, J.W; FRIND, E.O., 2011. On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-to-travel zones for source water protection. Journal of Contaminant Hydrology. Elsevier. P. 76-87.

MOTSOPOULOS, K.N., GEMITZI, A., TSIHRINTZIS, V.A., 2007. Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method: theoretical background and GIS-based stochastic analysis. Environmental Geology (2008). 55: 1081-1090.

MUDAT, J.E., MELO, A.T., RIBEIRO, D., SOUZA, D.R., NEVES, J., DI PIETRO

FILHO, J.E., KITAHARA, M.V., HORN FILHO, N.O., OLIVEIRA, U.R., 2006. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA COSTEIRA DA FOLHA SOMBRIÓ, SC. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia / Regional Conference on Geomorphology. Goiania/GO, Setembro. 13 p.

PARADIS, D.; MARTEL, R., KARANTA, G; LEFEBVRE, R; MICHAUD, Y.; THERRIEN, R.; NASTEV, M., 2007. Comparative Study of Methods for WHPA Delineation. Ground Water, vol. 45, No. 2, March- April 2007, p. 158 – 167.

RIEDEL, T.; WEBER, T.K.D., 2020. Review: the influence of global change on European's water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. 21p.

POLLOCK, D.W., 1989. Documentation of Computer Programs to Compute and Display Pathlines Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite Difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey.

POLLOCK, D.W., 2017, MODPATH v7.2.01: A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Software Release, 15 December 2017, <http://dx.doi.org/10.5066/F70P0X5X>.

SANTA CATARINA, 2014. Resolução Nº 2, de 14 de agosto de 2014. Dispõe sobre o uso das águas subterrâneas no Estado de Santa Catarina. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Sustentável, Estado de Santa Catarina.

SÃO PAULO, 1991. Decreto Nº 32.955, de 07 de Fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 02/06/1998, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo.

S&A Geologia, 2016, Estudo Hidrogeológico para Implantação de Poços de Abastecimento. Contratante: Águas de Jaguaruna Ltda.

SENHORINHO, E.M.; MACHADO, J.L.F.; MARCUZZO, F.F.N., 2017. Características Hidrogeológicas dos Aquíferos da Sub-Bacia 84 – Região Sul e Sudeste de Santa Catarina. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC.

SETHI, R., DI MOLFETTA, A., 2019. Groundwater Engineering, Springer Tracts in Civil Engineering. Chapter 8: Well Head Protection Areas. P. 161 – 168.

STABOULTZIDIS, A., DOKOU, Z., KARATZAS, G.P. (2016). Delineation of wellhead protection area in Crete, Greece using an analytic element model. International Conference of Efficient & Sustainable Water Systems Management

toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016. Procedia Engineering 162, 324 – 331.

TODD, D.K.; MAYS, L.W. 4.3 WELL IN A UNIFORM FLOW, 2004. In Groundwater Hydrology, 3rd ed.; Bill, Z., Ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2004; p. 656.

SUGUIO, K., 2003. Geologia Sedimentar. São Paulo: Edgard Blucher.

TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A., 2000. O Cenozóico Costeiro do Rio Grande do Sul: *in*: HOLZ, M.; DE ROS, L.F., Geologia do Rio Grande do Sul. P. 375-406.

USEPA, 1994. Handbook: Ground Water and Wellhead Protection. Office of Ground Water and Drinking Water. 288 p.

USEPA, 2018. Wellhead Analytic Element Model (WhAEM). Environmental Modeling Community of Practice. United States Environmental Protection Agency. www.epa.gov/ceam/wellhead-analytic-element-model-whaem

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R., 2005. Perímetro de Proteção de Poços: uma importante ferramenta para a sustentabilidade de mananciais públicos. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços – II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 12 p.

WOTTRICH, I., 2012. Uso de ferramentas computacionais na construção de modelos estocásticos de fluxo e delimitação de perímetros de proteção de poços. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. 134 p.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J., 2007. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. *In*: BECKER, F.G.; RAMOS, E.A.; MOURA, L.A., 2007. Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Brasília/DF. Cap.2. Seção I. P. 20-33.

9. Artigo

Environmental Monitoring and Assessment

Analysis and comparison of wellhead protection areas delimitation methods using a stochastic MODFLOW model as a reference

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:					
Full Title:	Analysis and comparison of wellhead protection areas delimitation methods using a stochastic MODFLOW model as a reference				
Article Type:	Original Research				
Keywords:	Groundwater management; capture zone; MODPATH; time of travel; WhAEM				
Corresponding Author:	Lucas Medeiros Bofill Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, Rio Grande do Sul BRAZIL				
Corresponding Author Secondary Information:					
Corresponding Author's Institution:	Universidade Federal do Rio Grande do Sul				
Corresponding Author's Secondary Institution:					
First Author:	Lucas Medeiros Bofill				
First Author Secondary Information:					
Order of Authors:	Lucas Medeiros Bofill Alexandra Vieira Suhogusoff Luiz Ferrari Ari Roisenberg				
Order of Authors Secondary Information:					
Funding Information:	<table border="1"> <tr> <td>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</td> <td>Mr. Lucas Medeiros Bofill</td> </tr> <tr> <td>Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/00844-7)</td> <td>Dr Alexandra Vieira Suhogusoff</td> </tr> </table>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	Mr. Lucas Medeiros Bofill	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/00844-7)	Dr Alexandra Vieira Suhogusoff
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	Mr. Lucas Medeiros Bofill				
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/00844-7)	Dr Alexandra Vieira Suhogusoff				
Abstract:	<p>Sustainable use of groundwater while maintaining economic and social development is a major challenge, and the implementation of Wellhead Protection Areas (WHPA) for public supply wells helps to achieve these goals. The present study analyses the WHPA delineation methods Calculated Fixed Radius (CFR), and three solutions of the WhAEM software (USEPA, 2018), two analytical and one semi-analytical, comparing its results with WHPA generated with a stochastic tridimensional MODFLOW-MODPATH model. Comparisons were conducted in two scenarios: eight pumping wells operating simultaneously and a single well pumping, located on a coastal plain in Jaguaruna County, Santa Catarina State, Brazil. All methods presented satisfactory results when delineating a 50-day time-of-travel (TOT) WHPA for a single well. As TOT increases, uncertainties are incorporated, and results precision is lost. Multiple wells pumping simultaneously presented similar issues regarding uncertainties due to the incorporation of three-dimensional flow complexities caused by wells interferences. The CFR method demonstrated the best cost-benefit. Other analyses are presented, as a comparison between the dimensions of the capture zone and the 10 and 20 years TOT WHPA, indicating that managing the whole capture zone is the best way to protect against conservative contaminants. Additionally, this study analyses the effects caused by a recharge rate reduction in a single well capture zone and 50-day TOT WHPA dimensions. Finally, is compared WHPA generated by a stochastic and a deterministic model, in order to understand how uncertainties can affect model results.</p>				
Suggested Reviewers:	Daniel Ronen Ben-Gurion University of the Negev				

Analysis and comparison of wellhead protection areas delimitation methods applying a stochastic MODFLOW model as a reference

Lucas Medeiros Bofill¹ - lucasbofill@yahoo.com.br

Ari Roisenberg¹ - ari.roisenberg@ufrgs.br

Alexandra Vieira Suhogusoff² - suhogusoff@usp.br

Luiz Ferrari - lf.modcom@gmail.com, São Paulo, Brazil.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Geociências - Porto Alegre, Brazil.

² Universidade de São Paulo – Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas CEPAS - São Paulo, Brazil.

Abstract

Sustainable use of groundwater while maintaining economic and social development is a major challenge, and the implementation of Wellhead Protection Areas (WHPA) for public supply wells helps to achieve these goals. The present study analyses the WHPA delineation methods Calculated Fixed Radius (CFR), and three solutions of the WhAEM software (USEPA, 2018), two analytical and one semi-analytical, comparing its results with WHPA generated with a stochastic tridimensional MODFLOW-MODPATH model. Comparisons were conducted in two scenarios: eight pumping wells operating simultaneously and a single well pumping, located on a coastal plain in Jaguaruna County, Santa Catarina State, Brazil. All methods presented satisfactory results when delineating a 50-day time-of-travel (TOT) WHPA for a single well. As TOT increases, uncertainties are incorporated, and results precision is lost. Multiple wells pumping simultaneously presented similar issues regarding uncertainties due to the incorporation of three-dimensional flow complexities caused by wells interferences. The CFR method demonstrated the best cost-benefit. Other analyses are presented, as a comparison between the dimensions of the capture zone and the 10 and 20 years TOT WHPA, indicating that managing the whole capture zone is the best way to protect against conservative contaminants. Additionally, this study analyses the effects caused by a recharge rate reduction in a single well capture zone and 50-day TOT WHPA dimensions.

Finally, is compared WHPA generated by a stochastic and a deterministic model, in order to understand how uncertainties can affect model results.

Keywords: Groundwater management, capture zone, MODPATH, time of travel, WhAEM

Introduction

Sustainable use of groundwater resources while maintaining economic and social development is a major challenge for the 21st century, depending on a diversity of policy and institutional settings. Unfortunately, groundwater is often unacknowledged and undervalued, even though it is estimated that one-third of the world's population depends on groundwater supply (Hiscock, 2001; Falkenmark, 2005)

The United Nations World Summit on Sustainable Development (2002) pointed safe drinking water access as a key element to achieve sustainable development, highlighting the importance of policy instruments as land-use management, regulation and monitoring. Even so, in 2015, 29% of the global population still lacks access to safe drinking water (UN, 2019).

The implementation of Wellhead Protection Areas (WHPA) for public supply wells is a widely used tool, especially in developed countries, which define safeguard measures and restrictions to land use to prevent contaminants from reaching abstraction points (Sethi & Molfetta, 2019). However, in developing countries, poverty and limited capacity to provide compensation packages turns particularly difficult to implement land use restrictions. Thus, after the WHPA delineation, prioritizing schemes for groundwater protection may be required, aiming to balance economic development and resource protection (Chave et al., 2006).

Hirata & Suhogusoff (2019) report that the groundwater extraction in Brazil represents only 2% of the effective recharge, with a great potential to meet future demands. The authors alert that the absence of information on aquifers has affected the proper management of groundwater resources, increasing the contamination risks. The study is conducted in Jaguaruna County, which has groundwater as the primary source of water supply, such as many small to medium-sized urbanized areas in Brazil. In 2016, the public supply company

was granted the right to supply the community for 40 years. However, the lack of awareness of groundwater vulnerability to contaminants resulted in the exclusion of WHPA implementation out of municipal planning.

Defining protection zones is particularly effective in controlling pollution from diffuse sources. It can be achieved through different approaches, such as vulnerability assessment, risk assessment, fixed radius, and time of travel (TOT) zones (Chave, 2006). In the present study, the latter is used. Researchers have presented many methods for defining WHPA, varying from simple arbitrary methods, which require only a map and a compass to draw a circle with a fixed radius around the well, to complex ones, which needs an extensive database and professionals with hydrogeology and modeling expertise (USEPA, 1994).

