

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**SÂMIA MOMESSO MARQUES**

**ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS  
ÁGUAS DO AQUIFERO BAURU DE 2010 A 2012**

Ilha Solteira  
2018

**SÂMIA MOMESSO MARQUES**

**ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DE PARÂMETROS DE  
QUALIDADE DAS ÁGUAS DO AQUÍFERO BAURU DE 2010 A 2012**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.  
Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e  
Tecnologias Ambientais

Prof.º Dr.º César Gustavo da Rocha Lima  
**Orientador**

Ilha Solteira  
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M357a Marques, Sâmia Momesso.  
Análise espacial e temporal de parâmetros de qualidade das águas do Aquífero Bauru de 2010 a 2012 / Sâmia Momesso Marques. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018  
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2018

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima  
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas. 2. Qualidade das águas. 3. Geoestatística. 4. Parâmetros químicos. 5. Parâmetros físicos.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Análise Espacial e Temporal de Parâmetros de Qualidade das Águas do Aquífero Bauru de 2010 a 2012

**AUTORA:** SÂMIA MOMESSO MARQUES

**ORIENTADOR:** CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE LOLLO

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Ilha Solteira, 30 de julho de 2018

Aos meus pais Edilene e Paulo, meus eternos incentivadores.

À minha irmã Letusa que sempre me aconselha.

Vocês me dão força e coragem para seguir.

## AGRADECIMENTOS

“A gratidão nos torna melhores pessoas e nos faz enxergar o mundo com outros olhos”.

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e saúde a mim concedida. Ele foi essencial para tornar este trabalho realidade. Toda minha gratidão.

Ao meu orientador, Prof.º Dr.º César Gustavo da Rocha Lima, pela confiança em meu trabalho e pelos ensinamentos e conhecimento a mim transmitidos.

Aos meus pais Edilene Francisca Momesso Marques e Paulo Donizete Marques pelo suporte e atenção. E a minha irmã Letusa Momesso Marques por ser meu exemplo. Meu eterno amor por vocês.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e à Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela oportunidade e suporte educacional.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira. Em especial à Prof.ª Dr.ª Luzenira Alves Brasileiro pelos primeiros ensinamentos de metodologia e ao Prof.º Dr.º José Augusto de Lollo pelas sugestões e sabedoria transmitida neste período.

Também aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira que sempre foram solícitos em me ajudar.

Aos que de alguma forma se fizeram presentes. Em especial a Leticia Amadeu, Danilo, Alice, Leticia Pagoto e Cristhy que em diversos momentos me apoiaram e ajudaram quando os procurei.

Por fim, a todas pessoas que direta o indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e participaram desta etapa da minha vida.

Meu muito obrigada!

« L'homme ne marque dans la vie qu'en dominant son caractère ou s'en créant un par l'éducation.». Napoléon Bonaparte

## RESUMO

A água exerce influência direta no desenvolvimento de sociedades. Por sua vez, as águas subterrâneas apresentam um papel fundamental para o abastecimento humano por constituírem aproximadamente dois terços da fonte de água doce no mundo. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) controla e monitora atividades que possam ser fontes de poluição e avalia periodicamente os parâmetros de qualidade das águas. Sua rede conta com 75 pontos de monitoramento até 2012, dificultando um panorama amplo da qualidade das águas no Sistema Aquífero Bauru. O objetivo do trabalho foi estudar a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas do SAB no Estado de São Paulo. Foram avaliados os parâmetros: Alcalinidade Bicarbonato, Bário, Cálcio, Condutividade Elétrica, Dureza, Magnésio, Nitrato, Potássio, pH, Sódio, Sólidos Totais Dissolvidos e Temperatura. Para tanto foi realizada a análise descritiva, de correlação e a análise geoestatística por meio do cálculo de variogramas experimentais para avaliação da dependência espacial e interpolações por krigagem ordinária. Os resultados indicaram que à exceção do pH e da Temperatura, todos os parâmetros possuíam elevada variabilidade dos dados, com Coeficientes de Variação (CV) elevados, em sua maior parte. As correlações significativas do ponto de vista prático de determinação laboratorial foram de Sólido Total Dissolvido com Cálcio ( $r = 0,770$ ) e com Magnésio ( $r = 0,700$ ), além da Dureza com Cálcio ( $r = 0,910$ ). Do ponto de vista espacial, à exceção da Temperatura no primeiro semestre de 2012, os demais parâmetros apresentaram dependência espacial com apreciáveis ajustes variográficos e mapas de krigagens bem definidos. Os valores de pH estiveram dentro do permitido para consumo humano, à exceção de alguns dados pontuais. Em relação ao  $\text{NO}_3^-$ , algumas amostras superaram o Valor Máximo Permitido de 10 mg/L, indicando toxicidade para consumo humano. A influência da variação sazonal foi sutil, em períodos de cheia alguns parâmetros apresentam concentrações ligeiramente inferiores devido ao maior volume de água. As aproximações espaciais e temporais mostraram-se funcionais para extensas áreas e os parâmetros apresentam elevada correlação entre si.

**Palavras-chave:** Águas subterrâneas. Dependência espacial. Geoestatística. Nitrato. Bário. Mapeamento.



## ABSTRACT

Water is essential for the life maintenance. It influences directly the society development over the centuries. Currently, groundwater resources have a crucial role for supply. These resources constitute around two thirds of the global freshwater sources. The Sao Paulo Environmental Company (CETESB) is responsible for manage activities which can be source of contamination and periodically assess water parameters. However, the CETESB system had 75 monitoring points until 2012, hindering area overview. This study aims evaluate variability and temporal-spatial dependency of water parameters for groundwater quality in the Bauru Aquifer System (BAS), in the State of Sao Paulo, using geostatistical techniques. The parameters were: Bicarbonate Alkalinity, Barium, Hardness, Calcium, Magnesium, Nitrate, Potassium, pH, Sodium, Total Dissolved Solids and Temperature. It has been done at first descriptive analysis and then spatial dependency for which parameter by semivariogram analyzes. The results showed that the parameters have a high variability, except by pH and Temperature, the coefficient variation were very high for the parameters. The significant correlations were Total Dissolved Solids with Calcium ( $r = 0.770$ ) and Magnesium ( $r = 0.700$ ) on a laboratorial practice. Besides Hardness and Calcium with  $r = 0.910$ . All parameters showed spatial dependency with appreciable semivariographic adjustments and kriging maps defined. The pH values were allowed for human consumption, except by some punctual wells. The pH averages point to neutral waters. The  $\text{NO}_3^-$  had some samples values over the maximum permitted (10 mg/L), toxic water for consumption. Existing correlation between parameters and realizing spatial and temporal approaches to find values of not sampled points is possible. It works well even for large areas with non-uniform distribution of the sampling points as System Bauru Aquifer.

**Keywords:** Groundwater. Spatial Dependency. Geostatistics. Nitrate. Barium. Mapping.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
2.1	RECURSOS HÍDRICOS .....	11
2.2	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	11
2.3	AQUÍFERO BAURU .....	13
2.4	REDES DE MONITORAMENTO .....	16
2.5	QUALIDADE DA ÁGUA .....	17
2.5.1	<i>Alcalinidade Bicarbonato.....</i>	<i>19</i>
2.5.2	<i>Bário.....</i>	<i>19</i>
2.5.3	<i>Cálcio .....</i>	<i>20</i>
2.5.4	<i>Condutividade Elétrica.....</i>	<i>20</i>
2.5.5	<i>Dureza.....</i>	<i>20</i>
2.5.6	<i>Magnésio.....</i>	<i>21</i>
2.5.7	<i>Nitrogênio Nitrato.....</i>	<i>21</i>
2.5.8	<i>Potássio .....</i>	<i>22</i>
2.5.9	<i>Potencial Hidrogeniônico.....</i>	<i>22</i>
2.5.10	<i>Sódio.....</i>	<i>23</i>
2.5.11	<i>Sólidos Totais Dissolvidos .....</i>	<i>23</i>
2.5.12	<i>Temperatura.....</i>	<i>23</i>
2.6	PRINCIPAIS CONCEITOS DA GEOESTATÍSTICA .....	24
2.6.1	<i>Definições Técnicas.....</i>	<i>24</i>
2.6.2	<i>Geoestatística Aplicada a Recursos Hídricos .....</i>	<i>27</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO .....	30
3.2	PARÂMETROS ANALISADOS.....	39
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA QUALIDADE DA ÁGUA .....	43
4.2	ANÁLISE DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO.....	50

4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA .....	55
4.4 MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL .....	58
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A – Variogramas de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Ba .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B – Variogramas de Ca e <math>\sigma</math> .....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE C – Variogramas de Dur e Mg .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE D – Variogramas de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e K .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE E – Variogramas de pH e Na .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE F – Variogramas de STD e T .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE G – Validações Cruzadas de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Ba .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE H – Validações Cruzadas de Ca e <math>\sigma</math> .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE I – Validações Cruzadas de Dur e Mg .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE J – Validações Cruzadas NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e K .....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE K – Validações Cruzadas pH e Na .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE L- Validações Cruzadas STD e T .....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para a manutenção da vida, exercendo influência direta no desenvolvimento de sociedades ao longo dos séculos. No decorrer da história da humanidade, as sociedades foram se tornando cada vez mais complexas e tecnológicas, com isso a demanda por água tornou-se cada vez mais exigente quanto à quantidade e, principalmente, melhor qualidade.

O recurso hídrico é abundante no território brasileiro, mas está distribuído de forma irregular. As águas subterrâneas ganham valor estratégico para o abastecimento em todo território nacional, devendo ser gerenciadas adequadamente e de modo sustentável. Alguns municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente pelas águas subterrâneas, ao passo que outros fazem seu uso concomitante ao de águas superficiais e, ainda, existem aqueles que sofrem pela carência de água.

O Brasil apresenta falhas na criação e na execução das políticas de gerenciamento de recursos hídricos. Tal fato ainda vem associado à dificuldade de implantar uma cultura de conscientização ao seu uso. Há a necessidade de proteção e de fiscalizações rigorosas para o uso das águas, de forma que impeçam a contaminação ou o esgotamento de fontes naturais.

Um dos aquíferos mais importantes no abastecimento do Estado de São Paulo é o Sistema Aquífero Bauru (SAB), responsável por fornecer água para aproximadamente metade da população do Estado através de poços públicos e privados. Nesta área, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é responsável por monitorar e controlar possíveis fontes de poluição, com aproximadamente 75 pontos de amostragem.

Uma ferramenta auxiliar no processo de análise das águas subterrâneas é a geoestatística. Sua aplicação pode estimar e mapear a variabilidade espacial dos parâmetros de qualidade das águas. Esses dados podem ser importantes ao gerenciamento de recursos hídricos, inclusive de modo a facilitar a detecção de possíveis áreas seriamente comprometidas por poluentes. Sendo assim, visto a necessidade de conhecer e monitorar os recursos hídricos subterrâneos, o presente trabalho objetivou estudar a variabilidade espaço-temporais dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 RECURSOS HÍDRICOS

Os recursos hídricos são águas superficiais ou subterrâneas, doces ou salgadas. Eles são capazes de diluir e assimilar resíduos a eles lançados por meio de processos físicos, químicos e biológicos. No entanto essa capacidade é limitada, e quando realizada indevidamente, o lançamento de efluentes pode acarretar a contaminação das águas.

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2016), a quantidade de água existente no Planeta Terra é considerada constante há milhões de anos. A maior parte dela, cerca de 97,5%, está contida nos mares e oceanos e é salgada. A água doce, desconsiderando a água congelada nos polos, representa apenas 0,6% do total. Destes 0,6%, apenas 2% compõe os rios e lagos, o restante (98%) está contido nos aquíferos. O Brasil encontra-se em uma posição privilegiada, pois detém cerca de 12% da reserva mundial de água doce em seu território. Sendo 80% na Bacia Amazônica e 1,6% no Estado de São Paulo (SAVAZZI, 2009).

A água doce está relacionada diretamente ao abastecimento humano e ao crescimento estrutural do país, como na geração de energia, na indústria e na agricultura, representando um recurso natural de elevado valor econômico, estratégico e social. Assim, frente à crescente demanda observada, os recursos hídricos devem ser preservados.

Dentre as vantagens das águas subterrâneas está sua capacidade adaptação ao aumento progressivo de demanda, como por exemplo a possibilidade de sobre-exploração temporária, para mitigar efeito de períodos de seca (SAHUQUILLO, 2017). Apesar da possibilidade de sobre-exploração, o aproveitamento e a conservação dos recursos hídricos requerem concepção, planejamento, administração, projeto, construção e operação de meios para controlar a utilização de forma racional. A conservação destes recursos está associada a estudos da engenharia hidrológica, que estabelecem as variabilidades espaciais, temporais e geográficas (NAGHETTINI, 2006).

Para estabelecer tais relações é preciso compreender não apenas o planejamento do uso, mas também o comportamento natural das águas e o local onde estão armazenadas, superficiais ou subterrâneas.

### 2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A ocorrência de águas subterrâneas nem sempre foi compreendida, porém métodos bem-sucedidos de trazer esta água à superfície cresceram consideravelmente desde o seu conhecimento

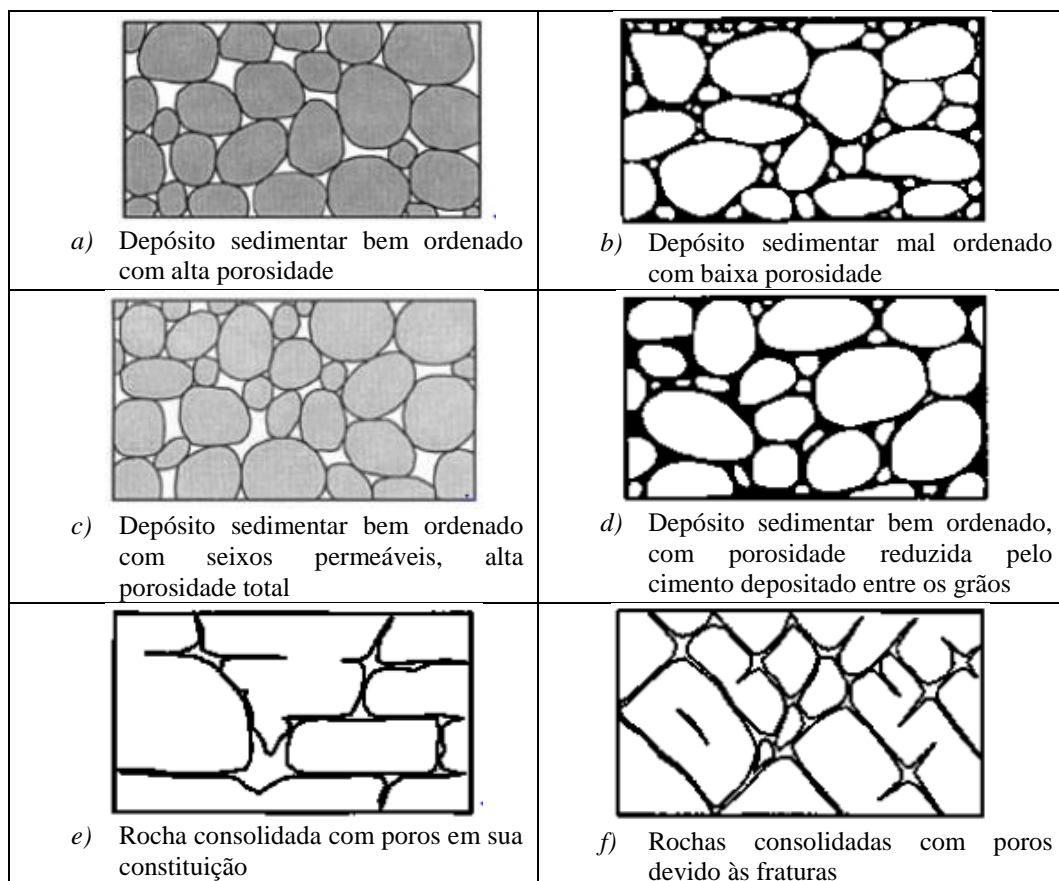
(WHO, 1996). As águas subterrâneas são extremamente importantes no ciclo hidrológico, elas constituem a maior porcentagem da fonte de água doce no mundo (CETESB, 2013).

No Brasil, os aquíferos contribuem para que muitos rios sejam perenes e compõe elevada parcela de água potável utilizada para consumo humano, agricultura e outros fins, por isso acompanhar as condições das águas subterrâneas é de elevada importância (ANA, 2018). No Estado de São Paulo, o recurso hídrico subterrâneo responde pelo abastecimento total ou parcial de cerca de 80% dos núcleos urbanos e por cerca de 34% da população (CETESB, 2010).

Conforme a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), águas subterrâneas são aquelas que ocorrem no subsolo, e aquífero é todo corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e do carreamento de materiais rochosos.

Águas subterrâneas podem ocorrer em diferentes formações geológicas (Figura 1).

Figura 1 - Textura de rochas e porosidade de materiais típicos de aquíferos



Fonte: Adaptado de Todd (1980)

De acordo com WHO (1996), essas águas se acumulam nas aberturas do solo, denominadas vazios ou poros. Em materiais granulares os poros são os espaços entre grãos representado na Figura 1a, eles podem ser reduzidos em decorrência da compactação ou cimentação (Figura 1d). A Figura

1b e c apresentam porosidades intermediárias da Figura 1a e d. Em rochas consolidadas, a forma de vazios encontrada são as fraturas ou fissuras, expressas na Figura 1e e f. Frente a tais conceitos, o volume de água contido em rochas depende da porcentagem de aberturas ou poros para um dado volume de rocha, denominado porosidade.

Uma parcela dos fluxos de água subterrânea deságua em fontes, alimenta os rios, podendo torná-los perenes durante as estações de precipitações relativamente escassas, ou é descarregada diretamente nos lagos, mares e oceanos, portanto, a água subterrânea está intimamente associada à água superficial (PALMIER, 2006).

O fluxo das águas subterrâneas é bastante estável quanto à direção e a velocidade do fluido. Tais movimentações são governadas pela porosidade e permeabilidade do material geológico. Por isso, o armazenamento da água está diretamente relacionado com a composição do solo em que ela se encontra.

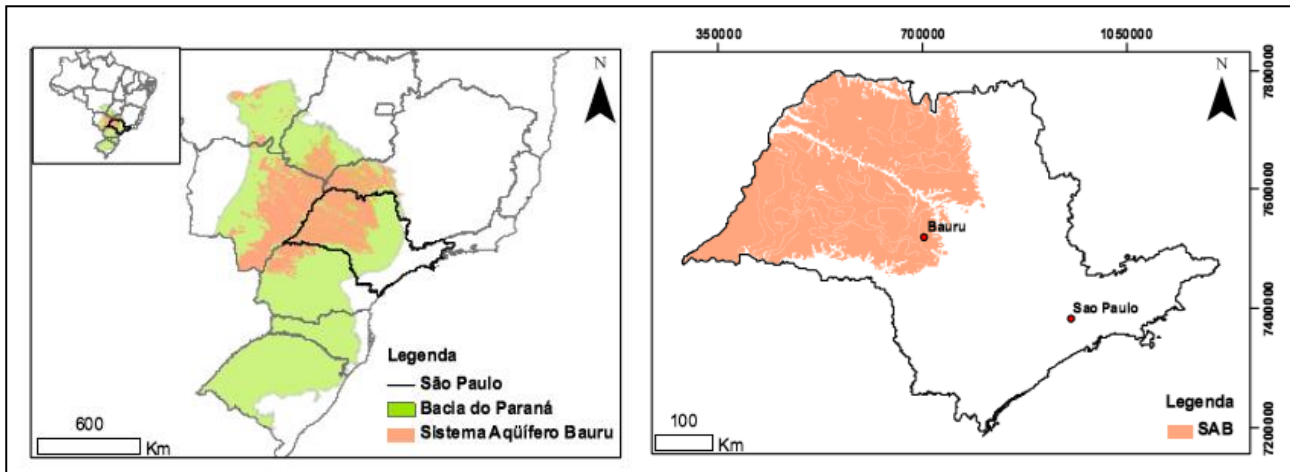
De acordo com Palmier (2006), os mananciais de água subterrânea são primordialmente recarregados pela parcela da chuva que se infiltra no subsolo e percola para as camadas mais profundas. Estas recargas são ocasionalmente aumentadas por lagos e cursos de água influentes, cujos níveis são superiores à superfície do lençol freático. Outras contribuições, denominadas de recargas artificiais, ocorrem em função do excesso de irrigação, de vazamentos em canais e adutoras, e do uso de poços de recarga alimentados com excedentes de águas de enchentes ou de estações de tratamento de esgoto ou de água.