Even though groundwater models are prevalent in hydrogeological studies, high costs are involved in their application. This is one of the reasons why public water supply companies hardly use it, especially in developing countries such as Brazil. In view of this, this study aims to analyze and compare some of the most traditional WHPA methods that uses TOT as a measurement parameter, and to define the most cost-effective method to apply in similar hydrogeological settings. First, a WHPA is delineated through a stochastic numerical model using the MODFLOW2000 (Harbaugh *et al.*, 2000) code, considered as a reference to be compared with the results obtained by simpler methods, as Calculated Fixed Radius (CFR), and three solutions present in the WhAEM software (USEPA, 2018), two analytical and one semi-analytical solution.

Additionally, other analyses are presented: (I) the effectiveness of using a 10-year and a 20-year TOT WHPA against persistent contaminants. (II) How a recharge rate reduction affects the capture zone and a 50-day TOT WHPA dimensions. (III) A reliability evaluation of using a deterministic numerical model in WHPA delineation.

Material and Methods

Study area

The study area is a public drinking water-supply wellfield composed of eight pumping wells located in Jaguaruna County, Santa Catarina State, Brazil. Geologically, it is situated on a quaternary barrier-lagoon system, more specifically on the Barrier III (Fig. 1a), thus far is believed to have formed during the last 400.000 years as a result of sea-level oscillations (Tomazelli & Villwock, 2000) (Fig. 1b). The barrier-lagoon deposits are characterized by transitional and shallow marine environments, composed mainly by unconsolidated sandy marine sediments reworked by the winds, interspersed with clay layers rich in organic matter (Villwock, 1984).

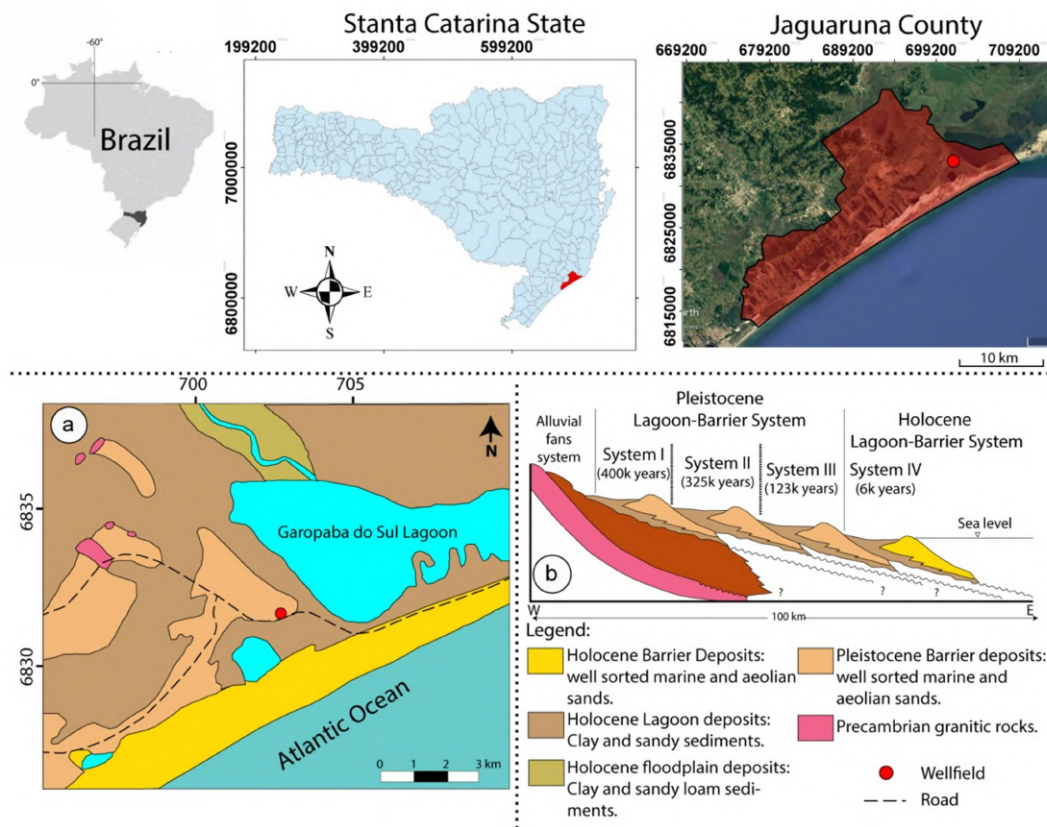


Fig. 1 Study area location in Jaguaruna County. (a) Wellfield geological settings (Martin et al., 1988); (b) South Brazil coastal plain cross-section, representing the lagoon-barrier system (Tomazelli & Vilwock, 2005)

The main aquifer unit is a medium white sand Pleistocene barrier with tabular geometry in local scale, with thickness up to 20m limited on the base by

a clay layer with at least 4m thickness. A 4m thick sandy loam lenticular layer overlay the main aquifer unit. The presence of a top layer composed by yellow fine sand depends on the terrain topography, with thickness up to 8m (Fig. 2).

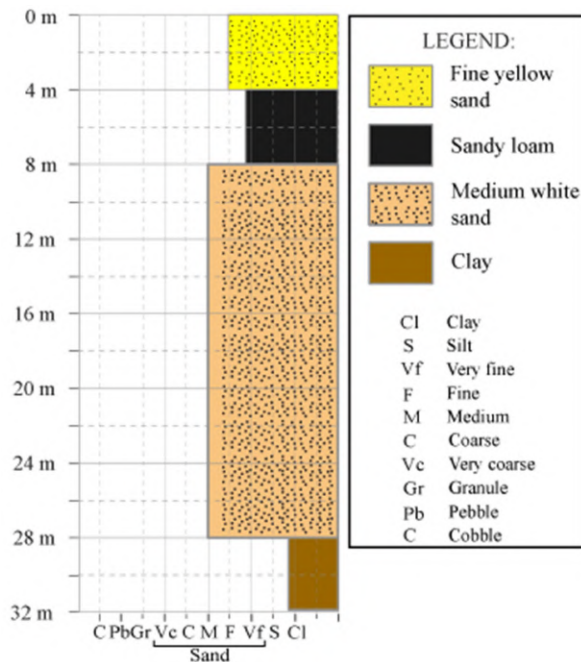


Fig. 2 Geological profile of the studied area

Groundwater modeling

A steady-state stochastic three-dimensional MODFLOW-MODPATH (Pollock, 2017) numerical model was applied via the Groundwater Modeling System (GMS) software (Aquaveo, 2014), in order to generate reference WHPA to compare with simpler methods of WHPA delineation. The methodology applied to build the numerical model is described below.

- **Conceptual model**

After defining the model objective, the next step was to create a hydrogeological conceptual model by the characterization of hydrogeological units and boundary conditions. For which, it was inputted data from well logs, pumping tests, topographic map, geological mapping, precipitation time series, literature from previous studies in the area, and a RTK GPS survey to collect hydraulic head in superficial water bodies and drainages inside the model domain. Furthermore, was inputted eight supply wells data regarding screen bottom and top elevations, the pumping rate, and the hydraulic heads measured

in the same day of the survey to collect hydraulic head data. Head data were available for only five from the eight wells (Table 1).

Table 1 Data from the eight pumping wells applied to build the conceptual model.

Name	Coord. X	Coord. Y	Screen top elevation (m)	Screen bottom elevation (m)	Pumping rate (m ³ /d)	Hydraulic head (m)
W1	702680	6832422	-1.83	-15.83	0	-
W2	702614	6832413	0.2	-15.8	39	-1,22
W3	702684	6832523	-1.44	-15.44	360	-
W4	702755	6832518	-2.81	-16.81	50	0,4
W5	702684	6832605	0.38	-17.62	387	-8,24
W6	702554	6832455	-1.05	-17.05	50	1,11
W7	702635	6832323	-0.57	-15.57	52	2,4
W8	702810	6832451	-2.5	-18.5	0	-

The lateral domain was limited mainly by large water bodies and small drainages. The Atlantic Ocean and the Garopaba Lagoon represent the southeast and northeast boundaries respectively. The southwest and the northern domain limits were defined based on small water bodies, as a flooded mine pit, a weir, and drainages.

The model domain top limit was the terrain topography defined by the digital terrain model generated in the ArcGIS 10.3® software (ESRI, 2011), with data from a planialtimetric plant combined with a 12.5 m spatial resolution ALOS PALSAR satellite image (Fig. 3). The bottom domain limit was placed in a low permeability clay layer with at least 4 m thickness at the elevation of -25 m.

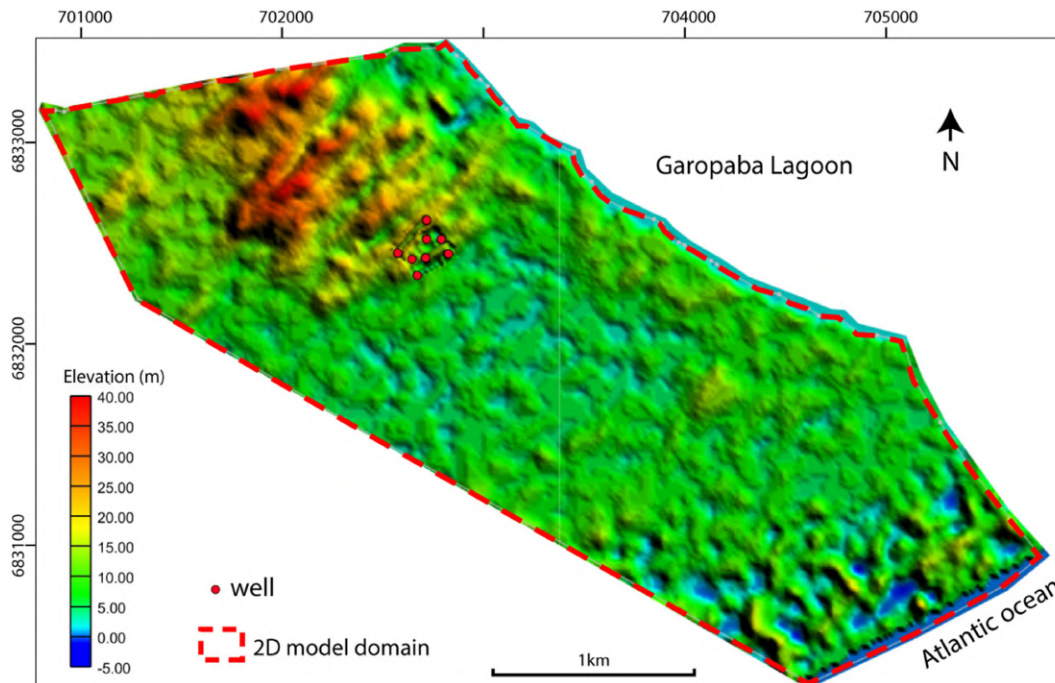


Fig. 3 Lateral model domain and digital terrain model representing the top of the numerical model domain.