Assim como a água percola no solo, outras substâncias podem fazer o mesmo. A contínua produção de resíduos pela sociedade tem provocado sua disposição inadequada. A ocorrência de acidentes envolvendo produtos tóxicos, orgânicos e inorgânicos já foi observada diversas vezes. Por sua vez, a contaminação de águas subterrâneas está relacionada com a geologia local, os padrões de escoamento da mesma, os processos físicos, químicos e biológicos (WENDLAND; MARIN, 2013). Nesse sentido, é importante avaliar a qualidade das águas e verificar possíveis vulnerabilidades às atividades humanas, visando à conservação desse bem.

### 2.3 AQUÍFERO BAURU

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) ocupa extensa área no território brasileiro. No que diz respeito ao Estado de São Paulo, representa quase metade de seu território (Figura 2). Segundo Campos et al. (1993), é um aquífero classificado como livre a semi-confinado que possui espessura média de 100 metros. O SAB apresenta como limites a oeste e noroeste o rio Paraná, a norte o rio Grande, a sul o rio Paranapanema, e áreas de afloramento da Formação Serra Geral na região leste (FERNANDES, 1998).

Figura 2 - Sistema Aquífero Bauru no Brasil e no Estado de São Paulo



Fonte: Silva (2009)

O Aquífero Bauru é constituído pelas rochas dos Grupos Bauru e Caiuá, cuja sedimentação ocorreu em condições essencialmente desérticas e em condições de clima semiárido com presença de água, o que proporcionou heterogeneidade litológica (CETESB, 2013). Em função desta heterogeneidade, a condutividade hidráulica do Aquífero Bauru apresenta valores de 0,002 a 3,36 metros/dia, que considerando a espessura do aquífero representa valores de 0,14 a 328 m<sup>2</sup>/dia, sendo em sua maioria valores de 50 m<sup>2</sup>/dia (CETESB, 2007).

No Estado de São Paulo, o SAB encontra-se sobre a Formação Serra Geral, com exceção a determinadas localizações, como nos municípios de Bauru e Agudos, onde cobre parcialmente as rochas das Formações Botucatu e Pirambóia (SILVA, 2009). De acordo com Barison (2003) a recarga do SAB ocorre predominantemente por água pluvial, com direção de fluxo das águas subterrâneas no sentido dos principais rios, como o Turvo, Preto, São José dos Dourados, Tietê, Aguapeí, Peixe, Santo Anastácio, Paraná e Paranapanema (CAMPOS, 1987). Devido a sua composição, o SAB caracteriza-se como unidade hidrológica sedimentar, permeável por porosidade granular (CETESB, 2013).

As características hidráulicas devem variar conforme os diferentes valores de porosidade e permeabilidade encontrados nas áreas (SILVA; KIANG; CAETANO-CHANG, 2003). No Aquífero Bauru, por ser predominantemente freático, a pressão d'água está em equilíbrio com a pressão atmosférica e sua porosidade varia nas camadas arenosas e nos arenitos calcíferos e silteosos, respectivamente, em média de 5 a 15%.

Segundo o DAEE (1976) o SAB é considerado moderadamente permeável devido a elevada quantidade de material argiloso e silteoso em sua composição. Estas características hidráulicas permitem facilidade na sua exploração, com poços relativamente rasos, de 75 a 125 m de profundidade.

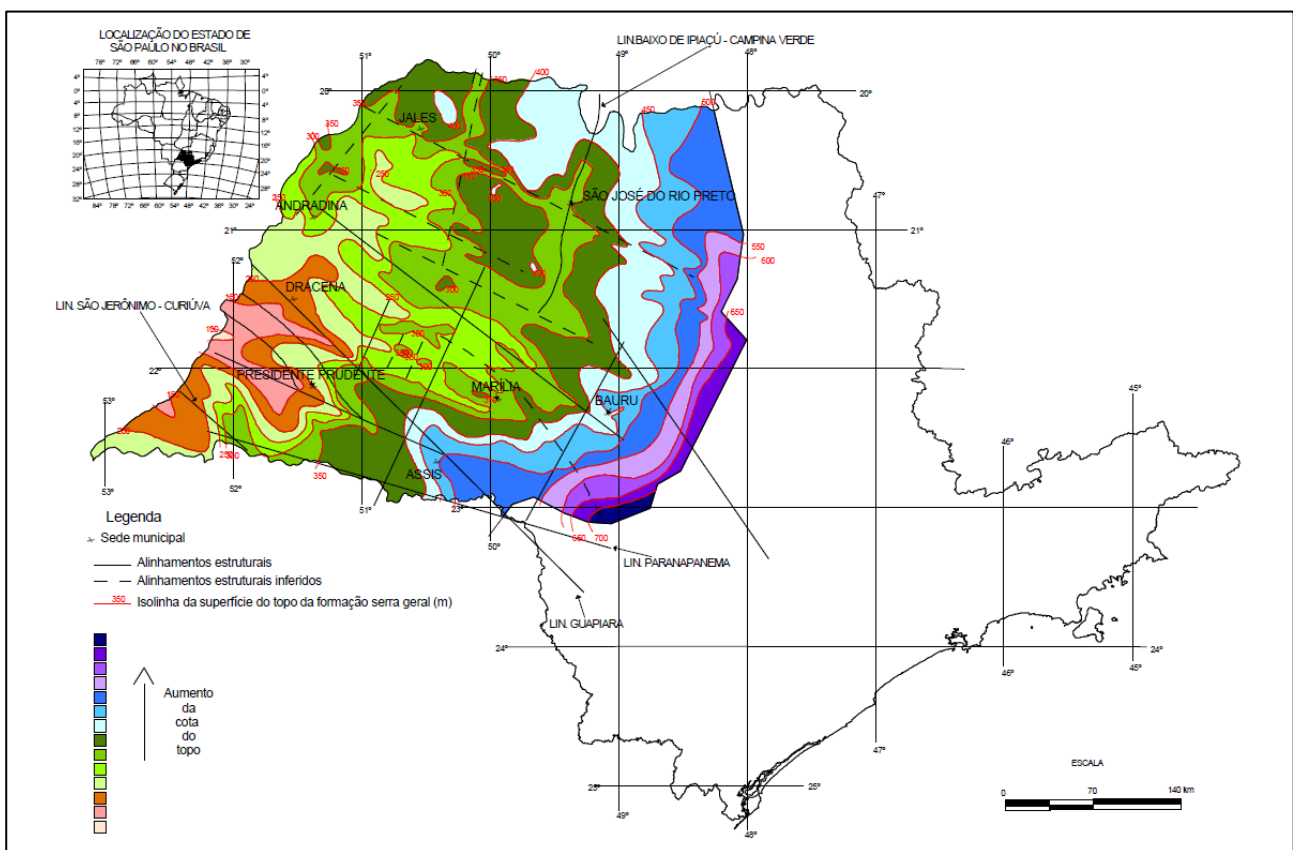


De acordo com Oliveira (2002), as regiões administrativas de Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba apresentam espessura saturada do aquífero variável entre 100 m e 150 m, variando de acordo com a morfologia da superfície e pelo substrato rochoso dos basaltos da Formação Serra Geral.

Quanto às características climáticas, segundo a classificação de Köppen, o SAB é predominantemente de clima tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18 °C (Aw). Em pontos isolados ocorre clima tropical chuvoso, com inverno seco onde o mês menos chuvoso tem precipitação inferior a 60 mm (Am), clima monçônico. Algumas pequenas partes ainda têm clima tropical de altitude, com chuvas de verão e seca de inverno, temperatura média mais quente superior a 22 °C (Cwa) (CEPAGRI, 2018).

As cotas topográficas do topo da Formação Serra Geral vão de, aproximadamente, 100 m a 700 m, observado na Figura 3. E a altitude média do aquífero está em torno dos 300 m. A Formação Serra geral está localizada diretamente abaixo do SAB para a maior parte da área.

Figura 3 - Mapa do Contorno Estrutural do Topo da Formação Serra Geral



Fonte: Campos (2000)

Quanto aos aspectos hidrogeológicos, as três formações mais antigas do Grupo Bauru são: Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina. Outra questão importante, é a necessidade de existir monitoramento da qualidade das águas subterrâneas por órgãos responsáveis. Principalmente por

existir a exploração deste bem para uso, o que pode acarretar contaminações ou exploração desenfreada prejudicando a fonte.

## 2.4 REDES DE MONITORAMENTO

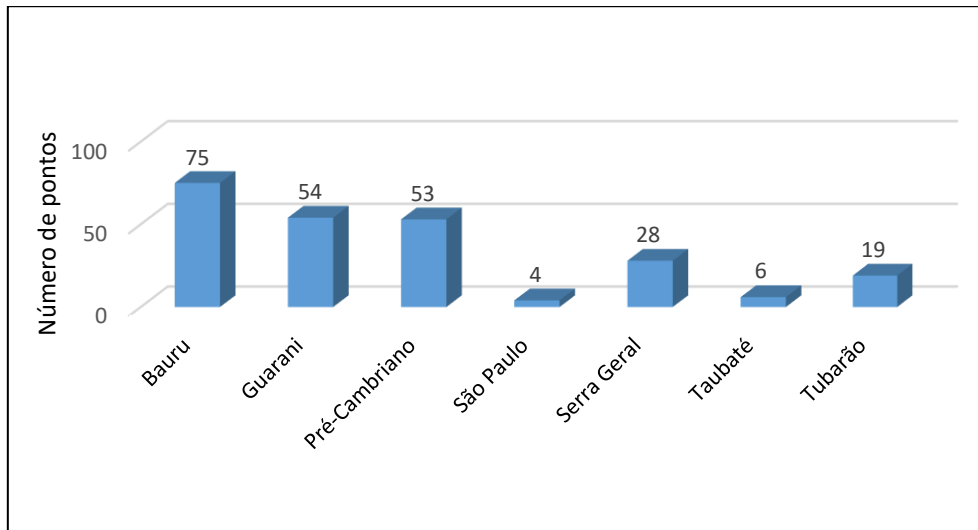
O órgão responsável pelo monitoramento da qualidade da água no Estado de São Paulo é a CETESB. Esta agência governamental é responsável por realizar o controle, fiscalização monitoramento e licenciamento de atividades que possam ser fontes de poluição, tendo como foco principal preservar e recuperar a qualidade das águas, bem como do ar e dos solos.

A rede estadual de monitoramento ambiental das águas subterrâneas começou a ser implantada no ano de 1990, com acompanhamento semestral sistemático da qualidade de água de poços utilizados para abastecimento público, instalados nos Aquíferos Bauru e Guarani, sendo o primeiro relatório publicado no ano de 1996. Nos anos posteriores ao de implantação, houve o aumento do número de pontos e de aquíferos monitorados e das substâncias analisadas (CETESB, 2013). O fato da rede de monitoramento ser formada majoritariamente por poços de abastecimento público lhe confere a peculiaridade de intermitência, uma vez que alguns poços podem ser desativados temporariamente para reparos.

A CETESB utiliza em seu monitoramento poços tubulares e nascentes, os quais são selecionados para abranger diferentes aquíferos presentes no Estado de São Paulo, assim como diversas áreas e formas de ocorrência. De acordo com o relatório CETESB (2013), são preferencialmente escolhidos os poços utilizados para abastecimento público de água, os que possuem o nível mais próximo da superfície e aqueles instalados a montante de fontes potenciais de poluição.

A Rede de Monitoramento trata os resultados analíticos a partir do agrupamento por aquíferos. A avaliação de qualidade dos poços tubulares e nascentes apresenta o número total de pontos monitorados indicado na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico do número de pontos monitorados por Sistema Aquífero – 2010-2012



Fonte: Adaptado de CETESB (2013)

Ainda segundo CETESB (2013) os parâmetros para caracterização química e avaliação da qualidade da água subterrânea bruta no período de 2010 a 2012 foram:

- **Parâmetros Físicos:** temperatura da água, sólidos dissolvidos totais e sólidos totais;
- **Parâmetros Químicos:** pH, alcalinidade bicarbonato, alcalinidade carbonato, alcalinidade hidróxido, condutividade elétrica, dureza total, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio amoniacal total, nitrogênio Kjeldhal total, carbono orgânico dissolvido, cloreto, fluoreto, sulfato e as concentrações totais de alumínio, arsênio, bário, berílio, boro, cádmio, cálcio, cobre, chumbo, cromo, estanho, estrôncio, ferro, lítio, magnésio, manganês, níquel, potássio, sódio, titânio, vanádio e zinco.

Com base nos parâmetros considerados, o Ministério da Saúde estabelece padrões de qualidade da água para o consumo humano. Estes padrões são fixados com base no risco à saúde humana e, em alguns casos, em características organolépticas da água, conforme orientação da Organização Mundial da Saúde (OMS).

## 2.5 QUALIDADE DA ÁGUA

Qualidade é definida como a propriedade de qualificar, sendo assim está relacionada ao atendimento de necessidades e expectativas em relação a determinado objeto de uso. O termo Qualidade da Água está estritamente relacionado ao atendimento das necessidades ligadas a este bem de consumo. Ou seja, é em função dela que surgem as exigências de tratamento e os padrões de potabilidade a serem seguidos.

Devido à complexidade dos fatores que determinam a qualidade de água e a multiplicidade de variáveis utilizadas para descrever o estado das massas de água em termos quantitativos, a definição de qualidade de água pode variar. Além disso, a compreensão da qualidade de água sofreu evoluções ao longo dos séculos, junto a expansão dos requisitos de uso de água e a capacidade de medir e interpretar as características desse bem natural (WHO, 1996). Para cada uso existe padrão de qualidade especificado por legislação, como é o caso da Resolução do CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) e nº 396 (BRASIL, 2008).

A qualidade da água dos mananciais pode implicar sérios problemas relacionados a potabilização da água, aumentando os riscos sanitários e inviabilizando o emprego de técnicas de tratamento mais simples e menos onerosas (PÁDUA; FERREIRA, 2006).

Na natureza, a água é encontrada quimicamente pura apenas em seu estado de vapor. Quando as moléculas se condensam, as impurezas começam a acumular: gases dissolvem-se nas gotas de chuva e, ao atingir a superfície, a água dissolve uma série de substâncias incorporando-as, tais como cálcio, magnésio, sódio, bicarbonatos, cloretos, sulfatos e nitratos, traços de alguns metais como chumbo, cobre, manganês e compostos orgânicos provenientes dos processos de decomposição que ocorrem no solo (PÁDUA; FERREIRA, 2006).

Infelizmente, no Brasil os dados de parâmetros de qualidade gerados com a finalidade de pesquisar ou captar água subterrânea, são pulverizados e, de certa forma, disponibilizados nas diversas empresas privadas e órgãos de governo. Assim para gerir corretamente os recursos hídricos são necessários esforços redobrados, para obtenção de dados relativos a presença de diferentes compostos químicos na água (SAVAZZI, 2009).

O controle de qualidade dos recursos hídricos é essencial e deve ser realizado de forma periódica para que sejam evitados excessos de impurezas. Algumas substâncias podem indicar qualidades positivas para águas de abastecimento humano.

A avaliação inclui o uso de monitoramento com a finalidade de definir a condição da água, apresentar a base de detecção de tendências e fornecer as informações que permitem o estabelecimento de relações de causa-efeito (WHO, 1996). Associado à avaliação estão, o relato dos resultados e a interpretação, para que seja possível formular recomendações para ações futuras. Por isso existe uma sequência lógica de cuidados que envolvem três principais fases: monitoramento, avaliação e gerenciamento.

De acordo com o Ministério da Saúde. (BRASIL, 2011), compete a órgãos públicos, como a Secretaria de Vigilância em Saúde/Ministério da Saúde (SVS/MS), promover e acompanhar a vigilância da água para consumo humano, em articulação com as Secretarias de Saúde dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios e respectivos responsáveis pelo controle da qualidade da água.

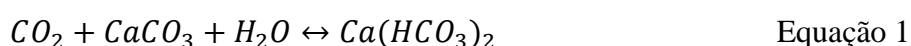
O Ministério Público fica responsável por habilitar os laboratórios de referência regional e nacional para operacionalização das análises de maior complexidade na vigilância da qualidade da água quando esta se trata de consumo humano, conforme estabelecido pela Portaria nº 70/SVS/MS, de 23 de dezembro de 2004 (BRASIL, 2011).

Com o conhecimento das impurezas é que se pode definir com segurança a técnica mais adequada para tratamento e é também por meio da caracterização que se pode avaliar se o tratamento realizado é satisfatório e se a água distribuída à população é segura do ponto de vista sanitário.

O monitoramento depende diretamente do uso da água. O principal foco desse trabalho foi a qualidade da água ligada ao consumo humano, como base de valores permitidos para cada parâmetro foi utilizada a Portaria nº 2914/2011 ou a Portaria nº 518/2004, ambas do Ministério da Saúde. Para os parâmetros não mencionados pelo MS foram usadas outras fontes como a Organização Mundial da Saúde (WHO, 1996).

### **2.5.1 Alcalinidade Bicarbonato**

A alcalinidade é a capacidade da água em neutralizar ácidos. De forma geral ela pode ocorrer devido à elevada concentração de carbonatos, bicarbonatos ou hidróxidos, podendo também conter boratos, fosfatos, silicatos. Os bicarbonatos e, em menor extensão, os carbonatos, que são menos solúveis, dissolvem-se na água devido à sua passagem pelo solo. Se este solo for rico em calcário, o gás carbônico da água o solubiliza, transformando-o em bicarbonato, conforme a reação que segue (CETESB, 2015):



### **2.5.2 Bário**

O bário não é elemento essencial ao homem. Segundo Héller e Pádua (2006) a ingestão de água contendo bário pode acarretar o estímulo dos sistemas neuromuscular e cardiovascular, contribuindo para a hipertensão. As principais fontes de contaminação por este elemento são efluentes de mineração, efluentes de refinaria de metais, erosão de depósitos naturais e indústrias, como a de borracha, a têxtil e a de cerâmicas.

Em algumas fontes minerais, o bário pode ser encontrado em concentrações entre 0,7 e 900 µg/L, como informado pela CETESB (2015). O valor máximo permitido de bário na água potável é de 0,7 mg/L (Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde, BRASIL, 2011).

### 2.5.3 Cálcio

O íon cálcio é um cátion comumente encontrado, em maiores concentrações, em sistemas de água doce. Algumas fontes predominantemente comuns desse mineral, são:  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (gesso),  $CaMg(CO_3)_2$  (dolomita) e  $CaCO_3$  (calcita e aragonita).

Os íons minerais de cálcio [ $Ca^{+2}$ ], associados aos de magnésio [ $Mg^{+2}$ ], dissolvidos, são os responsáveis pela dureza da água. Quanto maior suas quantidades, maior será a dureza. Este tipo de água pode trazer diversos problemas tanto para a saúde da população quanto para o uso industrial.

### 2.5.4 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica representa uma variável física. Com ela é possível indicar a capacidade da água em conduzir corrente elétrica. Segundo a CETESB (2015), ela depende das condições iônicas e da temperatura, e indica a quantidade de sais existentes na coluna de água, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes.

A condutividade também fornece uma boa indicação das modificações na composição da água, especialmente na sua concentração mineral, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários componentes. Ela aumenta à medida que mais sólidos são adicionados (CETESB, 2015). Valores elevados podem indicar águas corrosivas.

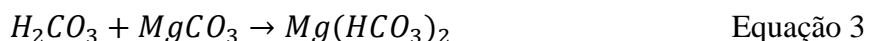
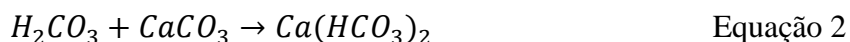
De acordo com Pádua e Ferreira (2006), a determinação da condutividade elétrica permite estimar de modo rápido a quantidade de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) presentes na água. Segundo WHO (1996) a condutividade da maioria das águas doces está entre 10 e 1.000  $\mu S/cm$ , mas pode exceder este valor, principalmente se as águas estiverem poluídas ou recebendo elevadas quantidade de água de escoamento.

### 2.5.5 Dureza

A dureza é caracterizada pela extinção da espuma formada pelo sabão, os quais são transformados em complexos insolúveis. Existem quatro compostos que conferem dureza às águas, eles são: bicarbonato de cálcio, bicarbonato de magnésio, sulfato de cálcio e sulfato de magnésio.

Os níveis de dureza que as águas podem ser classificadas são: mole (0 a 75 mg/L); moderadamente dura (75 a 150 mg/L); dura (150 a 300 mg/L), e muito dura (acima de 300 mg/L) (SAWYER et al., 2000).

A passagem da água pelo solo é a principal responsável pela dureza da mesma, pois ocorre a dissolução de rocha calcária pelo gás carbônico presente nas águas, segundo as reações que seguem (CETESB, 2015):



Por esta razão, é comum encontrar águas subterrâneas com dureza mais elevada do que águas superficiais. De acordo com a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) o VMP para Dureza é de 500 mg/L.

Ainda para Todd (1980) a dureza é uma medida baseada no teor de cálcio e magnésio que pode ser obtida pela seguinte equação:

$$DT = 2,5 \times Ca + 4,1 \times Mg \quad \text{Equação 4}$$

Onde: DT é dureza total (mg/L); Ca é o teor de cálcio (mg/L), e Mg é o teor de magnésio (mg/L).

### 2.5.6 *Magnésio*

Em águas naturais o magnésio é encontrado como  $Mg^{+2}$ , e assim como o cálcio, é o principal contribuinte para dureza da água. O magnésio surge principalmente da ação de intempéries em rochas que contêm minerais ferromagnésio ou carbonatadas.

O magnésio ocorre em diversos compostos organometálicos como também na matéria orgânica, pois é um elemento essencial para os organismos vivos. Segundo WHO (1996), as concentrações naturais em águas doces podem variar de 1 até 100 mg/L, dependendo dos tipos de rochas dentro da bacia. Embora o magnésio seja utilizado em processos industriais, estes contribuem relativamente pouco para o magnésio total de águas superficiais.

### 2.5.7 *Nitrogênio Nitrato*

O nitrogênio pode ser encontrado nas águas em diversas formas, sendo elas: nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. O nitrogênio orgânico e o amoniacal são formas reduzidas, provenientes, de forma geral, de esgotos sanitários, efluentes industriais e do carreamento de solos

fertilizados. Por outro lado, o nitrogênio nítrico e o nitrato são formas oxidadas, dependem da fixação química que ocorre nas águas devido à presença de luz (CETESB, 2015).

O nitrogênio nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) está associado à última etapa de degradação da poluição orgânica por meio da relação entre as formas de nitrogênio, ou seja, ele indica zona de águas limpas. Porém, os nitratos são tóxicos, podendo causar metahemoglobinemia infantil. A Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde estabelece como 10 mg/L seu valor máximo permitido (BRASIL, 2011).

### **2.5.8 Potássio**

Em águas naturais, o potássio não é encontrado em quantidades muito elevadas. Isto ocorre devido à elevada resistência às intempéries das rochas que apresentam potássio em sua composição. Por outro lado, sais de potássio são usados na indústria e em fertilizantes de uso agrícola, o que acarreta um aumento da presença deste mineral em decorrência de descargas de efluentes industriais e agrícolas.

O potássio é usualmente encontrado na forma iônica e os seus sais são altamente solúveis. Ele é pronto para ser incorporado em estruturas minerais e acumulado pela biota aquática, pois é elemento nutricional essencial. As concentrações em águas naturais são usualmente menores que 10 mg/L. Valores da ordem de grandeza de 100 e 25.000 mg/L podem indicar a ocorrência de fontes quentes e salmouras, respectivamente (CETESB, 2015).

### **2.5.9 Potencial Hidrogeniônico**

O Potencial Hidrogeniônico (pH) é uma variável de elevada importância para avaliar a qualidade da água, pois influencia diversos processos biológicos e químicos (WHO, 1996).

O pH da água indica a medida da atividade dos íons hidrogênio e expressa a intensidade de condições ácidas,  $\text{pH} < 7$ , ou alcalinas,  $\text{pH} > 7$ . Águas neutras tem pH igual a 7. Critérios de proteção à vida aquática indicam que o pH deve estar entre 6 e 9.

Águas naturais tendem a apresentar o pH próximo da neutralidade, devido à sua capacidade de tamponamento. As próprias características do solo, a presença de ácidos húmicos ou atividade fotossintética intensa podem contribuir para a elevação ou redução natural do pH (PÁDUA; FERREIRA, 2006).

Na legislação do Estado de São Paulo, estabelece-se faixa entre 5 e 9 para o lançamento direto nos corpos receptores (artigo 18 do Decreto 8.468/76) e entre 6 e 10 para o lançamento na rede pública seguida de estação de tratamento de esgotos (artigo 19-A) (CETESB, 2015). Recomenda-se, pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), que o pH da água num sistema de abastecimento, seja mantido na faixa de 6 a 9,5.



### **2.5.10 Sódio**

Todas águas minerais contêm certa quantidade de sódio, pois este elemento é um dos mais abundantes na Terra e é composto por sais altamente solúveis em água. A concentração deste sal varia conforme a existência de lançamento de esgoto doméstico e efluentes industriais, como também de países que usam sais em rodovias para controlar neve e gelo (CETESB, 2015).

As concentrações de sódio nas águas superficiais variam, de forma geral como exposto pela Cetesb, de 1 mg/L até 10 mg/L, ou mais em casos particulares como salmoura natural. Para águas subterrâneas observa-se valores que excedem 50 mg/L (CETESB, 2015).

A maior preocupação com a quantidade de sódio na água está vinculada às águas cujo destino seja dessedentação de animais ou irrigação na agricultura.

### **2.5.11 Sólidos Totais Dissolvidos**

Qualquer impureza presente na água, exceto os gases dissolvidos, é considerada como carga de sólidos. A classificação dos sólidos ocorre de acordo com o tamanho das partículas e suas características químicas. Os sólidos totais são classificados em suspensos e dissolvidos. O excesso de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água pode causar alterações de gosto e problemas de corrosão (PÁDUA; FERREIRA, 2006).

Como padrão de aceitação para consumo humano, a Portaria nº 518/2004 estabelece o valor máximo permitido de 1.000 mg/L para STD na água potável.

### **2.5.12 Temperatura**

Os corpos de água na natureza sofrem variações sazonais, diárias e também estratificação vertical. A temperatura se relaciona com localização, como latitude e altitude; época do ano ou do dia; movimento da água e profundidade. A poluição, como despejos industriais, também é capaz de elevar a temperatura da água.

De acordo com a CETESB (2015), a temperatura desempenha um papel crucial no meio aquático, condicionando as influências de uma série de variáveis físico-químicas. Em geral, a medida que a temperatura aumenta, de 0 a 30°C, a condutividade térmica e a pressão de vapor também aumentam, enquanto que viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem.

Temperaturas elevadas da água intensificam o potencial de crescimento de microrganismos no sistema de distribuição e podem desencadear sensação de gosto e odor, além da cor e da corrosão (PÁDUA; FERREIRA, 2006).

O relatório CETESB 2013 traz Valores de Referência de Qualidade (VRQ) para as águas do aquífero Bauru em sua porção do Estado de São Paulo. Tais valores foram baseados nos valores de estudo para a região abrangida pelo SAB e estão dentro dos VMP. Segue indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de Referência de Qualidade para SAB no Estado de São Paulo

Parâmetro	VRQ*	VMP <sup>a</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	110	-
Ba	0,25	0,70
Ca	25	-
σ	240	-
Dureza	100	500
Mg	8	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,5	10,0
K	4,5	-
pH	7,5	6,0 – 9,5 <sup>b</sup>
Na	15	200
STD	200	1.000
T	26	-

\*Valores dados em mg/L, salvo σ em μS/cm, pH em unidade de pH e T em °C; <sup>a</sup>VMP – valor máximo permitido, maioria definida pelo Padrão da Potabilidade da Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde; <sup>b</sup>pH não se trata de um padrão, mas de recomendação de uma faixa de pH a ser mantida no sistema de distribuição de água para abastecimento.

Fonte: Adaptado de CETESB (2013)

## 2.6 PRINCIPAIS CONCEITOS DA GEOESTATÍSTICA

### 2.6.1 Definições Técnicas

A estatística clássica é aplicada para caracterizar e descrever a distribuição espacial do parâmetro. Estatística clássica utiliza parâmetros, como média e desvio padrão, para representar um fenômeno e tem como base uma hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias (CAMARGO, 1998).

Yamamoto e Landim (2015), estudando reservas minerais, evidenciaram que a geoestatística proporciona um conjunto de métodos para a estimativa espacial, baseada na dependência e variabilidade natural dos parâmetros.

As técnicas da geoestatística partem de variáveis aleatórias para modelar as incertezas. A principal ideia é usar estas variáveis na caracterização de eventos determinísticos incertos, que podem não ser intuitivos (RIBEIRO DE SÁ, 2016). O estudo geoestatístico se baseia em um conjunto de

observações quantitativas ou qualitativas, que constituem uma amostra. Ele objetiva caracterizar espacialmente uma variável de interesse por meio das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2015). A inferência espacial é denominada interpolação e é fundamental para ajustes de funções matemáticas locais ou globais.

A amostragem, por sua vez, é feita com base em um planejamento, que deve definir a coleta das unidades de amostra de forma aleatória e simples, aleatória e estratificada ou sistemática (YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

Segundo Olea (2003) e Deutsch e Pyrez (2014), função aleatória (FA) é nada mais que uma coleção de variáveis aleatórias (VA)  $\{Z(u):u \in \text{área de estudo } A\}$ , sendo A o domínio espacial em um espaço Euclidiano n-dimensional. Normalmente, a definição de FA é restrita a variáveis aleatórias relacionadas ao mesmo parâmetro de qualidade, dito como z, então, outra VA seria definida para modelar a variabilidade espacial do segundo parâmetro, dito como  $\{Y(u), u \in \text{área de estudo } A\}$  (RIBEIRO DE SÁ, 2016).

De acordo com Yamamoto e Landim (2015), o conjunto de VA constitui uma função aleatória ou um processo aleatório ou processo estocástico e o conjunto de valores reais de  $Z(x)$ , que inclui a realização da função aleatória, é conhecida como variável regionalizada.

Segundo Landim (2003), as amostras são obtidas a partir de um determinado número de observações, estimando o comportamento do conjunto de todas as observações em potencial. Para isso, é necessário que os subconjuntos sejam coletados de tal modo que cada observação tenha a mesma chance de ser escolhida.

Quanto aos variogramas, sua construção está diretamente relacionada à distribuição dos valores que compõe a amostra. De acordo com Yamamoto e Landim (2015) quanto maior a dispersão, maior o momento de inércia e menor a correlação. Se não houver dispersão todos os pares de pontos caem sobre uma reta de 45°, o momento de inércia é zero e o coeficiente de correlação é igual a um, valor de máxima correlação.

Na estatística, a covariância é a medida da relação mútua entre duas variáveis aleatórias distintas, enquanto que na geoestatística ela mede a relação entre valores da mesma variável, obtidos em pontos separados por uma distância h, conforme determinada direção (YAMAMOTO; LANDIM, 2015). A covariância de uma variável regionalizada para pontos separados por uma distância h pode ser calculada como:

$$C(h) = E\{[Z(x+h) - m][Z(x) - m]\} \quad \text{Equação 5}$$

onde h representa um vetor entre dois pontos  $x_1$  e  $x_2$  no espaço tridimensional.

O variograma é uma ferramenta geoestatística que caracteriza quantitativamente a autocorrelação espacial de um parâmetro mensurável distribuído em uma área ou um volume. Ele é usado em rotinas de interpolação espacial (HANKE; FISHER; POLLYEA, 2017).

Segundo Vieira, Carvalho e González (2010), o variograma é definido por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad \text{Equação 6}$$

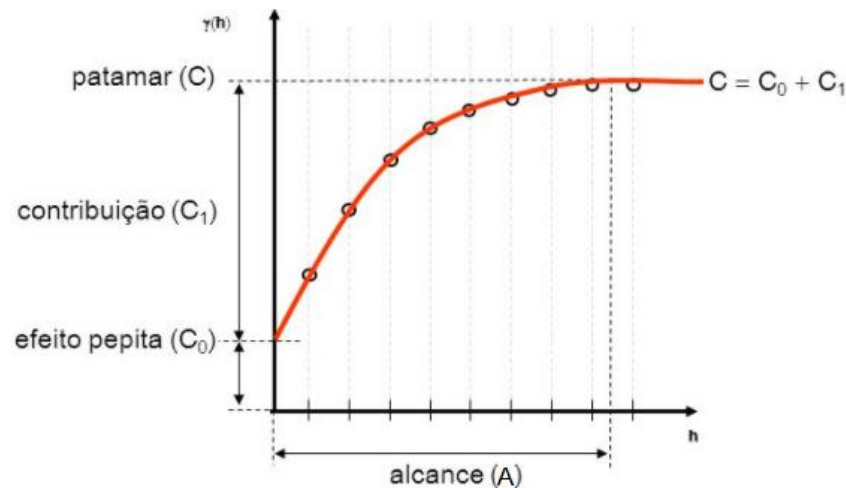
e pode ser estimado por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Equação 7}$$

onde  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . O gráfico de  $\gamma^*(h)$  em relação aos valores correspondentes de  $h$ , chamado de variograma, é a função de vetor  $h$  e, portanto, dependente da direção de  $h$ . Quando o variograma é o mesmo para todas as direções ele é denominado isotrópico.

A Figura 5 indica o comportamento de um gráfico do variograma próximo ao ideal, com a localização gráfica do alcance e do patamar.

Figura 5 - Propriedades do variograma com dependência espacial direta



Fonte: (AMARAL; MONTEIRO, 2017)

Idealmente, segundo Camargo (1998),  $\gamma(0)=0$ . Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende a 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ), que revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras.

Por isso temos na Figura 5 o gráfico começando em um valor que supera o valor zero, indicando o efeito pepita, desconsiderando um sistema ideal.

De acordo com Yamamoto e Landim (2015), a distância a qual o  $\gamma(h)$  atinge certo nível é denominada patamar e a variância dos dados é denominada alcance ou amplitude. O patamar é representado por  $C_0+C_1$  e o alcance por  $A$ . O efeito pepita  $C_0$  é causado pela variância aleatória e  $C_1$  é denominada variância espacial. Quando ocorre o chamado efeito pepita, o gráfico apresenta uma linha contínua de valor  $C_0$ , ou seja, com valor de alcance igual a zero.

De acordo com Camargo (1998), o variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de interpolação por krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço.

A modelagem de variáveis ambientais requer, na maioria das vezes, a estimativa de valores não amostrados, sendo necessário o emprego de métodos de interpolação. A krigagem é um método de interpolação que foi desenvolvido pelo engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige que, ao trabalhar com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância não seria suficiente para explicar o fenômeno em estudo (MIRANDA; PARANHOS FILHO; LASTORIA, 2015).

O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (CAMARGO, 1998). Para tanto, o avaliador de dependência espacial (ADE) tem como objetivo analisar o comportamento dos valores amostrados na área de estudo.

Dessa maneira segue o conceito da geoestatística, que considera tanto a localização no espaço amostrado quanto a dependência espacial apresentada pelos valores. O princípio da krigagem é estimar valores desconhecidos por meio da combinação de valores amostrados próximos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

### **2.6.2 Geoestatística Aplicada a Recursos Hídricos**

A Geoestatística tem sido utilizada para facilitar a avaliação dos recursos hídricos. Com seus métodos de análise, apresenta-se como importante ferramenta em diversos estudos. E cada vez mais, pesquisadores a aplicam como instrumento de análise de parâmetros em águas subterrâneas, como pode-se observar nos estudos a seguir.

Macedo et al. (2014), aplicou técnicas de geoestatística para elaborar mapas potenciométricos para gerenciamento de aquíferos, para tanto adotou diversos métodos de interpolação de dados. Os métodos de interpolação dos dados, foram vantajosos por fornecer melhor distribuição da superfície

calculada. Apesar da malha amostral ser pouco densa e irregular, pela interpolação foi possível gerar mapas que representassem com qualidade os dados reais. Para tanto, os pontos amostrais extremos foram adotados como limite da área a ser mapeada, a geração de mapa em áreas externas às amostras da extremidade gerou valores discrepantes.

Em outro caso, Lisbôa, Carvalho e Mendes (2016), usaram a geoestatística na avaliação de parâmetros hidrogeológicos para mapear a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. Foram tomados como base do estudo os dados de poços extraídos do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), referentes aos parâmetros de confinamento, de litologia e de nível estático para a cidade de Belém – PA. Foi concluído, que apesar de genérica, a metodologia aplicada forneceu bons resultados, podendo ser aplicada novamente em qualquer domínio espacial e hidrogeológico. Neste trabalho a ocorrência litológica apresentou relação direta com a formação do solo no local e para a distribuição espacial do parâmetro nível estático, foram considerados apenas os dados não outliers.

Em outro estudo, Miranda, Paranhos Filho e Lastoria (2015), realizaram análise estrutural para descrever a variabilidade espacial da piezometria, esses dados são importantes parâmetros de avaliação para a obtenção de melhorias no uso e aproveitamento dos recursos hídricos. Para estimar os valores não amostrados foi aplicada a krigagem. A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Rio Coxim no município São Gabriel do Oeste-MS.

Miranda, Paranhos Filho e Lastoria (2015), trabalharam com a importância da integração de SIGs com procedimentos geoestatísticos na interpolação de dados espacialmente distribuídos. O estudo mostrou a viabilidade da aplicação da krigagem na elaboração do modelo da piezometria. Ainda foi possível identificar que a área considerada necessita de práticas de conservação para garantir a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Estudos internacionais também adotam a geoestatística como importante ferramenta de análise. Em pesquisa realizada, Libera et al. (2017), mostraram que a abordagem espacial da geoestatística permite identificar a ocorrência de arsênio em águas subterrâneas. As correlações e as variáveis auxiliares, como ferro e amônio, foram utilizadas para realização de cokrigagem. A abordagem pode ser aplicada para obtenção da vista global da área de estudo, auxiliando decisões de gestão da água e do meio ambiente e melhorando o plano de caracterização necessário para encontrar as possíveis fontes de poluição no local.