The hydrostratigraphic units were defined using borehole data and geological mapping, thereby fitting with lithologies and employing the same nomenclature presented in Fig. 2. The main hydrostratigraphic unit, the medium white sand, is the only unit with measured hydraulic parameters, as hydraulic conductivity and effective porosity. Parameters that were not possible to measure directly, as hydraulic conductivity from the other lithologies, the Garopaba Lagoon bed conductance, recharge rate and evapotranspiration rate were initially assigned following standard values coupling lithology and climate characteristics, then latter all parameters were adjusted during the model calibration process.

- **Numerical model**

The numerical model consists of converting the conceptual model to the applied algorithm, for which was used the Groundwater Modeling System (GMS) software that operates with the finite-difference MODFLOW2000 code.

The 3D grid has a total of 195 lines (x-direction), 148 columns (y-direction) (Fig. 4a), and 10 numerical layers (z-direction) (Fig. 4b), resulting in a model with 288,600 cells refined in the wellfield area.

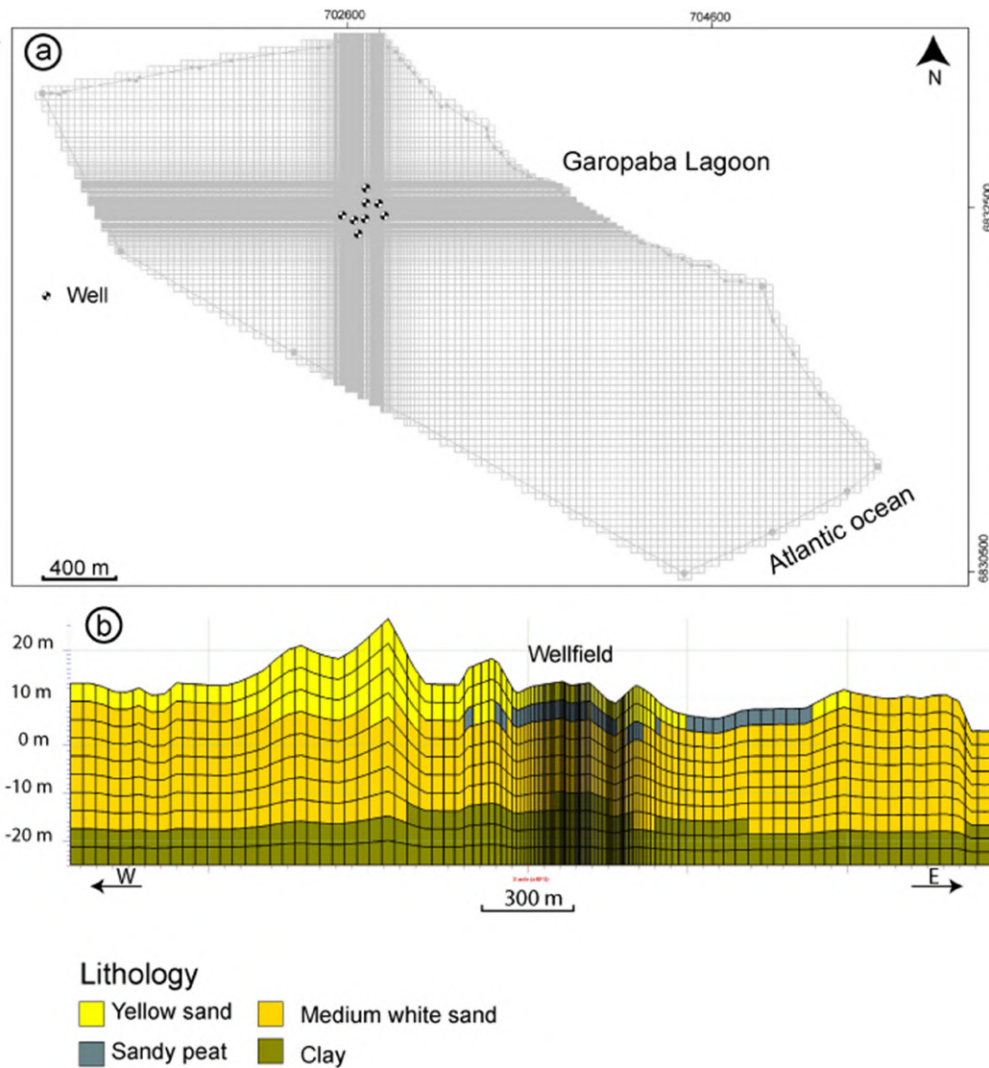


Fig. 4 Numerical model grid, refined in the wellfield area (a) plan view grid, (b) vertical grid with 10 numerical layers

Regarding the boundary conditions, the measured hydraulic heads at the northern, western and southern limits allowed to apply the specified head boundary condition (Type I). The Atlantic Ocean head data was obtained through the tide gauge of Imbituba. In the northeast, at the Garopaba Lagoon limit, it was applied the head-dependent flux boundary condition (Type III) using the GMS River package.

- [Model Calibration and Sensitivity Analysis](#)

The calibration process started manually by trial-and-error then optimized using the GMS Parameter Estimation - PEST (Doherty, 1994) interface. The model was considered calibrated when the flow budget error was less than

0.5%, and the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) for observed heads versus calculated heads less than 10%.

To quantify the effect of each parameter in the model calibration, the GMS software automatically generates a sensitivity analysis after running the PEST interface. In the present study, the recharge rate is the main sensitive parameter to the model.

- **Stochastic Modeling**

After running the PEST model, a stochastic approach was used to address uncertainties concerning the hydraulic conductivities, recharge rate, and evapotranspiration rate through the Latin Hypercube Sampling (LHS) method (McKay et al., 1979; Iman & Conover, 1980). The LHS divides the parameter probability distribution into equal probability intervals and randomly takes one sample from each segment allowing a greater degree of confidence with fewer model runs (Goovaerts, 2007). Values as mean, standard deviation, minimum, maximum, and the number of segments of the normal distribution were specified for each parameter.

Before running the final stochastic model, a set of runs was conducted using only one or two parameters for each simulation, stratified in three segments each, to define the set of values with the best model convergence, minimum NRMSE and minimum flow budget error. To process the ultimate stochastic solutions, it was inputted all parameters stratified in two segments each, resulting in 256 distinct realizations, of which 128 converged with the expected flow budget error and NRMSE. The mean, maximum, and minimum parameter values from the 128 calibrated solutions are presented in Table 2. In addition, Fig. 5 illustrates the Mean Absolute Error (MAE) and the NRMSE histograms of the stochastic solutions.

Table 2 Parameters values distributions from the 128 calibrated stochastic solutions.

Lithology	Parameter	Geom. mean	Arith. mean	Max	Min
Clay	KH (m/day)	0.009906	0.009906	0.009941	0.009875
	KV (m/day)	0.000997	0.000997	0.000998	0.000995
White medium sand	KH (m/day)	1.5077	1.5121	1.8968	1.206
	KV (m/day)	0.1008	0.1008	0.1095	0.0894
Sandy loam	KH (m/day)	1.0326	1.0522	1.3963	0.5063
	KV (m/day)	0.2934	0.2960	0.4601	0.1799
Yellow sand	KH (m/day)	0.7084	0.7482	1.3885	0.2022
	KV (m/day)	0.2593	0.263	0.4808	0.1443
-	Recharge rate (m/day)	0.00029	0.00030	0.00059	0.00017
-	EVPT (m/day)	0.0081	0.0081	0.0196	0.0051

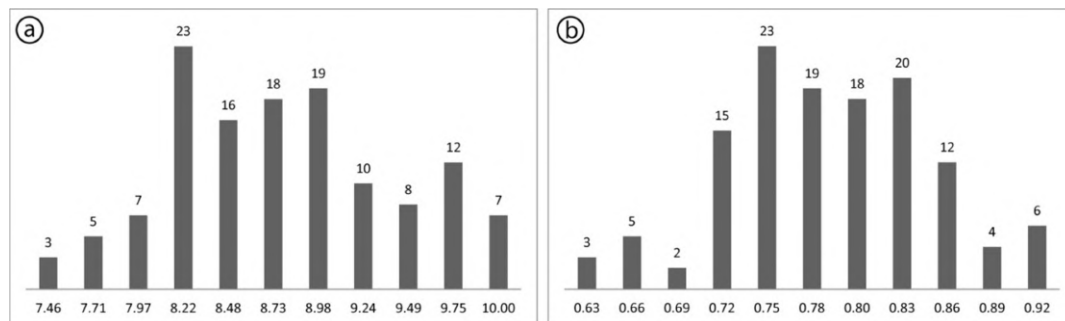


Fig. 5 Histograms of the (a) NRMSE (%) and (b) MAE, from the 128 calibrated solutions.

Wellhead Protection Areas

The present study compares five time of travel (TOT) approach methods that require mathematical solutions capable of simulating the groundwater flow, resulting in isochrones lines parallel to the equipotential lines that represent the time it takes to a water molecule reach a well with a specific pumping rate. The TOT approach requires aquifer hydrodynamic data availability obtained mainly through pumping tests (Sethi, 2019; Frind & Molson, 2018).

Wahnfried & Hirata (2005) consider the microbiological protection zone as critical for public health, defining a 50-day isochrone to protect the well from viruses, bacteria, and pathogenic parasites. On the other hand, it was applied different approaches aiming to protect against persistent contaminants, as the 10-year isochrones, the 20-year isochrones or even the entire capture zone (Landmeyer, 1994; Knzelbach et al., 1996; Foster et al., 2006; Chave et al., 2006; Staboultzidis et al., 2016). In this study are used the 50-day and the 10-

year zones in methods comparison, but also bring up an evaluation of the effectiveness of defining a 10-year or 20-year isochrones as the protection zone against persistent contaminants, through the comparison of their dimensions with the whole well capture zone.

To define the most cost-effective method, it was generated a reference WHPA using a stochastic MODFLOW-MODPATH (Pollock, 2017) numerical model. Latter, four different methods were tested: Calculated Fixed Radius (CFR), and three solutions present in the Analytic Element Model software WhAEM (USEPA, 2018), two analytical and one semi-analytical. One of the analytical solutions uses the uniform flow equation (Todd et al., 2004) to WHPA delineation, and the other, referred in the present study as Simple WhAEM, is described in details by Kraemer & Haitjema (2018) and summarized below. All methods were applied in a wellfield scenario, with eight wells pumping simultaneously with the maximum flow rate licensed by the state environmental protection agency (Table 3), and in a single well scenario, where only well W1 is pumping with the maximum licensed flow rate.

To generate the reference WHPA through the calibrated model, the pumping rates were adapted to the desired scenarios. First, the pumping rates were set to the maximum licensed for all the eight wells, and then the model has reprocessed (Table 3). All 128 stochastic solutions previously calibrated converged for this scenario. On the other hand, for the single well scenario, where all wells were disabled, except for W1 that kept its previous pumping rate (Table 3), instead of the 128 realizations previously calibrated only 37 converged. Aiming to evaluate if this number was sufficient to conduct a stochastic analysis of WHPA, it was analyzed the cumulative average residual of all realizations (Wottrich, 2012), which demonstrates a stabilization tendency (Fig. 6), confirming that 37 solutions were enough.