Em estudo na região central de Bangladesh, Bodrud-Doza et al. (2017), avaliaram diversos parâmetros de qualidade para águas subterrâneas no local, a partir de 60 pontos de coleta em área igual a 2.072,72 km<sup>2</sup>. Foram encontradas informações básicas adequadas para parâmetros físico-químicos e as dependências especiais entre parâmetros. Foi possível fornecer dados ao planejamento de monitoramento da qualidade das águas do local.

Outro exemplo de aplicação é o estudo realizado por Niazi, Bentley e Hayashi (2017). Os autores desenvolveram mapas da distribuição espacial da recarga de aquíferos e da condutividade hidráulica para uma região rural de Alberta, no Canadá. Neste estudo, a concentração de cloreto e o fluxo de base foram utilizados para estimar a variabilidade ou recarga espacial. Os resultados encontrados atenderam a expectativa proposta e foi sugerido como estudo futuro a avaliação da configuração geologia e meteorológica, para complementar a análise desenvolvida.

Em outro caso, AlSuhaimi, AlMohaimidi e Momani (2017) estudaram quatorze parâmetros físico químicos que influenciassem na determinação da qualidade de águas subterrâneas. Os valores avaliados foram calculados pontualmente. Observou-se que menos de 10% das amostras excederam o valor da orientação em um ou mais parâmetros e como não existem fontes de poluição antropogênicas na área, a disparidade notada na área foi atribuída ao reflexo das atividades agrícolas. Para irrigação de todas culturas locais, o estudo revelou que as águas subterrâneas apresentam perfeito estado para uso. Porém, aconselhou-se a instalação de sistemas de pré-tratamento em alguns poços para consumo humano.

AlSuhaimi, AlMohaimidi e Momani (2017), destacam a necessidade de constante monitoramento dos parâmetros físico-químicos para que a qualidade das águas subterrâneas seja preservada e qualquer contaminação possa ser identificada o quanto antes.

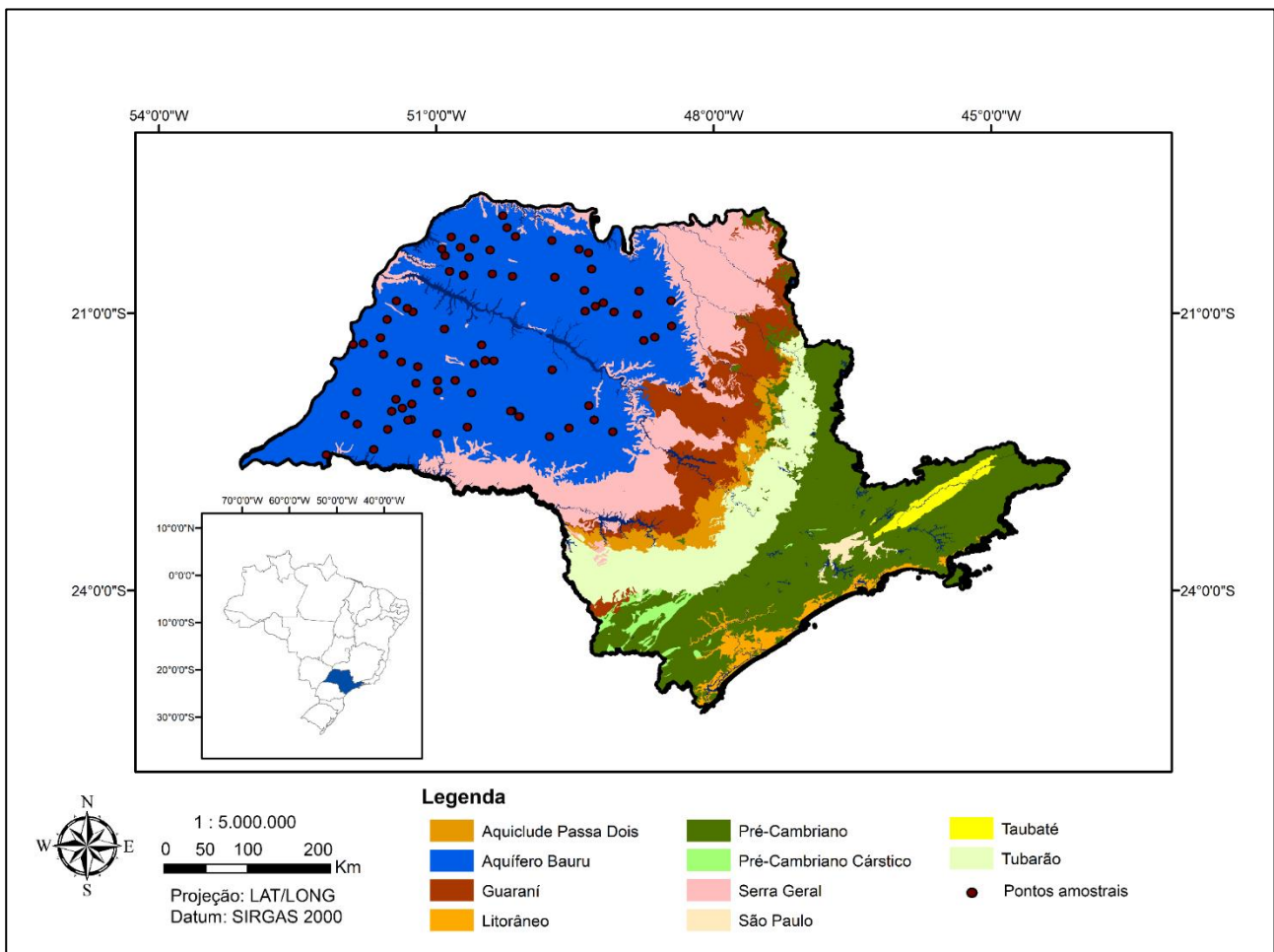
Os estudos existentes mostram a possibilidade de utilizar a geoestatística em dados de águas subterrâneas para diversas situações de análise. A aplicação do presente estudo tem como objetivo facilitar o processo de mapeamento de grandes áreas e auxiliar na proteção do meio ambiente, através da análise da variabilidade espaço-temporais dos parâmetros e da correlação entre os mesmos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido com base nos dados técnicos do relatório de qualidade das águas subterrâneas da CETESB (2013), responsável pelo monitoramento das águas do Sistema Aquífero Bauru (SAB) a partir de 75 pontos de coleta, distribuídos em 71 municípios do Estado de São Paulo. A Figura 6 mostra a localização dos pontos amostrados pela CETESB no Aquífero Bauru em sua porção no Estado de São Paulo.

Figura 6 - Localização do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo e seus 75 postos amostrais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No Estado de São Paulo, a área que abrange o SAB se estende por aproximadamente 100.000 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 40% do território estadual (BARISON; KIANG, 2004). Nesta porção, o



Aquífero Bauru encontra-se em um quadrante definido pelas coordenadas GMS 23° 06' 36" S e 23° 06' 36" O; 19° 46' 12" S e 47° 59' 24" O, compreendendo o oeste paulista.

O Aquífero Bauru abrange totalmente as Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (UGRHIs) 15 (Turvo/Grande), 18 (São José dos Dourados), 19 (Baixo Tietê), 20 (Aguapeí), 21 (Peixe) e 22 (Pontal do Paranapanema), área de predominância agropecuária, e parte das UGRHIs 9 (Mogi-Guaçu), 12 (Baixo Pardo/Grande), 13 (Tietê/Jacaré), 16 (Tietê/Batalha) e 17 (Médio Paranapanema), sendo as duas últimas agropecuária e as outras áreas em industrialização. Na Tabela 2 estão descritos os 75 pontos de coleta com suas características, utilizados pela CETESB no relatório de 2013 do Aquífero Bauru.

Tabela 2 - Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo (continua)

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGRHI 9							
Monte Alto	BA0072P	P1 – Sabesp	52 a 116	89	21° 12' 43"	48° 26' 41"	
UGRHI 12							
Bebedouro	BA0233P	Poço Jordânia – Distrito Industrial II	55 a 115	32	20° 56' 36"	48° 27' 00"	
UGRHI 13							
Bauru	BA0232P	P1 – DAEE – 212-0009 SESI	41 a 47	19	22° 19' 55"	49° 04' 39"	
UGRHI 15							
Américo Campos	BA0226P	Poço Cohab do Banespinha	*	59	20° 17' 47"	49° 43' 16"	
Cajobi	BA0023P	P1 – Sabesp	5 a 112	63	20° 50' 25"	48° 47' 32"	
Cândido Rodrigues	BA0024P	P4 – Sabesp	66 a 104	36	21° 19' 49"	48° 37' 30"	
Catiguá	BA0031P	P3 – Prefeitura	15 a 102	26	21° 03' 34"	49° 03' 44"	
Indiaporã	BA0051P	P1 – Tupinambá, Sabesp	37 a 87	30	20° 01' 31"	50° 14' 24"	
Macedônia	BA0065P	P3 – Sabesp	55 a 174	22	20° 09' 12"	50° 11' 47"	
Nova Granada	BA0078P	P1 – Mangaratu, Sabesp	20 a 79	0	20° 25' 47"	49° 19' 55"	

Tabela 2 - (continuação) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 15							
Ouro Verde	BA0264P	P2 - Sabesp	63 a 154	44	20° 36' 08"	49° 18' 00"	
Palestina	BA0265P	Poço do Recinto	*	*	20° 23' 33"	49° 25' 59"	
Palmares Paulista	BA0087P	P3 – Sabesp	55 a 112	44	21° 05' 09"	48° 48' 42"	
Pedranópolis	BA0095P	P1 – Sabesp	27 a 86	11	20° 14' 53"	50° 06' 29"	
São José do Rio Preto	BA0127P	P219 – Sede DAEE	28 a 68	22	20° 49' 43"	49° 22' 40"	
Uchoa	BA0147P	P2 DAEE/ Prefeitura	36 a 120	30	20° 57' 41"	49° 10' 30"	
UGHRI 16							
Avaí	BA0010P	P1 – Sabesp	20 a 52	28	22° 12' 16"	49° 16' 38"	
Fernando Prestes	BA0038P	P3 – Sabesp	31 a 81	26	21° 21' 52"	48° 44' 38"	
Ibirá	BA0246P	P1 – Vila Ventura, Sabesp	60 a 100	25	20° 59' 52"	49° 15' 34"	
Lins	BA0252P	P22 – Sabesp	34 a 141	29	21° 40' 08"	49° 43' 39"	
Potirendaba	BA0103P	P10 – Cooperativa, DAEE	44 a 115	26	21° 02' 58"	49° 22' 18"	

Tabela 2 - (continuação) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo

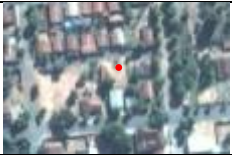

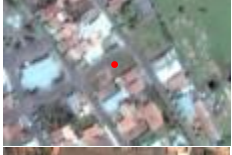

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 16							
Presidente Alves	BA0104 P	P1 – Sabesp	28 a 76	22	22° 03' 05"	49° 20' 03"	
UGHRI 17							
Gália	BA0041 P	P2 - Sabesp	132 a 195	13	22° 17' 20"	49° 20' 03"	
Rancharia	BA0108 P	Balneário, DAEE/ Prefeitura	28 a 93	22	22° 19' 45"	50° 58' 33"	
UGHRI 18							
Aparecida d'Oeste	BA0007 P	P3 – Sabesp	49 a 110	0	20° 26' 28"	50° 51' 31"	
Dirce Reis	BA0026 P	P2 – Sabesp	47 a 98	26	20° 27' 50"	50° 36' 22"	
Floreal	BA0039 P	P3 – Sabesp	37 a 107	12	20° 40' 14"	50° 08' 37"	
General Salgado	BA0219 P	PPS3 – Sabesp	72 a 152	55	20° 38' 35"	50° 21' 30"	
Guzolândia	BA0046 P	P3 – Sabesp	115 a 183	35	20° 39' 13"	50° 39' 47"	
Guzolândia	BA0293 P	P5 – Sabesp	40 a 174	34	20° 39' 04"	50° 39' 57"	
Jales	BA0059 P	P4 – Sabesp	36 a 142	19	20° 15' 54"	50° 32' 37"	

Tabela 2 - (continuação) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 18							
Monte Aprazível	BA0259 P	P1 – Sabesp	*	40	20° 41' 11"	49° 41' 39"	
Nova Canaã Paulista	BA0077 P	Sabesp P1 – Socimbra	53 a 89	19	20° 22' 05"	50° 53' 41"	
Santana da Ponte Pensa	BA0277 P	P5 – Sede Sabesp	54 a 126	11	20° 14' 31"	50° 47' 29"	
São Francisco	BA0291 P	P3 – Sabesp	66 a 142	37	20° 21' 21"	50° 41' 35"	
São João da Duas Pontes	BA0125 P	PPS1 – Sabesp	90 a 114	56	20° 23' 21"	50° 22' 48"	
UGHRI 19							
Andradina	BA0006 P	P26 – DAEE	54 a 102	26	20° 54' 48"	51° 23' 19"	
Bilac	BA0014 P	P7 – DAEE/ Prefeitura	26 a 122	22	21° 23' 47"	50° 28' 57"	
Guaraçai	BA0044 P	P9 – DAEE/ Prefeitura	56 a 166	52	21° 01' 55"	51° 12' 46"	
Muritinga do Sul	BA0076 P	P5 – DAEE/ Prefeitura	35 a 130	15	20° 59' 32"	51° 16' 19"	
Sud Mennucci	BA0141 P	P2 – Sabesp	67 a 152	37	20° 36' 28"	50° 48' 53"	

Tabela 2 - (continuação) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo


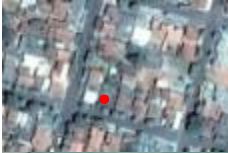

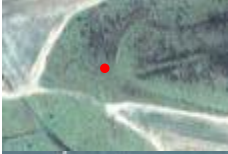




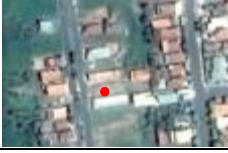

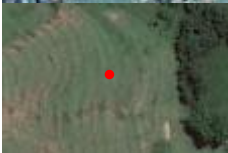
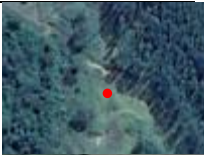

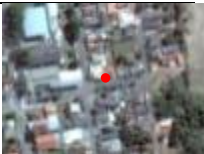



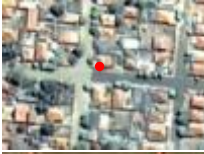

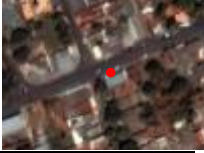
Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 20							
Clementina	BA0028 P	P4 – DAEE	22 a 84	33	21° 33' 39"	50° 26' 46"	
Dracena	BA0241 P	P1 – DAEE	110 a 206	59	21° 28' 37"	51° 32' 10"	
Monte Castelo	BA0073 P	DAEE	32 a 98	17	21° 28' 37"	51° 33' 54"	
Piacatu	BA0097 P	P4 – Sabesp	88 a 142	14	21° 28' 37"	50° 33' 47"	
Pompéia	BA0203 P	P1 – SAAE	52 a 233	134	21° 28' 37"	50° 09' 44"	
Pompéia	BA0211 P	SAEE, Poço Caixa d'Água	*	*	21° 28' 37"	50° 10' 40"	
Santa Mercedes	BA0123 P	Sabesp	82 a 153	23	21° 21' 22"	51° 44' 58"	
Tupã	BA0146 P	P1 – Sabesp	38 a 114	10	21° 54' 16"	50° 35' 47"	
Valparaíso	BA0149 P	P42 – DAEE	66 a 166	30	21° 13' 12"	50° 52' 40"	
UGHRI 21							
Alfredo Marcondes	BA0002 P	P3 – Sabesp	84 a 192	52	21° 57' 30"	51° 24' 42"	
Álvares Machado	BA0158 P	P10 – Sabesp	70 a 252	79	22° 05' 08"	51° 27' 36"	

Tabela 2 - (continuação) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 21							
Caiabu	BA0022 P	P2 – Sabesp	85 a 195	45	22° 00' 43"	51° 14' 24"	
Flórida Paulista	BA0040 P	P7 – Sabesp	81 a 195	14	21° 36' 58"	51° 10' 18"	
Indiana	BA0050 P	P4 – Prefeitura	*	44	22° 10' 32"	51° 15' 04"	
Inúbia Paulista	BA0052 P	P4 – Sabesp	70 a 204	42	21° 46' 07"	51° 57' 39"	
Irapuru	BA0054 P	P13 – Prefeitura	60 a 190	64	21° 33' 45"	51° 20' 52"	
Irapuru	BA0297 P	P1 – Prefeitura	114 a 194	*	21° 33' 51"	51° 21' 10"	
Lupércio	BA0253 P	P1 – Sabesp – Santa Terezinha	57 a 272	122	22° 22' 40"	49° 45' 41"	
Mariápolis	BA0066 P	P2 – Sabesp	94 a 220	35	21° 47' 29"	51° 11' 32"	
Oriente	BA0085 P	DAEE – Antonio Reis	51 a 244	144	22° 09' 47"	50° 04' 56"	
Oriente	BA0289 P	P13 – Sabesp	122 a 259	131	22° 09' 32"	50° 05' 16"	
Presidente Prudente	BA0191 P	P2 – Sabesp	95 a 191	87	22° 03' 15"	51° 20' 42"	

Tabela 2 - (conclusão) Pontos de Coleta no SAB para o Estado de São Paulo

Município	Ponto	Descrição	Profundidade de Captação (m)	NA (m)	Latitude (S)	Longitude (O)	Localização
UGHRI 21							
Quatá	BA0107P	Indústria Açucareira	35 a 108	30	22° 15' 53"	50° 38' 48"	
Sagres	BA0117P	P2 – Sabesp	33 a 132	39	21° 52' 32"	50° 57' 32"	
UGHRI 22							
Estrela do Norte	BA0037P	P2 – Sabesp	56 a 162	84	22° 29' 09"	51° 39' 38"	
Marabá Paulista	BA0255P	P4 – Sabesp	64 a 194	54	22° 06' 46"	51° 57' 53"	
Mirante do Paranapanema	BA0258P	P2 – Sabesp	53 a 152	29	22° 12' 51"	51° 50' 01"	
Pirapozinho	BA0100P	P6 – Sabesp	59 a 219	13	22° 16' 29"	51° 30' 24"	
Presidente Venceslau	BA0106P	DAEE/Prefeitura Reservatório Vila Sumaré	141 a 233	74	21° 52' 25"	51° 49' 53"	
Regente Feijó	BA0188P	P17 – Sabesp	85 a 269	90	22° 10' 55"	51° 17' 10"	
Teodoro Sampaio	BA0144P	P5 – Sabesp	78 a 150	70	22° 31' 56"	52° 10' 31"	

BA indica o Sistema Aquífero Bauru, seguido pelo número do ponto de monitoramento e de P para poço tubular; \* ausência de dados. Fonte de dados CETESB (2013); Fonte das imagens Google Earth (2014).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Dos poços avaliados, alguns tiveram suas águas analisadas em apenas um semestre de todo o período de estudo. Como é o caso do poço BA0046P e BA0085P, os quais apresentam valores apenas



para o primeiro semestre de 2010 e o BA0297P que apresentou valores unicamente em 02-12. Um ponto em comum entre eles é que todos estão localizados em municípios que contem outro poço, o qual teve seus parâmetros avaliados. Os municípios são respectivamente Guzolândia, Oriente e Irapuru.

### 3.2 PARÂMETROS ANALISADOS

Os parâmetros estudados foram: Alcalinidade Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) dado em mg/L, determinado por potenciometria com eletrodo combinado; Bário (Ba) em mg/L, espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES; Cálcio (Ca) dado em mg/L, espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES; Condutividade Elétrica ( $\sigma$ ) dada em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 21ª ou 22ª Edições do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; Dureza (Dur) dado em mg/L, espectrometria ótica de emissão de plasma com argônio ICP/OES; Magnésio (Mg) dado em mg/L, espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio ICP/OES; Nitrogênio Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) dado em mg/L, cromatografia iônica; Potássio (K) dado em mg/L, espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES; Potencial hidrogeniônico (pH) dado em pH, peagâmetro; Sódio (Na) dado em mg/L, espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES; Sólidos Totais Dissolvidos (STD) dado em mg/L, gravimetria; Temperatura (T) dada em °C, 22ª ou 22ª Edições do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Os dados utilizados referem-se às coletas semestrais, no período de chuva (março) e no período de seca (setembro), compreendendo os anos de 2010, 2011 e 2012, período mais recente disponível no início do presente estudo. Para realizar a identificação de cada parâmetro foi incluído, subscrito, junto ao nome do parâmetro os números 01 ou 02 para março (primeiro semestre) e setembro (segundo semestre), respectivamente, seguido do ano de coleta. Por exemplo,  $\text{Ca}_{01-12}$  refere-se ao dado de cálcio em março de 2012.

Para o relatório Cetesb 2013 não foram apresentadas análises de variáveis microbiológicas, como a quantidade de coliformes termotolerantes, como *Escherichia coli*, *Enterococos* ou *Giardia spp.* e *Cryptosporidium spp.* que são parasitas associados à veiculação hídrica. Além disso, os metais pesados avaliados foram apresentados, em sua maioria, com valores indicados em intervalos, não permitindo análise variográfica e conseqüentemente o mapeamento da área para os mesmos.

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS

Para cada parâmetro estudado foi efetuada a análise descritiva com o auxílio da estatística clássica, utilizando a planilha de cálculos do Microsoft Excel versão 2013, onde foram obtidas as

medidas estatísticas média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e posteriormente realizada análise da distribuição de frequência. Ainda foi estudada a hipótese da normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro e Wilk (1965).

Com planilhas do Excel, foi montada a matriz de correlação de Pearson, para efetuar as correlações simples de combinações, duas a duas, entre todos os parâmetros estudados. Além disso, foi feita a análise de regressão linear entre as variáveis de maior correlação, a fim de selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito.

Para os parâmetros que apresentaram correlações mais significativas estatisticamente, foi calculado a Análise do Principal Componente (PCA). Esta análise indica como um parâmetro está interferindo nos outros, positiva ou negativamente, a influência de um parâmetro sobre o outro. Além disso, a distribuição dos poços foi levantada para estes valores, mostrando os que tem comportamento próximo e os que diferem muito das amostras, possibilitando identificar poços com problemas como de contaminação por algum poluente.

Com base na disposição espacial dos pontos de coleta, indicados anteriormente (Figura 6), dispôs-se uma malha irregular de dados para a análise geoestatística, com base nos 75 pontos de coleta.

Assim, para cada parâmetro foi avaliada a dependência espacial pelo cálculo do variograma (Equação 4), partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca (GUIMARÃES, 2004), com o uso do pacote computacional Gamma Design Software GS+ 7.0 (ROBERTSON, 2004).

Os principais modelos que satisfazem as condições e melhor se adequam aos cálculos geoestatísticos são o esférico, o exponencial e o gaussiano. Nas equações que seguem,  $C_0$ ,  $C_1$  e  $A$  representam o efeito pepita, a variância estrutural e o alcance da dependência espacial, respectivamente (VIEIRA; CARVALHO; GONZÁLEZ, 2010).

Para o modelo esférico, simbolizado por esf, a equação é:

$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \frac{h}{A} - 0,5 \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right], 0 < h \leq A \quad \text{Equação 8}$$

e

$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1, h > A \quad \text{Equação 9}$$

O modelo exponencial, simbolizado por exp, a equação é:

$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{\left( \frac{-h}{A} \right)} \right], h \neq 0 \quad \text{Equação 10}$$

O modelo gaussiano, simbolizado por gau, a equação é:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{h}{A}\right)^2} \right\}, h \neq 0 \quad \text{Equação 11}$$

Sendo assim, foram usados estes três modelos para ajustes semivariográficos. A escolha dos ajustes, partiu da seleção inicial dos princípios de: 1) A menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); 2) O maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ), e 3) O maior avaliador da dependência espacial (ADE).

A análise do avaliador de dependência espacial (ADE) foi calculada com base nos pressupostos de Cambardella, Moorman e Novak (1994), modificado por Robertson (2004), conforme a equação seguinte:

$$ADE = [C/(C + C_0)] * 100 \quad \text{Equação 12}$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; C+Co é o patamar.

A interpretação proposta por Design (2005) para o ADE foi que quando: a)  $ADE < 20\%$  = dependência muito baixa; b)  $20 \leq ADE < 40\%$  = dependência baixa; c)  $40\% \leq ADE < 60\%$  = dependência média; d)  $60\% \leq ADE < 80\%$  = dependência alta; e)  $80\% \leq ADE < 100\%$  = dependência muito alta.

Para atestar a eficiência das estimativas por krigagem ordinária adotou-se como critério final de aceitação do ajuste variográfico, o maior coeficiente de correlação (r) entre valores observados e estimados da validação cruzada.

O processo de validação cruzada, que consiste na remoção de cada observação pertencente ao conjunto de dados com subsequente estimativa do seu valor por krigagem ordinária (interpolação), foi utilizado para a verificação da confiabilidade do modelo matemático ajustado. O modelo escolhido foi aquele que melhor estimou os valores observados, ou seja, aquele que produziu a equação de regressão linear entre os valores observados, em função dos valores estimados, mais próxima da bissetriz, intercepto igual a zero e coeficiente angular igual a um (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais podem ser utilizados na estimativa dos parâmetros estudados em locais não amostrados por meio de técnica de krigagem ordinária. Neste processo as estimativas são feitas pela seguinte equação:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad \text{Equação 13}$$

onde  $z^*$  é o valor a ser estimado no ponto não amostrado  $x_0$ ;  $N$  é o número de valores medidos  $z(x_i)$  envolvidos na estimativa e  $\lambda_i$  os pesos associados a cada valor medido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA QUALIDADE DA ÁGUA

A Tabela 3 apresentou os dados da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade em ordem alfabética. A primeira medida estatística analisada foi o coeficiente de variação (CV). Os parâmetros  $\text{HCO}_3^-$ , Ba, Ca,  $\sigma$ , Dur, Mg,  $\text{NO}_3^-$ , K, Na e STD apresentaram valores acima de 30%, ou seja, muito alto, indicando heterogeneidade da amostra. De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um parâmetro de qualidade pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), sendo baixo se  $\text{CV} \leq 10\%$ , médio se  $10\% < \text{CV} \leq 20\%$ , alto se  $20\% < \text{CV} \leq 30\%$ , e muito alto se  $\text{CV} > 30\%$ . Desta maneira, CV elevado indica heterogeneidade dos dados, e CV baixo, homogeneidade.

Quanto ao parâmetro pH, apresentou baixo CV durante um semestre ( $\text{pH}_{02-11} = 9,1\%$ ) e o restante do período avaliado, resultaram em valores de médio CV, valores entre 10,01 e 12,71. Para a T, o CV apresentou valores baixos, inferiores a 8,7% (Tabela 3). Os valores de pH e T indicaram homogeneidade. O CV do pH apresentou-se baixo, provavelmente, devido a magnitude dos valores deste parâmetro.

Tabela 3 - Estatística Descritiva dos Parâmetros da Qualidade das Águas do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo (continua)

Período <sup>a</sup>	Medidas Estatísticas Descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Prob. <sup>b</sup>	
			Mín.	Máx.			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Alcalinidade Bicarbonato										
$\text{HCO}_3^-_{01-10}$	85,42	82,00	3,00	237,00	46,781	54,76	0,863	0,724	-	IN
$\text{HCO}_3^-_{02-10}$	83,23	80,00	3,00	243,00	50,147	60,25	2,049	1,132	-	IN
$\text{HCO}_3^-_{01-11}$	80,16	76,50	6,00	231,00	45,986	57,37	1,843	0,968	-	IN
$\text{HCO}_3^-_{02-11}$	81,62	80,50	5,00	231,00	44,641	54,69	1,283	0,847	-	IN
$\text{HCO}_3^-_{01-12}$	85,21	84,00	4,00	268,00	47,147	55,33	3,508	1,285	-	IN
$\text{HCO}_3^-_{02-12}$	86,12	80,50	4,00	246,00	50,187	58,27	1,816	1,118	-	IN
Bário										
Ba <sub>01-10</sub>	0,187	0,15	0,010	0,648	0,141	75,30	1,145	1,199	-	IN
Ba <sub>02-10</sub>	0,201	0,17	0,010	0,681	0,158	78,78	1,567	1,393	-	IN
Ba <sub>01-11</sub>	0,183	0,16	0,010	0,703	0,138	75,68	2,770	1,573	-	IN
Ba <sub>02-11</sub>	0,181	0,14	0,010	0,654	0,139	77,49	2,123	1,476	-	IN
Ba <sub>01-12</sub>	0,172	0,14	0,050	0,786	0,150	87,29	5,264	2,104	-	IN
Ba <sub>02-12</sub>	0,228	0,18	0,050	0,972	0,193	84,64	3,148	1,712	-	IN

Tabela 3 - (continuação) Estatística Descritiva dos Parâmetros da Qualidade das Águas do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo

Período <sup>a</sup>	Medidas Estatísticas Descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Prob. <sup>b</sup>	
			Mín.	Máx.			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Cálcio										
Ca <sub>01-10</sub>	20,30	17,80	0,68	66,90	14,536	71,60	1,088	1,090	-	IN
Ca <sub>02-10</sub>	23,19	20,25	0,50	98,60	18,832	81,19	3,365	1,605	-	IN
Ca <sub>01-11</sub>	20,58	18,30	0,08	87,80	16,361	79,49	4,224	1,697	-	IN
Ca <sub>02-11</sub>	20,56	18,00	0,63	66,60	15,376	74,78	1,223	1,164	-	IN
Ca <sub>01-12</sub>	22,74	19,95	0,92	87,70	17,251	75,85	4,373	1,786	-	IN
Ca <sub>02-12</sub>	19,77	17,35	0,38	86,00	17,239	87,18	4,270	1,870	-	IN
Condutividade Elétrica										
σ <sub>01-10</sub>	199,82	184,00	30,00	476,00	86,271	43,17	1,342	0,756	-	IN
σ <sub>02-10</sub>	211,49	194,70	32,00	628,00	106,238	50,23	3,792	1,603	-	IN
σ <sub>01-11</sub>	209,81	198,20	30,00	539,00	96,487	45,99	2,269	1,108	-	IN
σ <sub>02-11</sub>	216,36	190,00	27,00	557,00	99,942	46,19	1,937	1,139	-	IN
σ <sub>01-12</sub>	212,19	201,50	33,00	560,00	96,663	45,55	2,861	1,200	-	IN
σ <sub>02-12</sub>	233,87	211,00	32,00	609,00	117,980	50,45	1,942	1,353	-	IN
Dureza										
Dur <sub>01-10</sub>	77,428	66,20	2,60	229	53,15	68,64	0,851	0,998	-	IN
Dur <sub>02-10</sub>	88,337	74,55	1,25	321	69,72	78,93	1,889	1,364	-	IN
Dur <sub>01-11</sub>	80,319	75,55	1,65	277	61,33	76,36	2,168	1,385	-	IN
Dur <sub>02-11</sub>	80,592	68,28	1,56	263	59,96	74,40	0,803	1,057	-	IN
Dur <sub>01-12</sub>	85,753	72,35	2,31	292	62,89	73,34	2,001	1,313	-	IN
Dur <sub>02-12</sub>	77,432	65,15	1,23	283	66,71	86,15	2,274	1,574	-	IN
Magnésio										
Mg <sub>01-10</sub>	5,68	4,96	0,01	20,90	4,317	76,02	2,706	1,419	-	IN
Mg <sub>02-10</sub>	6,69	5,46	0,05	24,10	5,695	85,18	2,185	1,504	-	IN
Mg <sub>01-11</sub>	5,72	5,08	0,05	22,40	4,693	81,98	2,833	1,468	-	IN
Mg <sub>02-11</sub>	6,25	5,43	0,05	23,60	4,872	77,90	2,142	1,377	-	IN
Mg <sub>01-12</sub>	6,60	6,26	0,05	22,10	4,749	71,97	1,340	1,156	-	IN
Mg <sub>02-12</sub>	5,52	4,66	0,05	21,10	4,655	84,31	2,735	1,587	-	IN
Nitrogênio Nitrato										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-10</sub>	3,42	1,95	0,10	19,00	3,868	113,15	3,018	1,676	-	IN
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-10</sub>	3,28	1,88	0,03	19,00	3,602	109,64	3,902	1,642	-	IN
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-11</sub>	3,05	2,10	0,05	18,00	3,310	108,57	5,048	1,869	-	IN
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-11</sub>	3,01	1,98	0,05	19,00	3,446	114,33	5,730	1,986	-	IN
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-12</sub>	3,02	2,12	0,03	19,00	3,284	108,63	6,957	2,151	-	IN
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-12</sub>	2,90	1,89	0,05	17,00	3,143	108,44	5,064	1,960	-	IN
Potássio										
K <sub>01-10</sub>	4,22	4,28	0,10	8,97	2,063	48,91	-0,203	0,039	-	IN
K <sub>02-10</sub>	3,99	3,90	0,10	10,50	2,638	66,06	-0,423	0,418	-	IN
K <sub>01-11</sub>	3,56	3,37	0,10	9,29	2,359	66,20	-0,340	0,364	-	IN
K <sub>02-11</sub>	4,56	4,30	0,10	10,20	2,469	54,11	-0,283	0,336	-	IN
K <sub>01-12</sub>	4,47	4,13	0,10	10,90	2,407	53,81	-0,067	0,458	-	IN
K <sub>02-12</sub>	4,35	4,38	0,09	10,20	2,246	51,54	-0,253	0,170	-	IN

Tabela 3 - (conclusão) Estatística Descritiva dos Parâmetros da Qualidade das Águas do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo

Período <sup>a</sup>	Medidas Estatísticas Descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Prob. <sup>b</sup>	
			Mín.	Máx.			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Potencial Hidrogeniônico										
pH <sub>01-10</sub>	6,69	6,60	5,00	9,40	0,850	12,71	0,608	0,835	-	IN
pH <sub>02-10</sub>	6,75	7,00	5,00	9,00	0,676	10,01	1,901	0,108	-	IN
pH <sub>01-11</sub>	6,84	7,00	5,00	9,10	0,766	11,20	1,245	0,101	-	IN
pH <sub>02-11</sub>	6,96	7,00	5,90	9,20	0,632	9,07	2,638	0,803	-	IN
pH <sub>01-12</sub>	7,23	7,00	5,60	9,10	0,740	10,24	0,718	0,717	-	IN
pH <sub>02-12</sub>	6,88	7,00	5,00	9,20	0,728	10,57	0,919	0,162	-	IN
Sódio										
Na <sub>01-10</sub>	13,45	8,12	0,10	60,50	13,738	102,13	3,404	1,952	-	IN
Na <sub>02-10</sub>	14,94	9,16	0,10	67,50	14,965	100,13	3,219	1,821	-	IN
Na <sub>01-11</sub>	13,43	8,40	0,10	63,54	14,293	106,44	3,189	1,918	-	IN
Na <sub>02-11</sub>	16,56	11,60	0,77	53,20	13,133	79,30	1,246	1,407	-	IN
Na <sub>01-12</sub>	16,69	11,00	0,49	70,90	16,488	98,75	3,205	1,937	-	IN
Na <sub>02-12</sub>	13,93	8,55	0,54	73,40	13,431	96,41	4,944	2,036	-	IN
Sólidos Totais Dissolvidos										
STD <sub>01-10</sub>	153,66	150,00	32,00	390,00	60,444	39,34	3,041	1,347	-	IN
STD <sub>02-10</sub>	165,29	148,00	52,00	438,00	70,095	42,41	3,009	1,419	-	IN
STD <sub>01-11</sub>	162,64	153,00	52,00	433,00	67,464	41,48	3,349	1,354	-	IN
STD <sub>02-11</sub>	153,01	139,00	51,00	390,00	59,506	38,89	3,264	1,401	-	IN
STD <sub>01-12</sub>	171,60	165,00	40,00	504,00	67,361	39,26	7,830	1,860	-	IN
STD <sub>02-12</sub>	150,74	140,00	34,00	440,00	75,571	50,13	2,866	1,420	-	IN
Temperatura										
T <sub>01-10</sub>	25,60	25,00	22,00	31,00	1,593	6,22	1,375	0,742	-	IN
T <sub>02-10</sub>	24,19	24,35	18,00	29,60	1,872	7,74	2,258	-0,327	-	IN
T <sub>01-11</sub>	25,09	25,00	22,00	29,00	1,584	6,32	0,217	-0,155	-	IN
T <sub>02-11</sub>	25,10	25,00	22,00	29,40	1,725	6,87	-0,167	0,163	0,1524	NO
T <sub>01-12</sub>	25,49	25,55	21,00	30,00	1,484	5,82	1,559	0,177	-	IN
T <sub>02-12</sub>	24,56	25,00	18,00	32,50	2,135	8,69	4,845	-0,574	-	IN

<sup>(a)</sup> 01 e 02 indicam, respectivamente, o primeiro e o segundo semestre, seguidos dos seguintes anos: 2010, 2011 e 2012; <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN, LN e IN respectivamente do tipo normal, tendendo à normal, lognormal, tendendo à lognormal e indefinido. As abreviações Mín., Máx. e Prob. correspondem, respectivamente a mínimo, máximo e probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No presente estudo, a variável probabilidade foi avaliada segundo Shapiro e Wilk (1965). Quando a variável estatística apresenta distribuição normal, a medida mais apropriada para representá-la é dada pela média. Porém, quando isto não ocorre, o valor adequado para representar seu comportamento é dado pela mediana.

Para  $\text{HCO}_3^-$  (Tabela 3), indicativo da capacidade da água em neutralizar ácidos, os valores de medianas ao longo dos 6 períodos avaliados foram 82,00 mg/L, 80,00 mg/L, 76,50 mg/L, 80,50 mg/L, 84,00 mg/L e 80,50 mg/L, em ordem cronológica. De acordo com Reginato, Ahlert e Schneider

(2013) estes valores não são prejudiciais para a qualidade da água, fazendo com que a água ainda se enquadre nos padrões de potabilidade.

Outra importante análise que pode ser feita a partir da Tabela 3, é referente ao comportamento de mínimo e máximo dos parâmetros. Avaliar se os valores seguem os critérios e as normas estabelecidas por órgãos que avaliam a qualidade da água, como o Valor Máximo Permitido (VMP) fornecido pela Portaria nº 2914.