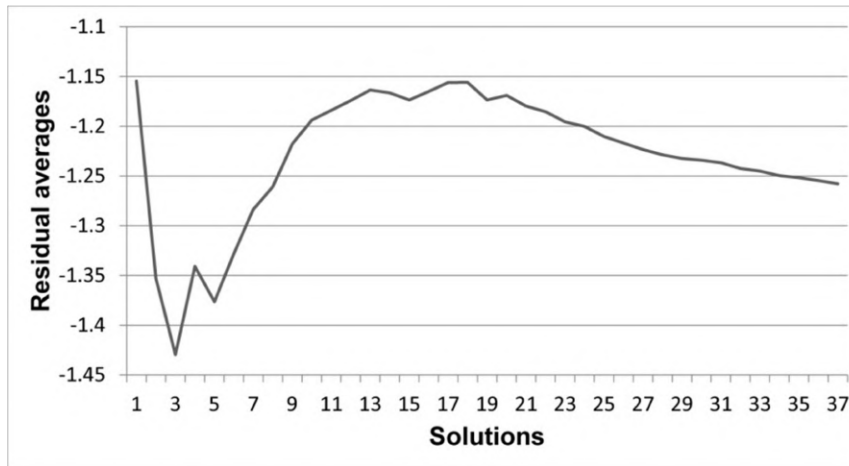


Fig. 6 Cumulative average residual from the 37 solutions of the single well scenario model.

The maximum pumping rates licensed by the state environmental agency and well screen length of each well are presented in Table 3. The input parameters for the different methods are presented in Table 4.

Table 3 Pumping wells data used to generate the WHPA.

Well	Flow rate (m ³ /day)	Well screen length (m)
W1	360	14
W 2	420	16
W 3	360	14
W 4	360	14
W 5	348	18
W 6	360	16
W 7	360	15
W 8	360	16

Table 4 Input data from the different WHPA delimitation methods used

Method	Saturated thickness (m)	Effective porosity (%)	Recharge rate (m/day)	Hydraulic conductivity (m/day)	Hydraulic gradient
WhAEM	27	22	0,0003	1,8	-
Simple WhAEM	27	22	-	1,8	0,002318
UFE	27	22	-	1,8	0,002318
CFR	14 - 18	22	0,0003	-	-

- [MODPATH Particle tracking](#)

This study used the MODFLOW post-processing particle tracking interface MODPATH (Pollock, 2017) to generate the reference WHPA. Particle tracking is carried out by inserting one or more particles in each model cell, then using the well as a starting point, tracks backward which particles reach the well under

pre-established pumping rate and travel time conditions. This operation is performed in all stochastic realizations, and, by the risk analysis tool, the GMS software calculates the probability of each cell to have a particle that can reach the wells (Aquaveo, 2016b), resulting in not just one WHPA, but in zones of confidence representing the percentage of stochastic models that covers a particular area as a protection zone.

In the wellfield scenario the risk analysis was conducted with 128 solutions, and in the single well scenario were applied 37 calibrated solutions. To compare the reference method with the others, it was necessary to delimit a single, non-zoned WHPA. Therefore, it was determined that the reference WHPA would be the area covered by at least 2% of all stochastic solutions used in the risk analysis.

To illustrate the importance of applying stochastic models, it was selected from the 128 calibrated solutions, the one with lower NRMSE, and delineated deterministic WHPA to compare the stochastic and the deterministic results.

- [Calculated Fixed Radius](#)

The CFR method assumes that the water pumped from the porous media is distributed as a cylinder, flowing equally from all directions around the well screen, and the infiltrated water is contributed by precipitation. The result is circular isochrones related to a specific TOT value, which is calculated using the following equation (Liu et al., 2019; EPA, 1994).

$$r = \sqrt{\frac{(Qt)}{\pi nH + N\pi t}} \quad (1)$$

where r is the WHPA radius; Q is the pumping rate; t is the time of travel; n is the effective porosity; H is the aquifer thickness; and N is the infiltration rate.

The screen length was used as the aquifer thickness in the CFR method (Table 4), as recommended by Kraemer & Haitjema (2018) for unconfined aquifer to avoid WHPA underestimation.

- [Uniform flow equation \(UFE\)](#)

Unlike the CFR method, the UFE does not generate a circular shape WHPA since it considers the local hydraulic gradient in its calculation, resulting in asymmetric WHPA. The up-gradient (r_x) and down-gradient (X_L) WHPA boundaries and the maximum width of the up-gradient zone (Y_L) are calculated

individually (Liu, Y., et al, 2019; Todd & Mays, 2004). To calculate the referred elements, the following equations are applied.

$$XL = -\frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (2)$$

$$YL = \pm \frac{Q}{2Kbi} \quad (3)$$

$$tx = \frac{n}{Ki} \left[rx - \left(\frac{Q}{2\pi Kbi} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2\pi Kbi}{Q} \right) rx \right\} \right] \quad (4)$$

where tx is the time of travel; K is the hydraulic conductivity; b is the saturated zone thickness; i is the hydraulic gradient; n is the aquifer effective porosity; and Q is the pumping rate.

The WhAEM software has the option to calculate WHPA by the UFE method, requiring inputting groundwater flow direction, hydraulic gradient, transmissivity, pumping rate, and time of travel.

- [WhAEM analytical and semi-analytical methods](#)

The WhAEM software (USEPA, 2018) was developed by the US Environmental Protection Agency -EPA, enabling to delineate WHPA by the CFR and the UFE methods, in addition the software has its own analytical and semi-analytical solutions to create WHPA for steady pumping wells. The first, called in the present study as Simple WhAEM, enables generating WHPA for single or multiple wells, requiring the following data: transmissivity, effective porosity, aquifer thickness, local flow direction, and desired TOT value. The steps and equations related to the Simple WhAEM method are described by Kraemer & Haitjema (2018). The semi-analytical solution, referred in this study as WhAEM, uses the Dupuit-Forchheimer approximation, which assumes a practically horizontal flow in phreatic aquifers and a hydrostatic pressure distribution (Bear & Cheng, 2010). The required data to apply the semi-analytical solution are: hydraulic head distribution within the model domain, aquifer thickness, aquifer base elevation, hydraulic conductivity, effective porosity, recharge rate, wells discharge rate, and wells screen elevation. After running the semi-analytical model, it is necessary to calibrate the model until it obtains a small residual error between observed and calculated heads and then process the desired TOT WHPA values.

- **Comparative index**

To define the WHPA delineation method that better fit with de MODFLOW-MODPATH reference method, was used the Comparative Index (Ci) defined by Paradis et al. (2007) based on the following equation.

$$Ci = \frac{CA}{CA + NPA + OPA} * 100 \quad (5)$$

where CA is the common area between the reference method and the tested method; NPA is the non-protected area by the tested method; and OPA is the overprotected area by the tested method (Fig. 7). The Ci index is given in percent (Paradis et al., 2007).

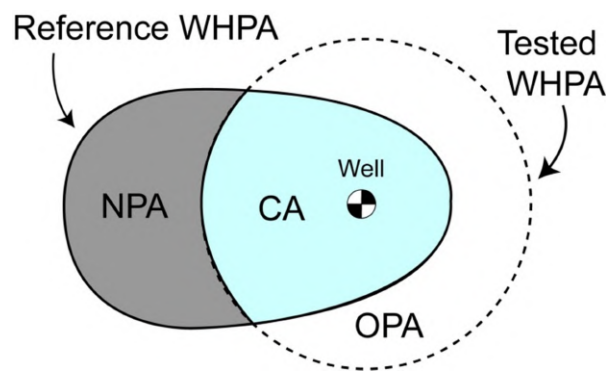


Fig. 7 Elements to calculate the WHPA comparative index Ci (Paradis et al., 2007).
NPA = Non protected area; CA = Common area; OPA = Over protected area.

The application of the Ci index is a reliable way to compare WHPA dimensions since it considers the shape and dimensions of each method and not only the total surface area covered by them. For instance, Paradis et al. (2007) presented a WHPA generated by the CFR method with a similar area, in km², to the reference numerical model method. But since the CFR method does not consider the hydraulic gradient in its solution, the WHPA obtained by this method overestimated downstream and underestimated upstream, resulting in a low Ci index.

In the wellfield scenario, even though the 50-day TOT WHPA was compared individually per well its results are presented as a mean Ci (Table 6). For the 10-year TOT only one area represents all wells, due to the overlapped WHPA. The WHPA generated by the different methods were uploaded in ArcGIS 10.3 software to calculate the parameters of equation 5.

- **Capture Zone x 10-year TOT x 20-year TOT**

Landmeyer (1994), Foster et al (2006) and Staboultzidis et al (2016) suggest that the outermost protection zone of a well can be delimited using isochrones of 10 or 20-year TOT. Moreover, the Denmark government attributes the 10 to 20-year TOT isochrones as the largest protection zone (Chave et al, 2006). Since persistent contaminants can travel for more than 20 years in groundwater, the present study compared the wellfield capture zone (CZ) area with the 10 and 20-year TOT WHPA, to determine whether or not it is proper to adopt a 10 or 20-year isochrones as the outermost protection zone in similar hydrogeological settings. The zones limits were delineated in areas covered by at least 2% of the 128 stochastic solutions.

- **Recharge rate reduction**

Understand the well capture zone dimensions allow to implement long term plans, but what if the dimensions once measured are disturbed by external factors, as climate change or changes in land use? Having a calibrated numerical model of an area allows carrying simulations of different environmental scenarios, which is a critical approach to natural resources management. Considering the high sensibility of the MODFLOW model to the recharge rate parameter, confirmed by the sensitivity analysis, the present study presents the effect on the well capture zone dimensions when submitted to a recharge rate reduction.

To test the recharge reduction effects, first all recharge rate input values as mean, maximum and minimum were reduced by 50% and the single well stochastic model was reprocessed, converging on 37 realizations. Using the MODFLOW-MODPATH interface, it was generated the well W1 capture zone and its 50-day TOT WHPA, allowing comparison between their dimensions and the previously calculated capture zone and 50-day TOT WHPA for the single well scenario. The compared areas were defined using the 37 stochastic solutions, delimited by a probability equal or greater than 2% of a water particle that infiltrates the ground to be captured by the well W1.

Table 5 compares the recharge rate data from the 37 converged stochastic solutions processed with actual climate data, with the recharge rate data from the 37 solutions of the simulated recharge rate reduction scenario.

Table 5 Recharge rate data used in the actual stochastic model and in the simulated stochastic model

	Stochastic model data with actual recharge rate (m/day)	Stochastic model data with simulated recharge rate (m/day)	Reduction in simulated recharge rate (%)
Geometric mean	0,00029	0,0001908	34%
Arithmetic mean	0,0003	0,0001949	35%
Minimum	0,00017	0,0001208	29%
Maximum	0,00059	0,0002784	53%

Results and discussion

Groundwater flow behavior

Groundwater flow is controlled by higher elevations situated northwest from the wells, being considered the main wellfield recharge area even though recharge occurs throughout the domain. Groundwater flows through the wellfield area with a hydraulic gradient of approximately 0,002 toward the Garopaba Lagoon and the Atlantic Ocean, but pumping wells significantly interfere the flow (Fig. 8a).