Os valores de  $\text{HCO}_3^-$  variaram de 3 mg/L, em  $\text{HCO}_3^-_{01-10}$  e  $\text{HCO}_3^-_{02-10}$ , até 268 mg/L para  $\text{HCO}_3^-_{01-12}$ . A Portaria nº 2914 não oferece VMP para esse parâmetro, e sua quantidade permitida pode variar em função do uso da água. Segundo Farias, Farias e Neto (2016), o VMP da alcalinidade total em águas para consumo humano recomendado pela OMS (1999) é de 400 mg/L. Como a alcalinidade total é representada pela presença dos íons hidróxido, carbonato e bicarbonato não é possível afirmar que os valores máximos encontrados no presente estudo estão dentro do adequado para o consumo humano. Em estudo, Castro et al. (1992), encontraram valores de  $\text{HCO}_3^-$  para as águas do SAB no município de São José do Rio Preto/SP variando de 4,3 a 126 mg/L (Tabela 3).

O Ba teve valores de mediana de 0,14 mg/L ( $\text{Ba}_{02-11}$  e  $\text{Ba}_{01-12}$ ) a 0,18 mg/L ( $\text{Ba}_{02-12}$ ). Tais valores se encontram abaixo do VRQ para o SAB (CETESB, 2013) apresentados na Tabela 3, na grandeza de 0,25 mg/L. Já o valor mínimo de Ba foi 0,10 mg/L que ocorreu no ano de 2010 e 2011. O valor máximo, 0,972 mg/L em 02-12, é maior que o VMP estabelecido pela Portaria nº 2914/2011. Apesar dos valores máximos estarem elevados em relação ao estabelecido para consumo, isso ocorreu em função dos dados amostrados em um só poço, BA0211P localizado no município de Pompéia. Tal alteração não ocorreu no ponto amostrado próximo, localizado no mesmo município.

O Ca, indicado na Tabela 3, mostra a mediana variando de 17,35 mg/L ( $\text{Ca}_{02-12}$ ) a 20,25 mg/L ( $\text{Ca}_{02-10}$ ). De acordo com estudos de Kiang, Stradioto e Silva (2016), as águas subterrâneas do SAB no estado de São Paulo podem ser classificadas em dois tipos dominantes: bicarbonatadas cálcicas e cálcia-magnesianas, assim como os valores observado no presente estudo. De acordo com Duque e Almeida (1998), em seu estudo quanto a qualidade de água para consumo humano utilizando águas de aquífero, o Valor Máximo Recomendado (VMR) para Ca é de 100 mg/L. Os valores máximos amostrados de 2010 a 2012 não ultrapassaram o recomendado. O valor mais elevado foi de 98,60 mg/L em  $\text{Ca}_{02-10}$ .

Na Tabela 3, observa-se que a mediana dos valores amostrados de  $\sigma$  não é considerada elevada. Os valores médios apresentaram suave crescimento com o passar dos anos 2010 a 2012, o que pode estar associado a um aumento na concentração de íons, que também pode indicar possível aumento de poluição. Alguns pontos de coleta amostral, apresentaram médias trienais mais elevadas que os demais, foram os casos de BA0293P (482,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), BA0006P (541,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), BA0149P (336,16  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), BA0203P (488,40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), BA0211P (466,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e BA0040P (438,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



Em estudo realizado por Matos e Pacheco (2002), para avaliar possível contaminação de águas subterrâneas em um cemitério, foi observado que  $\sigma$  apresentou seus valores mais elevados nas regiões mais próximas à superfície (atingindo até 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) em comparação com águas mais profundas (não superando 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Podendo indicar que aquíferos quanto mais superficiais, mais suscetíveis à contaminação.

Os valores de  $\sigma$  encontram-se dentro do indicado por WHO (1996). É proposto que os valores de  $\sigma$  estejam entre 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para indicarem águas doces, possivelmente livres de poluição. Em estudo, Silva (2009), encontrou valores de  $\sigma$  numa faixa de 27 a 393  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto no presente trabalho o valor mínimo encontrado foi de 27  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ( $\sigma_{02-11}$ ), e o máximo de 628  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ( $\sigma_{02-10}$ ).

A Dureza apresentou valores médios de 65,15 mg/L a 75,55 mg/L, podendo classificar, de forma generalizada, as águas do SAB em sua porção do Estado de São Paulo como águas moderadamente duras (MAZZINI, 2012). Enquanto o valor mínimo foi 1,23 mg/L ( $\text{Dur}_{02-12}$ ) o máximo atingiu 321 mg/L ( $\text{Dur}_{02-10}$ ) (Tabela 3). Todos valores estão no permitido para consumo pela Portaria nº 2914/11. A água deixa de ser indicada a consumo humano quando os valores de dureza superam 500 mg/L.

Os valores médios encontrados para Mg, com base nos valores amostrados, de acordo com o trabalho de Reginato, Ahlert e Schneider (2013), indicam alta solubilidade do Mg, pois os valores são baixos. Os valores de medianas variaram de 4,66 mg/L ( $\text{Mg}_{02-12}$ ) a 6,26 mg/L ( $\text{Mg}_{01-12}$ ). O Mg, assim como o Ca, está diretamente relacionado com a dureza da água. Por isso, de acordo com Hassuda (1989), a OMS determina como sendo o VMP, para Mg, 150 mg/L. Sendo assim, esse parâmetro se encontra dentro do valor permitido para consumo humano, pois o valor máximo amostrado foi de 24,10 mg/L ( $\text{Mg}_{02-10}$ ). No trabalho de Duque e Almeida (1998), o Valor Máximo Admissível (VMA) para Mg foi de 50 mg/L, ainda mantendo os valores encontrados dentro dos padrões (Tabela 3).

Na Tabela 3, os valores médios de  $\text{NO}_3^-$  variaram de 1,88 mg/L ( $\text{NO}_3^-_{02-10}$ ) a 2,12 mg/L ( $\text{NO}_3^-_{01-12}$ ). Pode-se observar que os valores dos períodos de cheia são ligeiramente superiores aos valores de períodos de seca nos três anos, o que pode estar associado ao maior carreamento de substâncias da superfície terrestre, contaminando a água que será percolada até o aquífero. Silva (2009), cita  $\text{NO}_3^-$  como principal contaminante das águas do SAB no município de Bauru, e ressalva que, por essa razão, o Departamento de Águas e Esgoto do município (DAE-Bauru) tem incluído o cadastramento de poços particulares, a solicitação de regularização e as análises químicas das águas, o mapeamento de zonas críticas e a solicitação de outorga de tamponamento de acordo com normas técnicas sanitárias.

Para o município de Bauru, a partir de 26 amostras analisadas, 69,23% indicaram resultado preocupantes quanto à qualidade das águas subterrâneas por presença de  $\text{NO}_3^-$ , sendo 19,23% com concentrações acima do permitido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde ( $<10\text{mg/L}$ ) (GIAFFERIS; OLIVEIRA, 2006). Neste trabalho citado, o valor mais elevado de nitrato foi de  $26\text{mg/L}$  e também foi verificado que os maiores valores ocorreram em áreas onde as redes de esgoto sanitário eram mais antigas e susceptíveis à ruptura.

Ainda referente ao parâmetro de qualidade  $\text{NO}_3^-$ , valores acima de  $10\text{ mg/L}$  são tóxicos para consumo humano (Portaria nº 291). Sendo assim, apesar dos valores médios encontrarem-se dentro do padrão permitido, alguns pontos apresentaram valores críticos ( $>10\text{ mg/L}$ ) no 1º semestre de 2010, como é o caso de: BA0232P ( $12\text{ mg/L}$ ); BA0059P ( $11,3\text{ mg/L}$ ); BA0006P ( $19\text{ mg/L}$ ); BA0090P ( $12\text{ mg/L}$ ); BA0149P ( $12\text{ mg/L}$ ); e BA0053P ( $11\text{ mg/L}$ ) (Tabela 3). Outro problema identificado é que o poço BA0006P, localizado na área urbana do município de Andradina apresenta valores elevados de  $\text{NO}_3^-$  em todos os períodos analisados, numa média trienal de  $19\text{ mg/L}$ . O  $\text{NO}_3^-$  está relacionado à decomposição, portanto, os pontos que apresentam valores mais elevados para  $\text{NO}_3^-$  podem apresentar uma maior taxa de matéria orgânica em decomposição, o que pode ser resultado de interferências antrópica.

O Potássio teve valores médios variando de  $3,37\text{ mg/L}$  a  $4,38\text{ mg/L}$  (Tabela 3), valores estes próximos do VRQ de  $4,5\text{ mg/L}$  para o Aquífero Bauru (CETESB, 2013). O potássio pode ser encontrado em águas subterrâneas em maiores quantidades em períodos de seca em comparação à períodos de cheia (FALEIRO; ANDRADE, 2007). Com os dados analisados confirmamos este comportamento para os valores médios dos anos 2011 e 2012. A Portaria nº 2914 não estabelece um VMP para o K, e os valores desse parâmetro vão de  $0,10\text{ mg/L}$  a  $10,90\text{ mg/L}$  ( $\text{K}_{02-11}$ ). De acordo com Faleiro e Andrade (2007) o potássio é usado com frequência em grandes culturas como soja e milho, e por isso pode ser encontrado em águas subterrâneas não tão profundas, com no SAB. Águas naturais tem níveis de potássio a cerca de  $10\text{ mg/L}$ .

Em estudo feito por Giafferis e Oliveira (2006), com águas subterrâneas de 26 poços do município de Bauru, os valores encontrados para pH estavam entre 5,2 e 7,32, demonstrando serem águas provenientes do SAB devido às características regionais. De acordo com Kiang, Stradioto e Silva (2016) a mediana de pH das amostras de água das unidades aquíferas do SAB são, aproximadamente, 6,92. Os valores médios (mediana) de pH no SAB são indicativos de neutralidade da água, com exceção de  $\text{pH}_{01-10}$ , onde encontrou-se uma média tendendo a águas levemente ácidas (6,60). Sendo assim, os valores médios encontram-se dentro dos valores permitidos para consumo.

As águas podem ser corrosivas quando o pH é baixo, e quando demasiadamente altos podem provocar incrustações. A Portaria nº 2914 estabelece que o intervalo permitido do pH para consumo humano é de 6,0 a 9,5. Ou seja, apesar dos valores médios estarem dentro do permitido, os valores de

mínimo estão abaixo do permitido (Tabela 3), significando águas ácidas. Isto ocorre em decorrência de alguns valores amostrados apresentarem valor igual ou ligeiramente superior a 5. Estes pontos foram: BA0095P ( $\text{pH}_{02-10} = 5,0$ ); BA0127P ( $\text{pH}_{01-10} = 5,0$ ); BA0104P ( $\text{pH}_{02-12} = 5,5$ ); BA0246P ( $\text{pH}_{01-11} = 5,0$ ); BA0014P ( $\text{pH}_{01-11} = 5,5$ ), e BA0076P ( $\text{pH}_{02-12} = 5,0$ ). Além dos casos esporádicos, o ponto de coleta BA0010P, localizado em Avaí, chamou atenção por apresentar valores de pH entre 5,4 e 5,9 para todo o triênio estudado, dando um média igual a 5,6, pH ácido.

Como apresentado na Tabela 3, os valores médios variaram de 8,12 mg/L a 11,60 mg/L para o Na. Tais valores encontram-se abaixo do apresentado pela CETESB como referência, 15 mg/L. Esta ordem de grandeza não indica problemas à saúde humana ou animal. O VMP pela Portaria nº 2914/2011 é de 200 mg de Na por litro, nos dados amostrados tivemos valores de 0,10 mg/L até 73,40 mg/L ( $\text{Na}_{02-12}$ ). Sendo assim, os valores analisados estão bem abaixo da faixa não indicada para consumo humano.

O parâmetro STD no estudo de Reginato, Ahlert e Schneider (2013), não ultrapassou o valor de 210 mg/L. No presente estudo a média dos STD variou de 139 mg/L ( $\text{STD}_{02-11}$ ) a 165 mg/L ( $\text{STD}_{01-12}$ ), sendo que o VRQ do SAB é de 200 mg/L (CETESB; 2013), nota-se a proximidade dos resultados, por se tratar do mesmo aquífero e também, mesmo período de estudo.

De acordo com a Portaria nº 518/2014, os STD devem estar em uma concentração de no máximo 1.000 mg/L, ou seja, os valores amostrados encontram-se dentro do permitido para o consumo humano, sendo o valor mínimo encontrado 32 mg/L e o máximo de 504 mg/L (Tabela 3). Os pontos amostrados que apresentaram os maiores valores foram BA0293P (294,33 mg/L), BA0006P (432,50 mg/L), BA0149P (271,33 mg/L), BA0203P (293,50 mg/L), BA0211P (302,66 mg/L) e BA0040P (293,33 mg/L). Evidenciando possível correlação de  $\sigma$  e STD, pois os pontos de coleta com maiores valores amostrados são os mesmos para ambos parâmetros. Quanto mais partículas existem dissolvidas da água maior a condutividade elétrica. Barcha (1998), encontrou valores variando de 214 a 449 mg/L, no Aquífero Bauru para o município de Rio Preto/SP.

A T da água pode estar diretamente relacionada com a profundidade da medição. Reginato, Ahlert e Schneider (2013), encontraram valores médios de 29 °C. Também podem ocorrer significativas variações de T em águas subterrâneas, como é o caso descrito por Barcha (1998), que ao analisar o Aquífero Botucatu registrou T de 22 a 58,7 °C. Porém no presente estudo, a T apresentou valores médios de 25°C, sem significativas variações (Tabela 3). Estes valores se encontram próximos do observado como VRQ pela CETESB (2013) para o SAB, 26 °C. Além disso, a T não apresentou considerável variação, estando em torno de 25 °C (Tabela 3), com valor mínimo de 18 °C ( $T_{02-10}$  e  $T_{02-12}$ ) e máximo de 32,5 °C ( $T_{02-12}$ ).

## 4.2 ANÁLISE DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO

A matriz de correlação de Pearson foi usada para avaliar o padrão de coerência entre as amostras dos parâmetros físico-químicos da água. Inicialmente foram realizadas matrizes para cada semestre, totalizando 6 matrizes de correlação. Por fim foi avaliada uma matriz geral que abrangesse todos os dados do período estudado. Tendo em vista que os valores observados mantiveram o mesmo comportamento tanto nas matrizes por semestre quanto na matriz trienal, e sendo a quantidade de dados mais consistente ao considerar todos os dados de 2010 a 2012, foi adotada a matriz de correlação do triênio como base para a avaliação (Tabela 4).

Os parâmetros que apresentaram coeficientes de correlação relevantes foram aqueles dentro do esperado: STD e  $\sigma$ . Estes parâmetros tem em geral resultado elevado quando outros se apresentam em maior quantidade, como, por exemplo, STD é resultado de toda matéria que se encontra na água, e a  $\sigma$  se altera com a variação de cátions e ânions presentes na água. Como podemos observar na Tabela 4, a correlação do cálcio com  $\sigma$  e STD.

Além desses parâmetros, Ca, Mg e Dureza indicaram considerável correlação entre si. Sendo o cálcio e o magnésio as duas partes que compõe a dureza, podemos observar na Tabela 4 que a correlação entre tais parâmetros é significativa ao nível de 1% de probabilidade: Ca x Mg ( $r = 0,80$ ); Ca x Dur ( $r = 0,91$ ); Mg x Dur ( $r = 0,84$ )

Tabela 4 - Matriz de Correlação Entre Parâmetros da Qualidade das Águas do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo

Parâmetros	Coeficiente de correlação <sup>a</sup>											
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ba	Ca	$\sigma$	Dur.	Mg	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K	pH	Na	STD	T
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,00											
Ba	0,31*	1,00										
Ca	0,81**	0,47**	1,00									
$\sigma$	0,82**	0,41**	0,79**	1,00								
Dur.	0,74**	0,51**	0,91**	0,75**	1,00							
Mg	0,74**	0,52**	0,80**	0,69**	0,84**	1,00						
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,07	0,43**	0,34**	0,33**	0,39**	0,31*	1,00					
K	-0,16	0,51**	0,22	0,01	0,29*	0,28*	0,59**	1,00				
pH	0,37**	-0,06	0,12	0,31*	0,10	0,14	-0,23	-0,32**	1,00			
Na	0,03	-0,37**	-0,31*	0,15	-0,33**	-0,32**	-0,25*	-0,63**	0,36**	1,00		
STD	0,70**	0,41**	0,77**	0,88**	0,75**	0,70**	0,49**	0,15	0,23	0,05	1,00	
T	-0,07	-0,01	-0,04	0,11	-0,04	-0,04	-0,01	0,03	-0,05	-0,06	-0,06	1,00

<sup>a</sup>\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\*=significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t de Student.

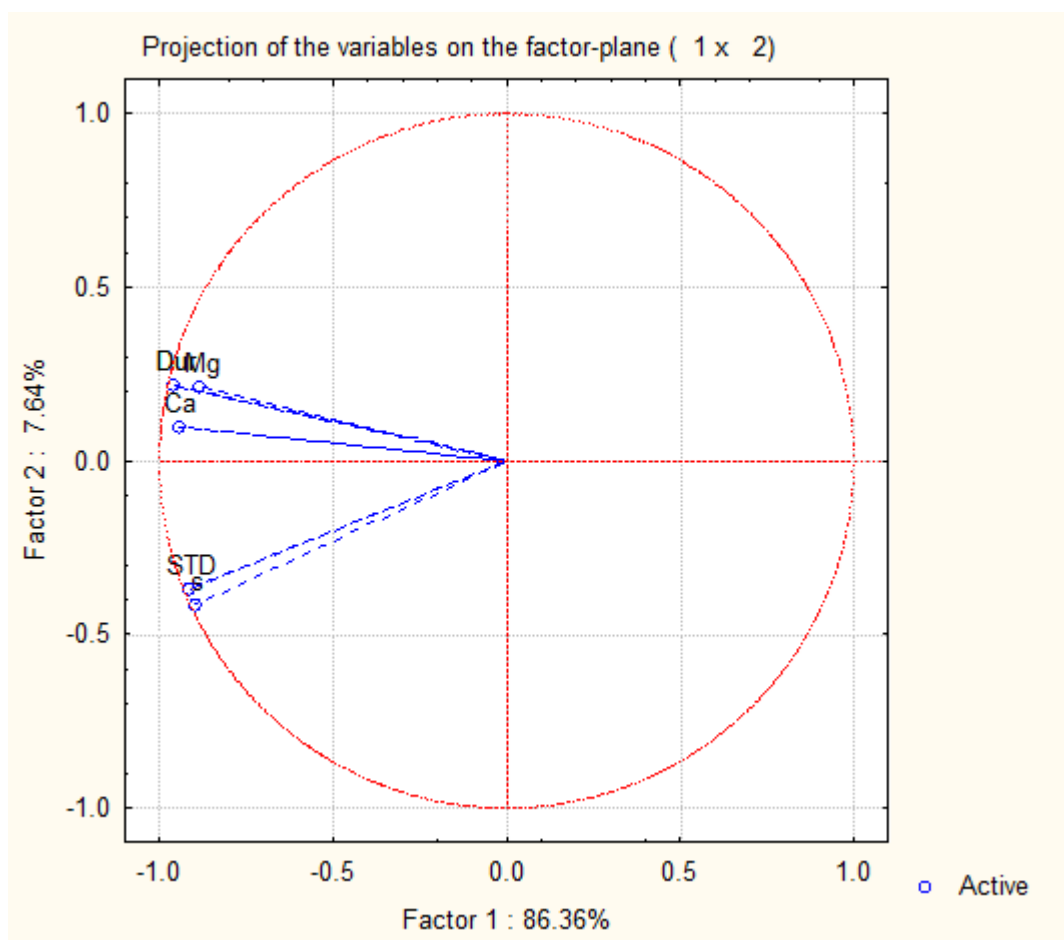
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com Silva (2009) que trabalhou com água subterrânea coletada do SAB, é possível verificar forte correlação entre  $\text{NO}_3^-$ , Mg e Ca com Mg e  $\text{HCO}_3^-$ . Em seu trabalho, citou que Ogawa e Campos (1982) identificaram, para as águas do SAB, correlação entre  $\text{HCO}_3^-$ , Ca e Mg, no Estado de São Paulo. Na Tabela 4 temos  $\text{HCO}_3^-$  vs Mg ( $r = 0,74$ ) e  $\text{HCO}_3^-$  vs Ca ( $r = 0,81$ ).