When all wells operate simultaneously, wells W1, W2, W3, W4, W5, and W6, at the northwest, act as a hydraulic barrier for the wells W7 and W8, forcing the latter two to capture water particles with shorter residence time that infiltrates in the vicinity of the wells in lower topographic levels (Fig. 8b), resulting in a larger cone of depression and consequently larger WHPA in these wells.

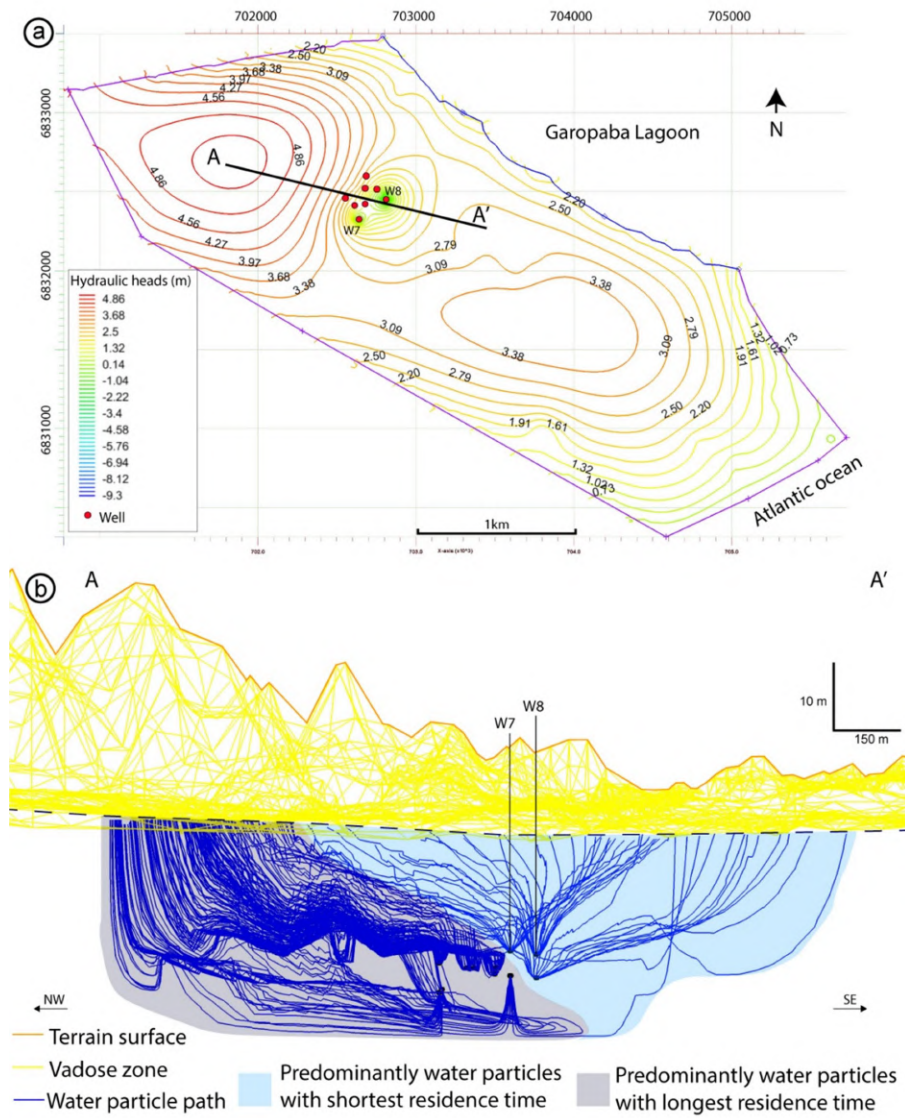


Fig. 8 Illustration of groundwater behavior in one calibrated model. All 128 solutions presented similar flow characteristics. (a) Model domain potentiometric map with all wells pumping simultaneously. Wells W7 and W8 presented a more substantial influence in the potentiometric lines distortion. (b) Water particles behavior in the cross-section A - A'.

WHPA delineation methods comparison

In a 50-day TOT with multiple wells pumping simultaneously scenario, the method with higher mean C_i index was the Simple WhAEM method, resulting in a C_i of 30%, followed by WhAEM method, with mean C_i index of 28%. The lower result was obtained by the CFR method, with 20% (Table 6). However, using mean C_i values is a simplified way of comparison since, in practical terms, the WHPA delineated to wells W7 and W8 by the Simple WhAEM

method were underestimated, representing a risk of not protecting areas sensitive to contamination. Curiously, the only method that did not underestimate the protection area of these wells was de CFR, but for the rest of the wells, the CFR method overestimated more than the other methods (Fig. 9a).

Table 6 Mean of the 8 wells comparative index Ci for the 50-day TOT WHPA in a wellfield scenario.

Method	Mean Ci (%)
WhAEM	28,15
Simple WhAEM	30,22
UFE	21,25
CFR	20,06

In the same wellfield scenario, but for a 10-year TOT WHPA delineation, all methods overestimated the WHPA compared to the MODFLOW-MODPATH reference method (Fig. 9b). The higher Ci index was reached by the CRF method, with 51%, followed by the WhAEM method, with 25%. The lowest result was obtained by the UFE method, with 20% (Table 7).

Table 7 Comparative index Ci for the 10-year TOT WHPA in a wellfield scenario. CA = common area; NPA = non-protected area; OPA = overprotected area.

Method	Total area (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
WhAEM	1177000	291800	0	885200	24.79
Simple WhAEM	1600000	291800	0	1308200	18.24
UFE	1477000	291800	0	1185200	19.76
CFR	572400	291800	0	280600	50.98

The Ci values indicate a limited capacity of these methods to delineate WHPA efficiently in a wellfield scenario in the local hydrogeological settings. However, when analyzing the single well scenario, especially for 50-day TOT WHPA, the results better fit with the reference method (Fig. 10a). For the microbiological protection zone, i.e. the 50-day TOT WHPA, the lower Ci index obtained was 85%, by the WhAEM method, and the higher 90%, by UFE (Table 8). Considering the small difference between Ci values and slight distortions that may occur while drawing WHPA in the WhAEM software or when exporting the GMS results to shapefile, it is considered that all methods had the same degree of reliability. Notwithstanding, when increasing the TOT to 10 years, the Ci index results lowered due to WHPA overestimation (Fig. 10b). The highest value obtained for this TOT in the single well scenario was 46%, using the

WhAEM method, followed by the CFR method with 41%. The lower result was reached by the Simple WhAEM method, with a Ci index of 31% (Table 9).

Table 8 Comparative index Ci for the 50-day TOT WHPA in a single well scenario. CA = common area; NPA = non-protected area; OPA = overprotected area.

Method	Total area (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
WhAEM	4564,58	4500,77	731,52	63,81	84,98
Simple WhAEM	5678,55	5128,95	60,95	549,6	89,36
EFU	5099,94	4885,62	348,59	214,32	89,67
RFC	5802,30	5186,31	459,373	615,99	88,68

Table 9 Comparative index (Ci) for the 10-year TOT WHPA in a single well scenario. CA = common area; NPA = non-protected area; OPA = overprotected area.

Method	Total area (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
WhAEM	281474,92	128900	0	152574,9	45,79
Simple WhAEM	418685,68	128900	0	289785,7	30,79
EFU	313523,94	128900	0	184623,9	41,11
RFC	314800	128900	0	185900	40,95

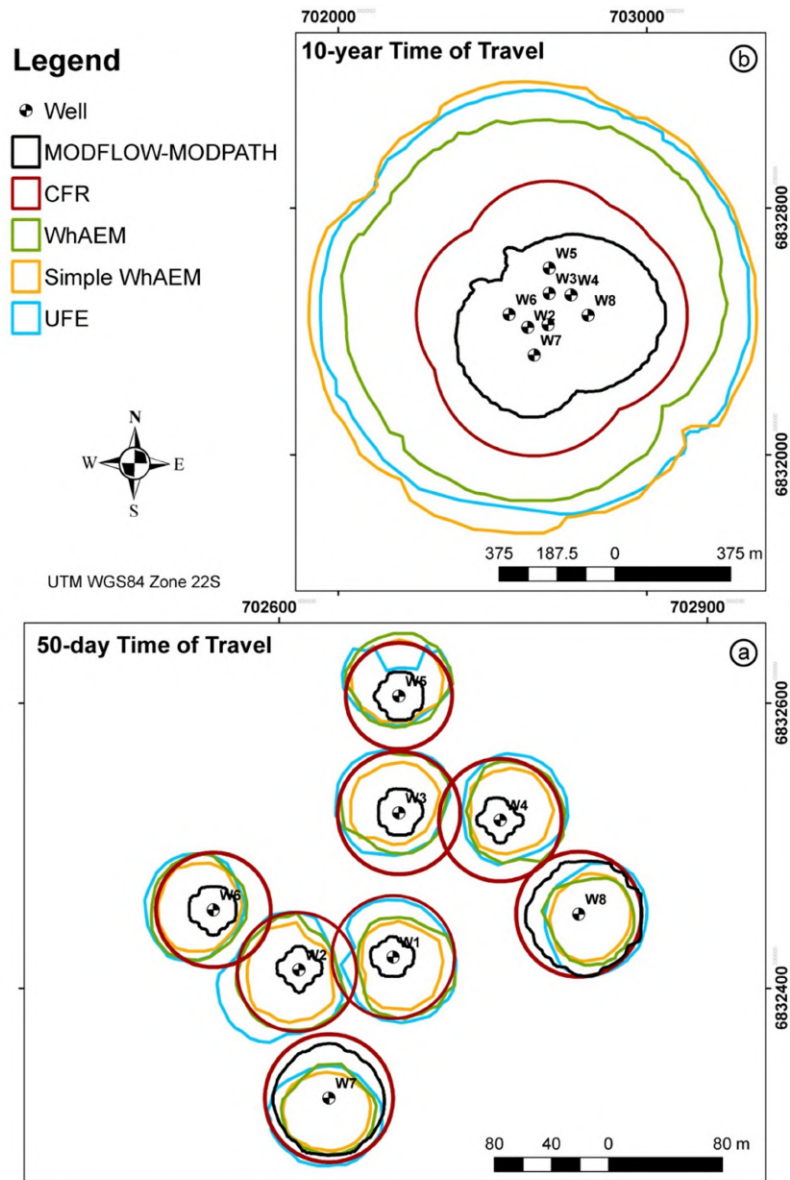


Fig. 9 Map illustrating a (a)50-day TOT and (b) 10-year TOT WHPA, delineated by different methods in a wellfield scenario.