Em correlações semelhantes para o SAB, Giafferis e Oliveira (2006) concluíram que as maiores concentrações de nitrato ocorrem associadas aos íons cloreto, magnésio e sódio, a maiores valores de condutividade elétrica. Também, Silva e Chang (2010), encontraram relações entre  $\text{HCO}_3^-$  vs Ca ( $r=0,85$ ),  $\text{HCO}_3^-$  vs Mg ( $r=0,57$ ) e Ca vs Mg ( $r=0,89$ ). Além disso, a maior vulnerabilidade do SAB foi relacionada à sua maior proximidade com a fonte primária dos contaminantes, como as antigas tubulações de esgoto do município.

A Análise de Componente Principal (PCA) objetiva maximizar as ocorrências da variância total. Para os parâmetros do estudo, foi realizada PCA considerando apenas aqueles que apresentaram considerável correlação na Tabela 4, que foram STD,  $\sigma$ , Ca, Mg, Dur. O gráfico obtido segue indicado na Figura 7.

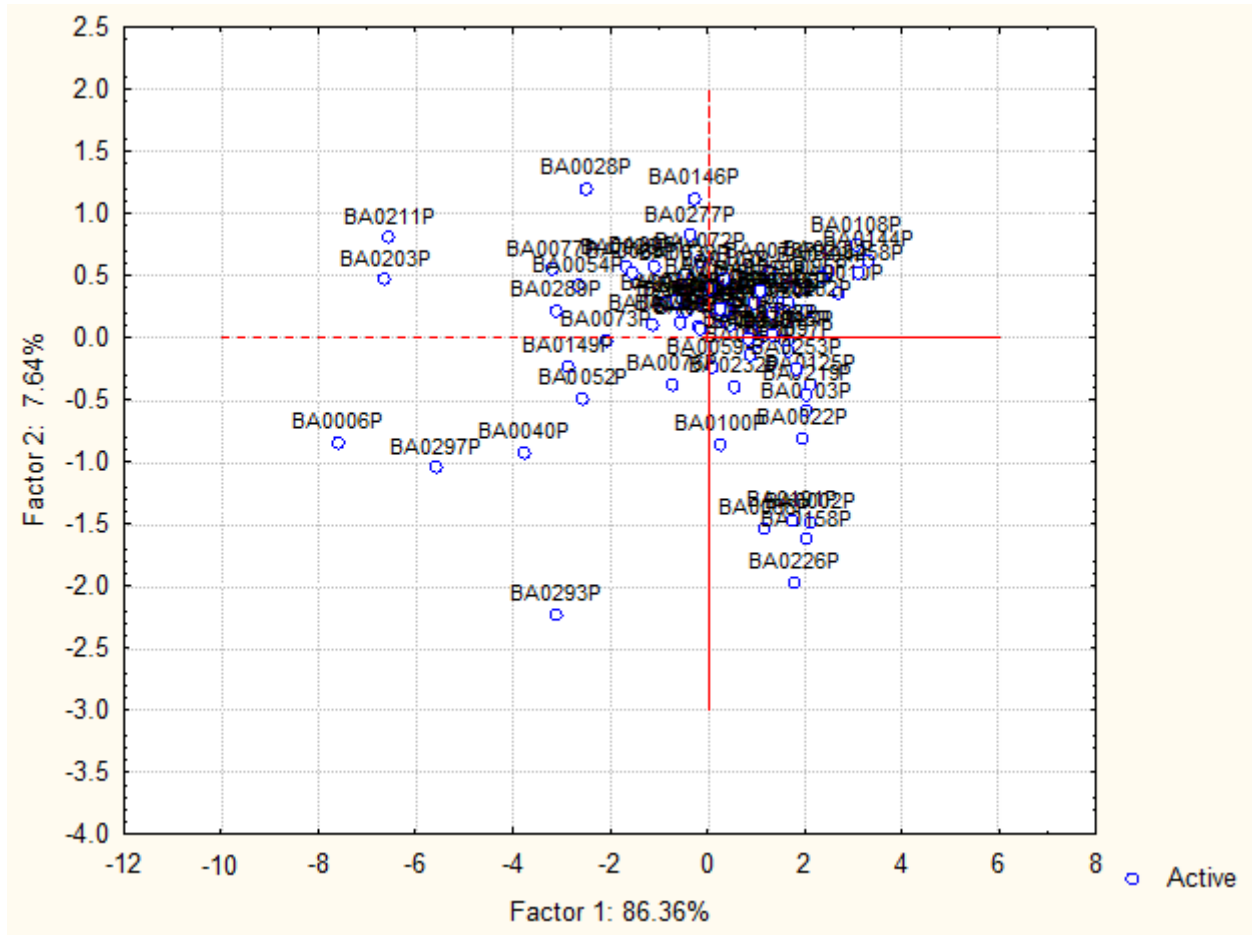
Figura 7 - Gráfico do primeiro e segundo PCA dos parâmetros de qualidade com consideráveis correlações no SAB



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A estrutura multivariada dos dados indicou que a maior parte dos poços ficaram aglutinados devido à proximidade de ocorrência dos valores. O primeiro componente principal explicou 86,36% da variação total, o que evidencia a correlação anteriormente ressaltada na matriz de Pearson. A Figura 8 mostra a dispersão dos poços quanto a concentração dos parâmetros considerados.

Figura 8 - Dispersão gráfica dos valores de PCA dos parâmetros com considerável correlação do SAB



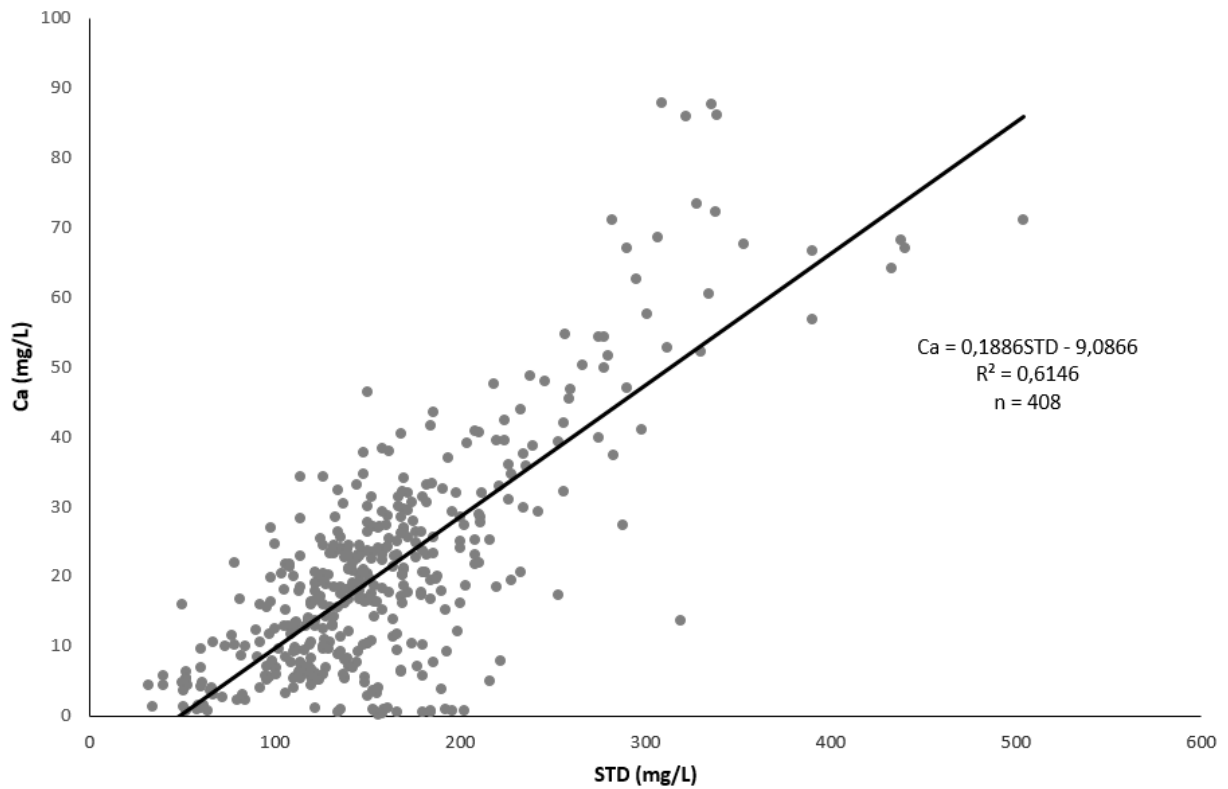
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os poços BA0211P, BA0203P, BA0028P foram influenciados por Mg, Du e Ca, principalmente, pois estão deslocadas para o segundo quadrante do gráfico. Já os poços BA0006P, BA0297P, BA0040P foram influenciados por STD e  $\sigma$ , o primeiro poço não apresentou dados de coleta para todos os anos, em contrapartida o BA0006P e BA0040P apresentaram desde os dados de coleta, valores elevados de STD e  $\sigma$  em comparação com os demais coletados.

Diante das correlações observadas (Tabela 4), foi realizada a modelagem das melhores interações. Como o STD é um parâmetro de fácil determinação e apresentou elevada correlação com Ca e Mg, seguem apresentados os ajustes de regressão correspondentes. Assim, na Figura 9, a equação possibilita a determinação do Ca por meio dos dados de STD, uma vez que este pôde explicar 61% da variabilidade total de Ca. O mesmo ocorreu para Mg, a partir da Figura 10, com a equação que

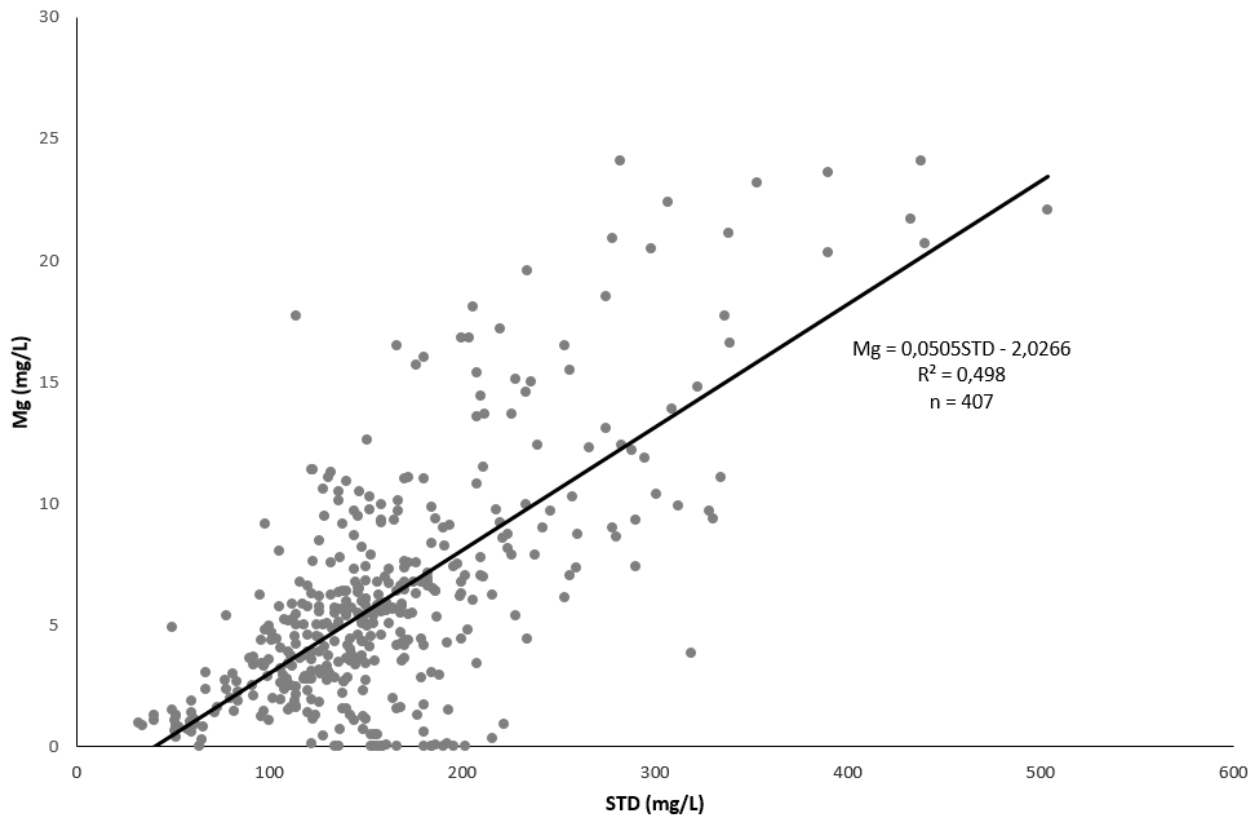
associa os parâmetros, podemos explicar Mg a partir dos STD com uma assertividade de aproximadamente 50%.

Figura 9 – Curva de regressão entre STD x Ca para área do SAB



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10 - Curva de regressão entre STD x Mg para área do SA

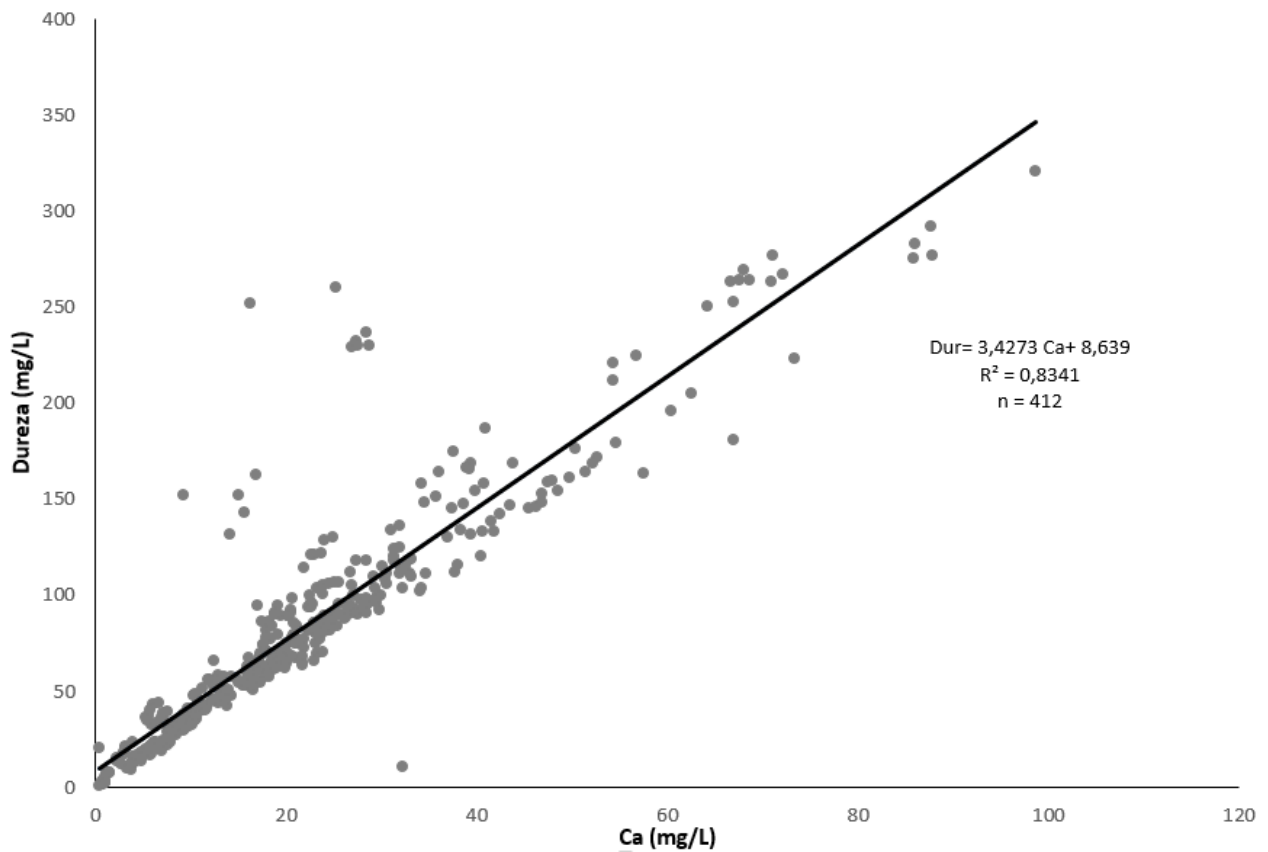


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Além das iterações anteriormente apresentada, a correlação da Dur com o Ca apresenta apreciável ajuste, indicando o equacionamento para determinar Dur a partir dos valores de Ca. O grau de confiabilidade é de aproximadamente 83% e foram utilizados 410 dados amostrais de cada parâmetro do período estudado (Figura 11).



Figura 11 - Curva de regressão Ca x Dur para área do SAB



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Na Tabela 5 estão apresentados os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais (Apêndices A a F). A partir da análise estatística convencional, quando há ocorrência de efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes nas amostras da área de estudo, podem ser realizadas as análises variográficas para o posterior krigagem.

Tabela 5 - Parâmetros dos variogramas simples ajustados para os parâmetros de qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Bauru (continua)

Parâmetros <sup>(a)</sup>	Modelo <sup>(b)</sup>	Parâmetros do Ajuste						Validação Cruzada			
		C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	A (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>	Validação Cruzada			
							%	a	B	R	
<b>Alcalinidade Bicarbonato</b>											
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-10</sub>	gau <sup>17</sup>	8,930.10 <sup>3</sup>	2,223.10 <sup>3</sup>	64.259	0,656	9,674.10 <sup>5</sup>	59,8	5,900	0,914	0,487	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-10</sub>	gau <sup>15</sup>	5,720.10 <sup>2</sup>	2,284.10 <sup>3</sup>	60.794	0,675	1,410.10 <sup>6</sup>	75,0	1,590	0,974	0,628	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-11</sub>	gau <sup>15</sup>	7,230.10 <sup>2</sup>	2,188.10 <sup>3</sup>	62.700	0,649	1,190.10 <sup>6</sup>	67,0	2,310	0,955	0,539	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-11</sub>	exp <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,170	7,282	114.900	0,689	1,210.10 <sup>1</sup>	83,9	6,000	0,961	0,554	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-12</sub>	exp <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	9,200.10 <sup>-1</sup>	7,852	138.600	0,744	1,390.10 <sup>1</sup>	88,3	4,800	0,972	0,656	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-12</sub>	exp <sup>17</sup>	4,840.10 <sup>2</sup>	2,905.10 <sup>3</sup>	141.300	0,727	1,779.10 <sup>6</sup>	83,3	10,170	0,863	0,531	
<b>Bário</b>											
Ba <sub>01-10</sub>	esf <sup>17</sup>	1,066.10 <sup>-2</sup>	2,462.10 <sup>-2</sup>	174.500	0,798	7,336.10 <sup>-5</sup>	56,7	0,010	0,910	0,501	
Ba <sub>02-10</sub>	exp <sup>14</sup>	5,770.10 <sup>-3</sup>	2,644.10 <sup>-2</sup>	222.600	0,826	8,839.10 <sup>-5</sup>	78,2	0,040	0,782	0,506	
Ba <sub>01-11</sub>	esf <sup>15</sup>	1,004.10 <sup>-3</sup>	2,468.10 <sup>-2</sup>	184.500	0,764	1,006.10 <sup>-4</sup>	59,3	0,020	0,874	0,483	
Ba <sub>02-11</sub>	esf <sup>9</sup> <sub>(TRQ)</sub>	7,610.10 <sup>-3</sup>	2,532.10 <sup>-2</sup>	72.100	0,661	1,367.10 <sup>-4</sup>	69,9	0,046	0,786	0,436	
Ba <sub>01-12</sub>	esf <sup>15</sup>	6,510.10 <sup>-3</sup>	3,342.10 <sup>-2</sup>	210.700	0,738	3,900.10 <sup>-4</sup>	80,5	0,000	0,962	0,632	
Ba <sub>02-12</sub>	esf <sup>16</sup>	1,240.10 <sup>-2</sup>	5,120.10 <sup>-2</sup>	195.900	0,809	5,509.10 <sup>-4</sup>	75,8	0,010	0,919	0,604	
<b>Cálcio</b>											
Ca <sub>01-10</sub>	esf <sup>17</sup>	3,710.10 <sup>1</sup>	2,147.10 <sup>2</sup>	64.000	0,629	1,185.10 <sup>4</sup>	82,7	2,850	0,838	0,517	
Ca <sub>02-10</sub>	exp <sup>15</sup>	8,400.10 <sup>1</sup>	4,592.10 <sup>2</sup>	154.500	0,736	4,096.10 <sup>4</sup>	81,7	2,400	0,878	0,520	
Ca <sub>01-11</sub>	esf <sup>15</sup>	1,680.10 <sup>1</sup>	2,619.10 <sup>2</sup>	66.200	0,628	2,443.10 <sup>4</sup>	93,6	1,650	0,876	0,641	
Ca <sub>02-11</sub>	esf <sup>10</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,620.10 <sup>1</sup>	2,915	51.800	0,647	2,490	94,4	2,04	0,929	0,622	
Ca <sub>01-12</sub>	gau <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,141	3,300	66.683	0,680	2,360	65,4	2,89	0,927	0,552	
Ca <sub>02-12</sub>	gau <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	9,920.10 <sup>-1</sup>	3,4224	63.912	0,635	4,010	71,0	2,38	0,947	0,594	
<b>Condutividade Elétrica</b>											
σ <sub>01-10</sub>	gau <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	3,600	8,210	53.000	0,509	1,930.10 <sup>1</sup>	56,2	19,800	0,905	0,411	
σ <sub>02-10</sub>	esf <sup>14</sup>	2,440.10 <sup>3</sup>	9,350.10 <sup>3</sup>	77.600	0,816	8,020.10 <sup>6</sup>	73,9	9,400	0,943	0,523	
σ <sub>01-11</sub>	esf <sup>14</sup>	9,700.10 <sup>2</sup>	7,862.10 <sup>3</sup>	65.600	0,661	1,620.10 <sup>7</sup>	87,7	23,300	0,865	0,544	
σ <sub>02-11</sub>	exp <sup>13</sup> <sub>(TRQ)</sub>	2,300	1,255	120.000	0,850	1,290.10 <sup>1</sup>	81,7	50,000	0,788	0,431	
σ <sub>01-12</sub>	esf <sup>13</sup>	1,780.10 <sup>3</sup>	7,902.10 <sup>3</sup>	70.900	0,584	1,890.10 <sup>7</sup>	77,5	3,590	0,959	0,582	
σ <sub>02-12</sub>	esf <sup>18</sup> <sub>(TRQ)</sub>	3,940	1,477.10 <sup>1</sup>	184.500	0,795	2,890.10 <sup>1</sup>	73,3	20,800	0,928	0,492	
<b>Dureza</b>											
Dur <sub>01-10</sub>	esf <sup>27</sup>	1,000	8,210	53.000	0,940	2,129.10 <sup>5</sup>	100,0	13,94	0,143	0,564	
Dur <sub>02-10</sub>	esf <sup>25</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,030	1,352.10 <sup>1</sup>	54.800	0,969	2,030	92,4	16,70	0,138	0,605	
Dur <sub>01-11</sub>	gau <sup>52</sup> <sub>(TRQ)</sub>	5,320	1,145.10 <sup>1</sup>	78.808	0,822	5,840	53,5	8,20	0,211	0,495	
Dur <sub>02-11</sub>	esf <sup>13</sup>	2,700.10 <sup>2</sup>	3,335.10 <sup>3</sup>	78.600	0,952	3,222.10 <sup>5</sup>	91,9	16,18	0,156	0,548	
Dur <sub>01-12</sub>	gau <sup>21</sup>	1,587.10 <sup>3</sup>	4,602.10 <sup>3</sup>	98.782	0,891	1,199.10 <sup>6</sup>	65,5	14,31	0,165	0,512	
Dur <sub>02-12</sub>	gau <sup>20</sup>	1,210.10 <sup>3</sup>	4,993.10 <sup>3</sup>	104.442	0,900	1,742.10 <sup>6</sup>	75,8	11,42	0,146	0,562	
<b>Magnésio</b>											
Mg <sub>01-10</sub>	exp <sup>15</sup>	7,060	1,751.10 <sup>1</sup>	170.400	0,680	4,720.10 <sup>1</sup>	59,7	1,190	0,782	0,402	
Mg <sub>02-10</sub>	exp <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,780.10 <sup>-1</sup>	1,377	113.100	0,719	4,430.10 <sup>-1</sup>	87,1	1,490	0,846	0,522	
Mg <sub>01-11</sub>	esf <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	4,600.10 <sup>-2</sup>	9,680.10 <sup>-1</sup>	57.500	0,593	3,830.10 <sup>-1</sup>	95,2	2,180	0,638	0,445	
Mg <sub>02-11</sub>	esf <sup>11</sup>	1,038.10 <sup>1</sup>	2,844.10 <sup>1</sup>	125.000	0,620	2,15.10 <sup>2</sup>	63,5	1,570	0,743	0,410	
Mg <sub>01-12</sub>	exp <sup>17</sup>	8,630	2,327.10 <sup>1</sup>	176.400	0,723	7,330.10 <sup>1</sup>	62,9	0,710	0,197	0,472	
Mg <sub>02-12</sub>	exp <sup>18</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,670.10 <sup>-1</sup>	1,070	126.900	0,710	2,680.10 <sup>-1</sup>	84,4	0,900	0,904	0,557	
<b>Nitrogênio Nitrato</b>											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-10</sub>	exp <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,870.10 <sup>-1</sup>	1,247	120.000	0,965	2,510.10 <sup>-2</sup>	85,0	0,950	0,889	0,404	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-10</sub>	exp <sup>15</sup>	1,270	1,722.10 <sup>1</sup>	126.300	0,924	1,300.10 <sup>1</sup>	92,6	0,050	0,972	0,554	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-11</sub>	esf <sup>13</sup>	1,810.10 <sup>-1</sup>	8,660.10 <sup>-1</sup>	10.100	0,949	2,590.10 <sup>-2</sup>	79,1	0,290	1,029	0,606	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-11</sub>	gau <sup>14</sup>	4,260	9,970	82.792	0,898	4,570	57,3	0,894	0,924	0,504	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>01-12</sub>	gau <sup>16</sup>	2,850	9,004	82.099	0,953	2,590.10 <sup>-1</sup>	68,3	0,924	0,955	0,615	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sub>02-12</sub>	exp <sup>16</sup>	1,220	8,135	84.300	0,844	4,510	85,0	0,480	0,810	0,417	
<b>Potássio</b>											
K <sub>01-10</sub>	gau <sup>17</sup>	1,640	5,049	71.014	0,775	3,600	67,5	0,580	0,855	0,607	
K <sub>02-10</sub>	gau <sup>17</sup>	2,470	7,637	62.353	0,712	1,100.10 <sup>1</sup>	67,7	0,280	0,916	0,623	
K <sub>01-11</sub>	gau <sup>15</sup>	1,850	6,006	64.259	0,586	1,420.10 <sup>1</sup>	69,2	0,220	0,923	0,627	
K <sub>02-11</sub>	esf <sup>10</sup>	7,700.10 <sup>-1</sup>	6,620	77.000	0,493	3,100.10 <sup>1</sup>	88,4	0,220	0,934	0,694	
K <sub>01-12</sub>	gau <sup>17</sup>	1,420	7,066	71.187	0,824	7,750	79,9	0,870	0,799	0,632	
K <sub>02-12</sub>	gau <sup>18</sup>	1,840	5,868	63.393	0,695	7,42	68,6	0,550	0,868	0,586	

Tabela 5 - (conclusão) Parâmetros dos variogramas simples ajustados para os parâmetros de qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Bauru

Parâmetros <sup>(a)</sup>	Modelo <sup>(b)</sup>	Parâmetros do Ajuste								
		C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	A (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>	Validação Cruzada		
							%	a	B	R
<b>Potencial Hidrogeniônico</b>										
pH <sub>01-10</sub>	gau <sup>14</sup>	1,220.10 <sup>1</sup>	5,010.10 <sup>1</sup>	51.441	0,829	2,690.10 <sup>-1</sup>	75,6	-0,150	1,022	0,675
pH <sub>02-10</sub>	gau <sup>15</sup>	1,300.10 <sup>-2</sup>	3,770.10 <sup>-1</sup>	44.513	0,717	4,300.10 <sup>-2</sup>	96,6	0,920	0,863	0,638
pH <sub>01-11</sub>	gau <sup>13</sup> <sub>(TRQ)</sub>	2,190.10 <sup>-3</sup>	1,958.10 <sup>-2</sup>	42.435	0,718	8,886.10 <sup>-5</sup>	88,8	0,900	0,872	0,516
pH <sub>02-11</sub>	exp <sup>15</sup>	1,000.10 <sup>-3</sup>	5,000.10 <sup>-1</sup>	84.300	0,892	1,210.10 <sup>-2</sup>	99,8	1,500	0,783	0,397
pH <sub>01-12</sub>	exp <sup>17</sup>	7,600.10 <sup>-2</sup>	5,850.10 <sup>-1</sup>	165.900	0,934	1,460.10 <sup>-2</sup>	87,0	-0,030	1,004	0,662
pH <sub>02-12</sub>	esf <sup>15</sup>	6,300.10 <sup>-2</sup>	5,340.10 <sup>-1</sup>	55.500	0,688	5,860.10 <sup>-2</sup>	88,2	-0,370	0,177	0,583
<b>Sódio</b>										
Na <sub>01-10</sub>	esf <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,000.10 <sup>-3</sup>	2,823	58.600	0,740	2,070	100	-1,100	1,183	0,848
Na <sub>02-10</sub>	esf <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,500.10 <sup>-1</sup>	3,321	61.100	0,732	2,360	95,5	-0,990	1,180	0,785
Na <sub>01-11</sub>	gau <sup>15</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,900.10 <sup>-1</sup>	3,365	52.654	0,820	1,870	94,4	0,350	1,031	0,869
Na <sub>02-11</sub>	esf <sup>10</sup>	1,000.10 <sup>-1</sup>	2,307.10 <sup>2</sup>	64.700	0,838	8,596.10 <sup>3</sup>	100	-1,300	1,078	0,792
Na <sub>01-12</sub>	gau <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	1,000.10 <sup>-3</sup>	2,885	53.520	0,788	2,040	100	1,030	0,944	0,892
Na <sub>02-12</sub>	gau <sup>17</sup> <sub>(TRQ)</sub>	8,900.10 <sup>-2</sup>	2,473	54.906	0,851	8,830.10 <sup>-1</sup>	96,4	0,790	0,948	0,831
<b>Sólidos Totais Dissolvidos</b>										
STD <sub>01-10</sub>	esf <sup>16</sup>	2,000.10 <sup>1</sup>	3,187.10 <sup>3</sup>	72.800	0,900	8,747.10 <sup>5</sup>	99,4	38,16	0,740	0,542
STD <sub>02-10</sub>	exp <sup>15</sup>	1,330.10 <sup>3</sup>	5,561.10 <sup>3</sup>	119.400	0,946	5,553.10 <sup>5</sup>	76,1	29,830	0,807	0,461
STD <sub>01-11</sub>	esf <sup>15</sup>	4,100.10 <sup>2</sup>	3,709.10 <sup>3</sup>	65.800	0,667	3,605.10 <sup>6</sup>	88,9	11,170	0,913	0,617
STD <sub>02-11</sub>	gau <sup>14</sup>	1,003.10 <sup>3</sup>	2,989.10 <sup>3</sup>	69.628	0,660	2,244.10 <sup>6</sup>	66,4	10,470	0,915	0,543
STD <sub>01-12</sub>	gau <sup>17</sup>	9,660.10 <sup>2</sup>	3,216.10 <sup>3</sup>	75.344	0,664	3,011.10 <sup>6</sup>	70,0	16,060	0,893	0,566
STD <sub>02-12</sub>	exp <sup>18</sup> <sub>(TRQ)</sub>	6,200.10 <sup>-1</sup>	7,665	81.000	0,887	2,890	91,9	19,200	0,875	0,537
<b>Temperatura</b>										
T <sub>01-10</sub>	exp <sup>17</sup>	2,480.10 <sup>-1</sup>	2,488	178.500	0,927	3,330.10 <sup>-1</sup>	90,0	1,950	0,923	0,692
T <sub>02-10</sub>	exp <sup>15</sup>	1,229	3,416	127.500	0,527	3,140	64,0	-4,130	1,170	0,530
T <sub>01-11</sub>	esf <sup>15</sup>	6,950.10 <sup>-1</sup>	2,593	100.500	0,688	1,750	73,2	-0,330	1,013	0,628
T <sub>02-11</sub>	gau <sup>15</sup>	1,176	3,198	93.011	0,786	1,710	63,2	-0,710	1,029	0,641
T <sub>01-12</sub>	epp	2,047	2,047	-	-	-	-	-	-	-
T <sub>02-12</sub>	gau <sup>14</sup>	1,000.10 <sup>-2</sup>	3,680	44.340	0,567	9,8300	99,7	1,580	0,939	0,795

<sup>(a)</sup> 01 e 02 referem-se ao primeiro e segundo semestre; 10, 11 e 12 referem-se aos anos 2010, 2011 e 2012; <sup>(b)</sup> Ajuste variográfico, sendo: gau = gaussiano, exp = exponencial, esf = esférico (seguidos dos respectivos valores de pares do 1º lag); epp = efeito pepita puro; TRQ = Transformação Raiz Quadrada; <sup>(c)</sup> SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = Avaliador da Dependência Espacial.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Baseado na avaliação dos modelos (Tabela 5 e Apêndices de A a F), os parâmetros variográficos de ajustes foram do tipo Esférico (Ba<sub>01-10</sub>, Ba<sub>01-11</sub>, Ba<sub>02-11</sub>, Ba<sub>01-12</sub>, Ba<sub>02-12</sub>, Ca<sub>01-11</sub>, Ca<sub>02-11</sub>,  $\sigma_{02-10}$ ,  $\sigma_{01-11}$ ,  $\sigma_{01-12}$ ,  $\sigma_{02-12}$ , Dur<sub>01-10</sub>, Dur<sub>02-10</sub>, Dur<sub>02-11</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-11</sub>, K<sub>02-11</sub>, pH<sub>02-12</sub>, Mg<sub>01-11</sub>, Mg<sub>02-11</sub>, Na<sub>01-10</sub>, Na<sub>02-10</sub>, Na<sub>02-11</sub>, STD<sub>01-10</sub>, STD<sub>01-11</sub> e T<sub>01-11</sub>); Exponencial (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-11</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-12</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-12</sub>, Ba<sub>02-10</sub>, Ca<sub>02-10</sub>,  $\sigma_{02-11}$ , NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-10</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-10</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-12</sub>, pH<sub>02-11</sub>, pH<sub>01-12</sub>, , Mg<sub>01-10</sub>, Mg<sub>02-10</sub>, Mg<sub>01-12</sub> e Mg<sub>02-12</sub>, STD<sub>02-10</sub>, STD<sub>02-12</sub>, T<sub>01-10</sub> e T<sub>02-10</sub>); e Gaussiano (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-10</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-10</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-11</sub>, Ca<sub>02-12</sub>,  $\sigma_{01-10}$ , Dur<sub>01-11</sub>, Dur<sub>01-12</sub>, Dur<sub>02-12</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>02-11</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>01-10</sub>, K<sub>02-10</sub>, Dur<sub>01-11</sub>, Dur<sub>01-12</sub>, Dur<sub>02-12</sub>, pH<sub>01-10</sub>, pH<sub>02-10</sub>, pH<sub>01-11</sub>, Na<sub>01-11</sub>, Na<sub>01-12</sub>, Na<sub>02-12</sub>, STD<sub>01-12</sub>, T<sub>02-11</sub> e T<sub>02-12</sub>). O único parâmetro que apresentou efeito pepita puro (epp) foi a T em 01-12, ou seja, os valores não podem ser avaliados através de análise geoestatística, por não fornecerem dados consistentes para serem associados espacialmente, ou seja, por não apresentar dependência espacial definida.

Quanto aos alcances (A), os valores foram sempre elevados devido ao fato da área amostrada ser extensa. Os alcances variaram da seguinte maneira:  $\text{HCO}_3^-$  de 60.794 a 141.300 m; Ba de 72.100 a 222.600 m; Ca de 51.800 a 154.500 m;  $\sigma$  de 53.000 a 184.500 m; Dur de 53.000 a 104.442 m; Mg de 57.500 a 176.400 m;  $\text{NO}_3^-$  de 157,9 a 1.222.000 m; K de 62.353 a 77.000 m; pH de 42.435 a 165.900 m; Na de 53.200 a 64.700 m; STD de 65.000 a 119.400 m e T de 44.340 a 178.500 m.

Quanto aos coeficientes de determinação espacial ( $r^2$ ) do variograma, por indicarem melhores ajustes quanto mais próximos de um, foram observados elevados  $r^2$  para todos os parâmetros ( $r^2 > 0,500$ ). Os  $r^2$  mais expressivos foram para os parâmetros:  $\sigma_{02-10}$  (0,816),  $\sigma_{02-11}$  (0,850), todos Dur ( $> 0,822$ ), todos  $\text{NO}_3^-$  ( $> 0,840$ ),  $\text{K}_{01-12}$  (0,824),  $\text{pH}_{01-10}$  (0,829),  $\text{pH}_{02-11}$  (0,892),  $\text{pH}_{01-12}$  (0,934),  $\text{Na}_{01-11}$  (0,820),  $\text{Na}_{02-11}$  (0,838),  $\text{Na}_{02-12}$  (0,851),  $\text{STD}_{01-10}$  (0,900),  $\text{STD}_{02-11}$  (0,946),  $\text{STD}_{02-12}$  (0,887) e  $\text{T}_{01-10}$  (0,927), evidenciando ajustes adequados (Tabela 5).

Com base nos valores de ADE expostos na Tabela 5, podemos observar que a maioria dos parâmetros apresentou dependência espacial alta ( $60\% \leq \text{ADE} < 80\%$ ) ou muito alta ( $80\% \leq \text{ADE