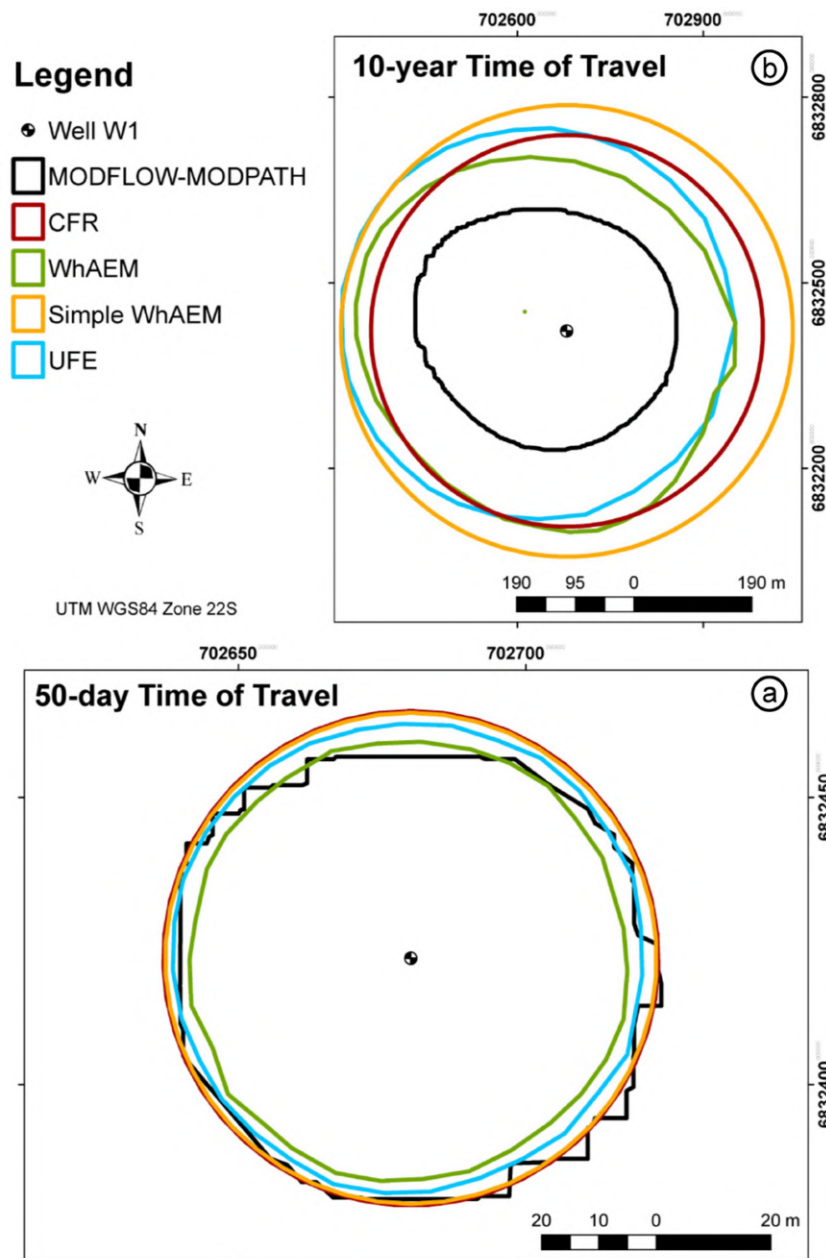


Fig. 10 Map illustrating a (a) 50-day TOT and (b) 10-year TOT WHPA, delineated by different methods in a singlewell scenario.

Multiple wells operating simultaneously enhance groundwater flow complexities. In addition, increases of TOT amplify the well influence area and, consequently, the hydraulic parameters spatial variations. These situations cannot be well represented by analytical and semi-analytical methods, resulting in WHPA precision loss (Paradis et al., 2007; Carvalho & Hirata, 2012; Dong et al., 2013; Lyu et al., 2019).

The overestimation propensity of the tested methods is described by Carvalho & Hirata (2012), which tested the CFR and UFE methods for capture zone delineation in several public supply wells, and by Lyu et al. (2019), who tested the CFR, UFE and WhAEM methods for different TOT, from 100-day up to 15-year TOT in single well and wellfield scenarios. Conversely, Fillecia (2015) found WHPA underestimation through CFR and WhAEM methods for 90-day TOT in a wellfield scenario. The same underestimation pattern was described for the WhAEM method in single well scenarios, for 2, 5, and 10-year TOT (Goodarzi & Eslamian, 2019), and for 60-day and 20-year TOT (Paradis et al., 2007). Dong et al. (2013) found underestimation with the CFR method for 100 and 1000-day TOT in a wellfield scenario. These different outcomes are clear evidences of a non-linearity of what to expect from each method, depending directly on the local hydrogeological characteristics.

It is believed that the WhAEM software 2D wellfield solutions did not generate better results due to wells proximity, which caused intense 3D flow interferences, as illustrated in Fig. 8b.

Capture Zone x 10-year x 20-year TOT

Results revealed that the well capture zone, i.e. the well recharge area, has an area 2.2 times larger than de 20-year TOT WHPA and 2.7 times larger than the 10-year TOT WHPA (Table 10 and Fig. 11). Therefore, considering that the public supply company has the right to supply the Jaguaruna community until 2056, it is right to manage the whole wells capture zone avoiding the installation of anthropic activities that represent any risk of contaminating the aquifer with persistent contaminants.

Table 10 Covered area (m²) by the 10-year TOT WHPA, the 20-year TOT WHPA, and the capture zone, in the wellfield in Jaguaruna County.

Zone	Total area (m ²)
10-year TOT WHPA	291800
20-year TOT WHPA	355100
Wells capture zone	788400

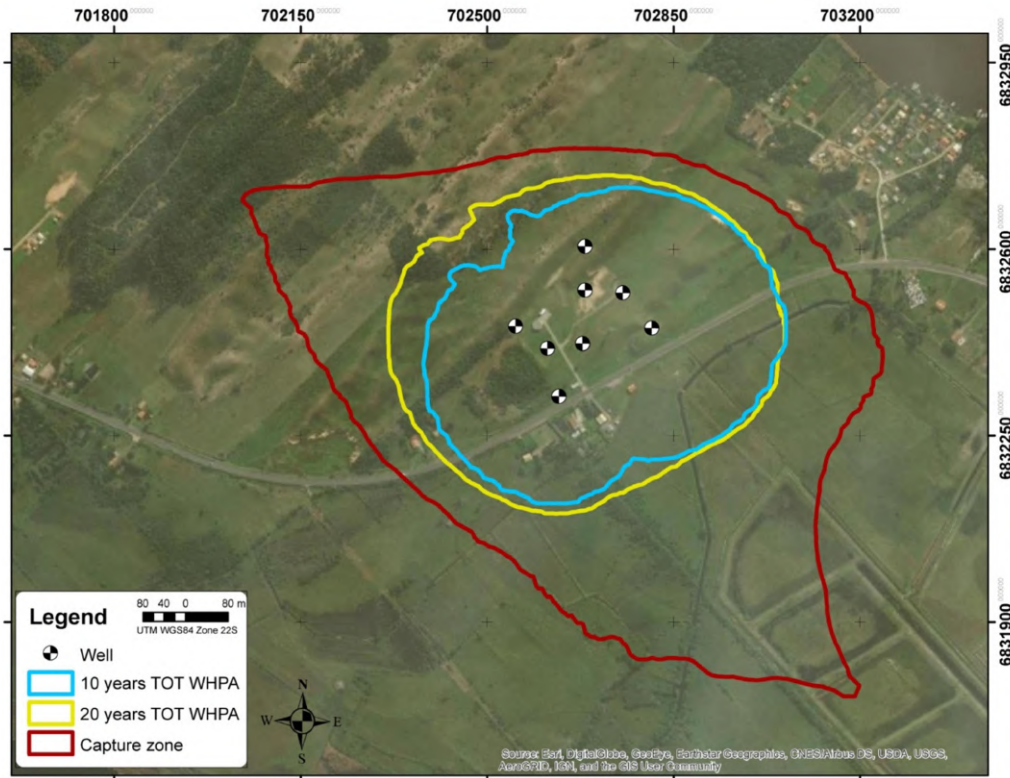


Fig. 11 Map illustrating the dimensions differences between the wellfield capture zone, the 20-year TOT WHPA, and the 10-year TOT WHPA.

Recharge rate reduction

The reduction of 34% in average of the recharge rate resulted in an increase of 68% of the well capture zone surface area, but when comparing the 50-day TOT WHPA area, the increase was only of 2% (Table 11 and Fig. 12). This is because for a 50-day TOT the bulk of water comes from a cylinder around the wellscreen, and recharge rate changes has minor effects when compared to the capture zone.

Table 11 Covered area variation by the capture zone and the 50-day TOT WHPA when affected by a reduction in the recharge rate.

	Present	Simulated scenario	Variation
Capture zone (m²)	641200	1080000	+ 68.4%
50-day TOT WHPA (m²)	5232.29	5347.82	+ 2.2%

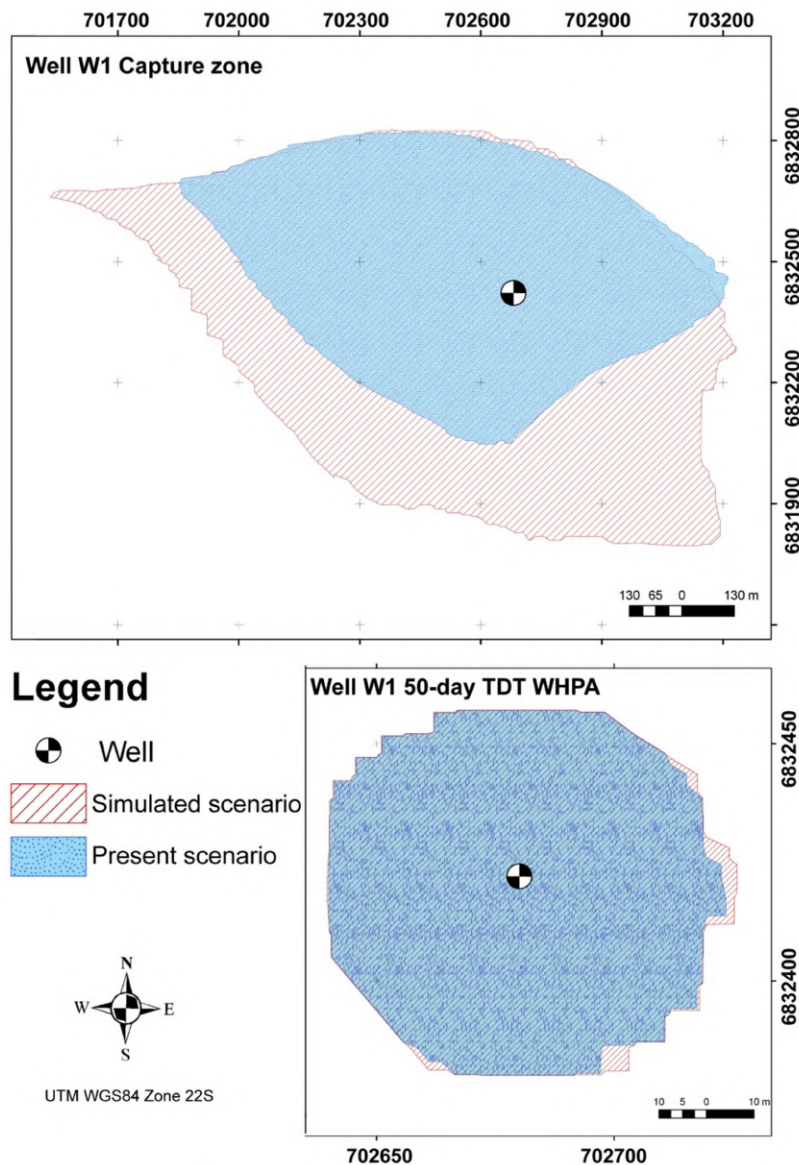


Fig. 12 Map illustrating the dimensions variations of a single well capture zone and a 50-day TOT WHPA when affected by a reduction in the recharge rate.

Stochastic x deterministic modeling

Even though numerical models incorporate hydrogeological heterogeneities and are considered the reliablest way to conduct simulations, when deterministic models are applied, uncertainties are usually not taken into account. Thus, to evaluate the importance of using stochastic models to quantify those uncertainties, it was generated deterministic WHPA for all scenarios presented in this study. The comparison was conducted using the same procedure applied above, using the C_i index and the stochastic model as a reference.

The deterministic model underestimated WHPA when compared to stochastic results. This was expected since stochastic models contemplate multiple solutions in its WHPA (Fig. 13). It is important to highlight that in the single well 50-day TOT WHPA scenario, the Ci index was lower than all analytical and semi-analytical methods prior applied in this study, presenting a Ci index value of 73%. Withal, for the rest of the scenarios, all Ci index was higher than all tested simplest WHPA delineation methods (Table 12). But the underestimation pattern highlights the importance of applying stochastic models, especially when involves the preservation of water quality for human consumption.

Table 12 Differences of the results obtained by a stochastic model and a deterministic model in all scenarios presented in this study, using the comparative index Ci (Paradis et al., 2007). CA = common area; NPA = non-protected area; OPA = overprotected area.

Scenario	Wells	Deterministic total area (m ²)	Stochastic (>=2%) total area (m ²)	CA (m ²)	NPA (m ²)	OPA (m ²)	Ci (%)
50-day TOT Wellfield	W1	385	611.3	385	226.3	0	63
	W2	378.6	636.5	378.6	257.8	0	59.5
	W3	452.5	773.9	452.5	321.4	0	58.5
	W4	386.5	619.8	386.5	233.3	0	62.4
	W5	737	854.3	737	117.3	0	86.3
	W6	741.6	829.3	741.6	87.7	0	89.4
	W7	2856	4643.4	2856	1787.5	0	61.5
	W8	3682.3	4923.5	3682.3	1241.2	0	74.8
10-year TOT Wellfield	All	196414.5	291800	196414.5	95385.5	0	67.3
50-day TOT Single well	W1	3300.2	5232.3	5232.3	1932.1	0	73
10-year TOT Single well	W1	115521.4	128900	115521.4	13378.6	0	89.6
Well capture zone	W1	611200.5	641200	611200.5	29999.48	0	95.3

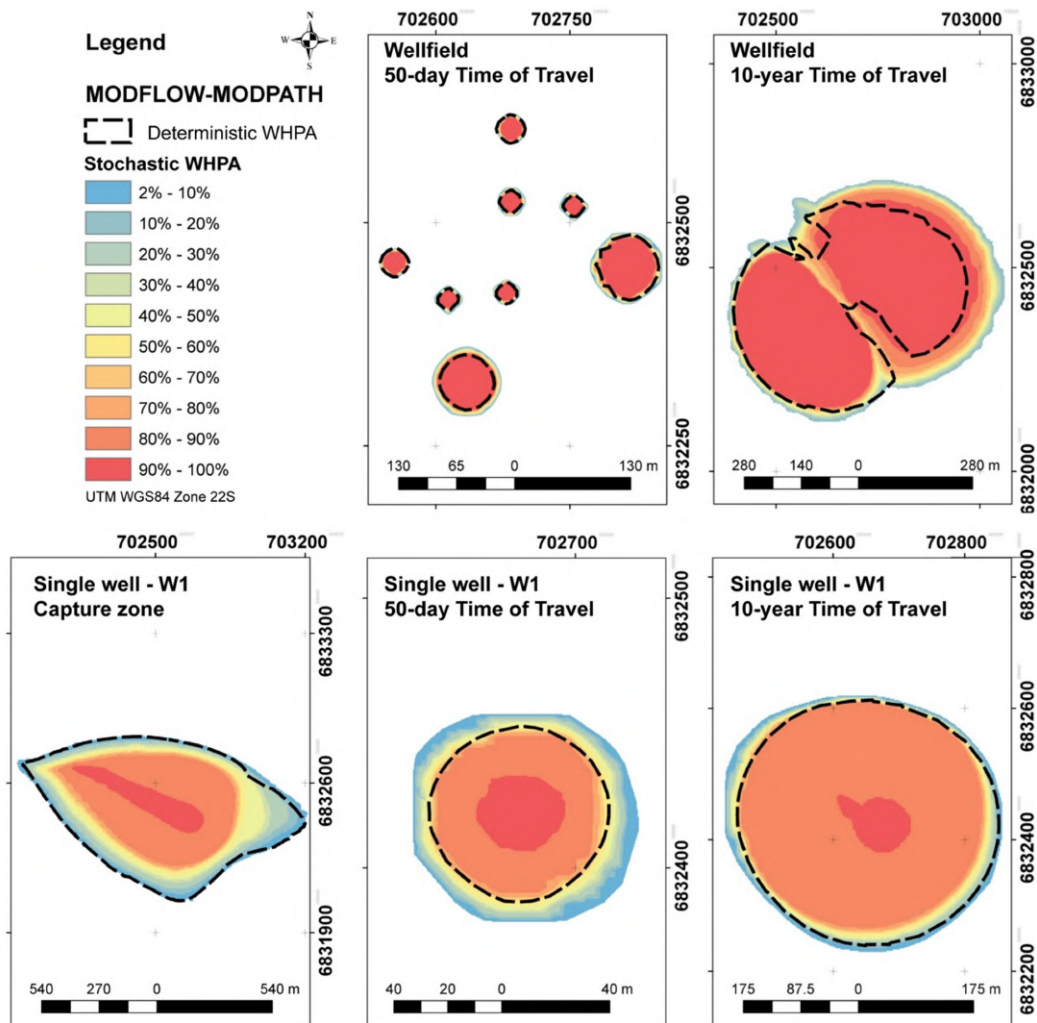


Fig. 13 Differences in WHPA dimensions obtained through stochastic and deterministic models.

Conclusions

All tested methods presented prime results to WHPA delineation against microbiological contamination, i.e., the 50-day TOT isochrones, in a single well scenario. The outcomes indicated the CFR method as the most cost-effective method since it requires less hydrodynamic parameters data and can be conducted through hand calculations.

However, in the wellfield scenario analytical methods presented low comparative indexes when compared to the single well 50-day TOT scenario. The MODFLOW-MODPATH model revealed profound three dimensions flow complexities due to wells interferences. In the 10-year isochrones delineation on both single well or wellfield scenarios it is necessary to evaluate the land use

socioeconomic interests due to analytical methods overestimation tendency. But considering the groundwater quality maintenance as the only objective, the CFR method stills the best alternative as none of the scenarios underestimated the WHPA dimensions, and its application simplicity allows easy implementation.

Regarding the use of 10-year TOT or 20-year TOT WHPA to protect groundwater against persistent contaminants, it is not recommended since the wells capture zones were substantially larger than these tested TOT.

During capture zone delineation it is important to evaluate if a recharge reduction is expected. For example, if the projected urban plan could affect the aquifer recharge, or analyzing drought periods in time series data to understand how capture zone could vary in these periods, or even what are the climate change projections for the studied area.

Stochastic models are essential to understand the effects of model uncertainties, especially when the model objective is to ensure drinking public water supply quality and quantity. The present study illustrates that WHPA delineated by deterministic models will always underestimate its dimensions compared to a stochastic model.

It is worth highlighting that the conclusions above were obtained in a singular hydrogeological setting. To understand the results sensibilities to different contexts, more studies are necessary.

References

- Aquaveo, (2014). Software GMS 10.0 Groundwater Modeling System. <https://www.aquaveo.com/announcements>.
- AQUAVEO, (2016b). GMS 10.1 Tutorial: MODFLOW – Stochastic Modeling, Indicator Simulations. 9 p.
- Bear, J., Cheng, A.F.D. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport: Theory and Applications of Transport in Porous Media. Vol. 23. Publisher: Springer Netherlands.
- Carvalho, A.M.; Hirata, R. (2012). Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. Revista do Instituto de Geociências – USP. São Paulo, v. 12, n.1., p. 53-70, Abril, 2012.
- Chave, P., Howard, G., Schijven, J., Appleyard, S, Fladerer, F., Schimon, W., (2006). Groundwater protection zones. In: World Health Organization. Protecting Groundwater for

- Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources. Edited by O. Schmoll, G. Howard, J. Chilton and I. Chorus. P. 465 – 515. ISBN: 1843390795.
- Corona, C.R.; Gurdak, J.J.; Dickinson, J.E.; Ferré, T.P.A.; Maurer, E.P., (2017). Climate variability and vadose zone controls on damping of transient recharge. *Journal of Hydrology*. Article in press. 11p.
- Doherty, P., 1994. PEST. Corinda, Australia: Watermark Computing.
- Dong, Y., Xu, H., Li, G. (2013), Wellhead protection área delineation using multiple methods: A case study in Beijing. *Environmental Earth Sciences*, Springer, p. 481-488.
- ESRI, 2011. ArcGIS Desktop Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Falkenmark, M. (2005) Water usability degradation – economist wisdom or societal madness? *Water International*, 30(2), 136-146.
- <https://doi.org/10.1080/02508060508691854>
- Fileccia, A., (2015). Some simple procedures for the calculation of the influence radius and well head protection areas (theoretical approach and a filed case for a water table aquifer in an alluvial plain). *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater* (2015) – AS14065:007 – 23.
- Frind, E.O., Molson, J.W., (2018). Issues and Options in the Delineation of Well Capture Zones under Uncertainty. *Groundwater*, National Ground Water Association. February, 2018. 12 p.
- Foster, S. S. D. e Hirata, R. C. A. (1988) Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81pp,.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; Délia, M.; Paris, M., (2006). *Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. Washington: Banco Mundial, 2006. 104 p.
- Harbaugh, A.H.; Banta, E.R.; Hill, M.C.; McDonald, M.G., (2000). MODFLOW-2000, U.S. Geological Survey.
- Hirata, R. and Suhogusoff, A.V. (2019) How much do we know about the groundwater quality and its impact on Brazilian society today? *Acta Limnologica Brasiliensia*. vol. 31, e109.
- Hiscock, K. M., Rivett M. O., & Davison, R. M.(2002). Sustainable Groundwater Development. Geological Society, London, Special Publications, 193, 1-14. DOI: 10.1144/GSL.SP.2002.193.01.01
- <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.01>
- Goodarzi, M., Eslamian, S.S., (2019). Evaluation of WhAEM and MODFLOW models to determine the protection zone of drinking wells. *Environmental Earth Sciences*, 78:195. 8 p.
- Goovaerts, P., (2007). Geostatistical Modeling of the Spaces of Local, Spatial, and Response Uncertainty for Continuous Petrophysical Properties. Chapter 6 in: COBURN, T.C.; YARUS, J.M., CHAMBERS, R.L., 2007. *Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies*, Volume II.
- Iman, R. L., Conover, W., (1980). Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment. *Commun. Stat. Theory Methods* 9(17), 1749–1842.

- Kinzelbach, W.; Vassolo, S.; Li, G., (1996). Determination of capture zones of wells by Monte Carlo simulation. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling (Proceedings of the ModelCARE 96 Conference, Golden, Colorado. IAHS Publ. no 237, 1996.
- Kraemer, S.R.; Haitjema, H.M., (2018). Working with WhAEM: Demonstration of Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer for Wellhead Protection. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. June, 2018.
- Landmeyer, J.E., (1994). Description and Application of Capture Zone Delineation for a Wellfield at Hilton Head Island, South Carolina. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 94-4012. Columbia, South Carolina.
- Liu, Y., Weisbrod, N., Yakirevich, A., (2019), Comparative Study of Methods for Delineating the wellhead Protection Area in an Unconfined Coastal Aquifer. *Water*, MDPI. 17 p.
- Martin, L.; Suquio, K.; Flexor, J.M.; DE Azevedo, A.E.G.; (1988). MAPA GEOLÓGICO DO QUATERNÁRIO COSTEIRO DOS ESTADOS DO PARANÁ E SANTA CATARINA. Ministério de Minas e energia, Série Geológica, n° 28. Seção Geologia Básica, n°18. Brasil. 1988.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 42(1), 55–61.
- Paradis, D.; Martel, R., Karanta, G; Lefebvre, R; Michaud, Y.; Therrien, R.; Nastev, M., (2007). Comparative Study of Methods for WHPA Delineation. *Ground Water*, vol. 45, No. 2, March-April 2007, p. 158 – 167.
- Pollock, D.W., (2017). MODPATH v7.2.01: A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Software Release, 15 December 2017, <http://dx.doi.org/10.5066/F70P0X5X>.
- Sethi, R., Di Molfetta, A., (2019). Groundwater Engineering, Springer Tracts in Civil Engineering. Chapter 8: Well Head Protection Areas. P. 161 – 168.
- Staboultzidis, A., Dokou, Z., Karatzas, G.P. (2016). Delineation of wellhead protection area in Crete, Greece using an analytic element model. International Conference of Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016. *Procedia Engineering* 162, 324 – 331.
- Todd, D.K. (1980). *Groundwater Hydrology*, 2nd ed. New York: John Wiley
- Todd, D.K.; Mays, L.W. (2004) 4.3 WELL IN A UNIFORM FLOW, In *Groundwater Hydrology*, 3rd ed.; Bill, Z., Ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA. p. 656.
- Tomazelli, L.J.; Villwock, J.A., (2000). O Cenozóico Costeiro do Rio Grande do Sul: in: HOLZ, M.; DE ROS, L.F., *Geologia do Rio Grande do Sul*. P. 375-406.
- UN - United Nations, (2019). The future is now: Science for achieving sustainable development. Global Sustainable Development Report. Department of Economic and Social Affairs.
- UN - United Nations, (2002). Report of the world Summit on Sustainable Development, Johannesburg, South Africa, 26 August – 4 September 2002, New York, 173 p.
- USEPA, (1994). Handbook: Ground Water and Wellhead Protection. Office of Ground Water and Drinking Water. 288 p.

USEPA, (2018). Wellhead Analytic Element Model (WhAEM). Environmental Modeling Community of Practice. United States Environmental Protection Agency. www.epa.gov/ceam/wellhead-analytic-element-model-whaem

Wahnfried, I.; Hirata, R., (2005). Perímetro de Proteção de Poços: uma importante ferramenta para a sustentabilidade de mananciais públicos. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços – II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 12 p.

Wottrich, I., 2012. Uso de ferramentas computacionais na construção de modelos estocásticos de fluxo e delimitação de perímetros de proteção de poços. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. 134 p.

Villwock, J.A. (1984). Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A synthesis. Instituto de Geociências. Portal de Periódicos UFRGS. Online version: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21711>.

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
Análise de métodos para delimitação de Perímetros de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero costeiro em Jaguaruna/SC
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: LUCAS MEDEIROS BOFILL
Orientador: Prof. Dr. Arí Roisenberg
Examinador: Profa. Dra. Malva Andrea Mancuso
Data: 29/06/2021
Conceito: A (EXCELENTE)
<p>PARECER:</p> <p>O trabalho tem por objetivo geral a seleção do método mais adequado para a delimitação de perímetros de proteção de poços na zona costeira de Jaguaruna. O texto apresenta, de forma detalhada, a metodologia proposta e a sua aplicação. A descrição exaustiva dos resultados obtidos e as diferentes análises e interpretações realizadas (considerando os cenários atuais e futuros) permitem acompanhar pari passu a aplicação do desenvolvimento metodológico descrito. A seguir, indico algumas sugestões que visam contribuir com o esclarecimento de dúvidas que surgiram durante a leitura da dissertação.</p> <p>Informações contidas no perfil geológico, cotas dos níveis de água de corpos hídricos superficiais, assim como dados potenciométricos dos poços de bombeamento e potenciométrica observada em poço ponteira localizado no centro da área de estudo (dados públicos da base SIAGAS), indicam a possibilidade de existir um aquífero na camada de areia amarela, que aparece por vezes como areia branca e que está em contato com a superfície do terreno, por cima da turfa. Considerando o perfil geológico e os dados hidrogeológicos, é possível que na zona de turfa e zonas com lentes areno-argilosas ocorra o acúmulo de água num aquífero livre?</p> <p>Na descrição da geologia local é citada a “turfa argilosa de coloração preta” (pg. 54), entretanto, em figuras e no restante do texto é citada a turfa como sendo arenosa. Avaliar se essa camada é interface entre um sistema arenoso superficial e outro arenoso mais profundo (o qual é explorado como aquífero). Os dados potenciométricos (cotas negativas dos NE datadas da construção dos poços), localização da camada de turfa, comprimento e localização dos filtros e geomorfologia apontam para a presença de um aquífero inferior à essa camada de turfa, na zona de areias brancas médias.</p> <p>Sugere-se, também, inserir uma tabela com NE e ND inicial dos poços (da data de perfuração), assim como esclarecer se as cargas hidráulicas dos poços (Tabela 1) foram obtidas durante bombeamento (ND) ou com os poços parados (NE) e quais estavam bombeando durante a medição, visto que há diferenças significativas entre as cargas hidráulicas medidas e as obtidas durante a construção dos poços. Mesmo assim, as cargas hidráulicas obtidas são inferiores às cotas da base da turfa, conforme descrito no perfil geológico dos poços (dados públicos da base do SIAGAS).</p> <p>Observar que o Poço 08 tem parte do filtro instalado nas argilas e apenas 8 m do filtro está no aquífero de areias brancas, indicando menor espessura do aquífero no local.</p> <p>Sugere-se incluir uma Tabela de resultados com os valores, por poço, considerados para calibração (e data de medição), os valores calibrados</p>

(resultantes do modelo), assim como os cálculos individuais de erro. Para atender à simulação da bateria de poços bombeando (previsão de rebaixamentos e zonas de captura por tempo) o modelo precisa estar calibrado em condição dinâmica (ND). Indicar quais foram os poços e as cargas em nível dinâmico utilizadas para calibrar o modelo.

Quanto às condições de contorno, é importante indicar o valor de carga hidráulica medido em cada um dos pontos apresentados na Figura 11 como "Pontos de carga hidráulica medida". Sugere-se incluir uma tabela onde conste as coordenadas desses pontos, as cotas topográficas, o NE e a carga hidráulica de cada poço.

As vazões dos Poços 06 e 07 indicadas na Tabela 3 são aproximadamente 30% inferiores às indicadas no cadastro dos mesmos poços na base de dados do SIAGAS. Também, não foi possível perceber qual poço tem vazão de 48,5 m³/h, conforme citado na página 60.

As conclusões resultantes do estudo estão em concordância com os objetivos propostos. Entretanto, apesar do trabalho ter como foco principal o estudo do comportamento hidrodinâmico do aquífero, é importante destacar que algumas soluções conservadoras (como na previsão de 10 anos de bombeamento) as zonas de captura dos poços, se aproximam da lagoa de Garopaba o que pode influenciar na qualidade das águas subterrâneas captadas pelos poços de abastecimento.




Assinatura:

Data: 29/06/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
Análise de métodos para delimitação de Perímetros de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero costeiro em Jaguaruna/SC	
Área de Concentração: Geoquímica	
Autor: LUCAS MEDEIROS BOFILL	
Orientador: Prof. Dr. Arí Roisenberg	
Examinador: Prof. Dr. Leonidas Luiz Volcato Descovi Filho	
Data: 16/06/2021	
Conceito: A (Excelente)	
PARECER:	
<p>O trabalho apresenta-se cientificamente dentro das normativas, além de possuir resultados e conclusões (artigo) que representam um avanço no conhecimento sobre as águas subterrâneas e seus perímetros de proteção de poços para aquíferos cenozóicos e com possíveis adaptações e replicações em outros ambientes geológicos e hidrogeológicos. Os envolvidos nesta pesquisa ficam credenciados a atuarem como referências científicas sobre o tema em âmbito nacional. Informo que alguns comentários relacionado a contribuições à presente pesquisa serão realizados junto aos pesquisadores.</p>	
Assinatura: 	Data: 16/06/2021
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese: Análise de métodos para delimitação de Perímetros de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero costeiro em Jaguaruna/SC
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: LUCAS MEDEIROS BOFILL □
Orientador: Prof. Dr. Arí Roisenberg
Examinador: Prof. Dr. Marcos Alexandre de Freitas
Data: 25/06/2021
Conceito: A
PARECER:
<p>O trabalho em sua revisão bibliográfica abordou e comparou de modo detalhado os principais métodos de determinação dos perímetros de proteção de poços.</p> <p>A área de estudo de caso foi muito bem escolhida, pois contém uma bateria de poços de abastecimento público concentrada sobre um aquífero granular típico livre, o que permite adotar modelos matemáticos clássicos.</p> <p>A pesquisa cumpriu com o os objetivos propostos através de texto e artigos muito bem redigidos.</p> <p>A riqueza de dados da referida área é outro aspecto que merece ser destacado, propiciando a abordagem matemática.</p> <p>Um caráter bastante prático é observado na dissertação, colaborando com a questão de gerenciamento de poços situados em aquíferos costeiros, sobretudo utilizados para abastecimento público.</p> <p>Como sugestão para pesquisas futuras nessa mesma abordagem, pode-se agregar estudos hidrogueoquímicos e isotópicos, que certamente irão complementar a pesquisa e dar uma indicação de onde vem a recarga, ou seja, se exclusivamente da precipitação pluviométrica ou se existe contribuição das lagoas.</p>
Assinatura: 
Data: 25/06/2021
Ciente do Orientador:
Ciente do Aluno: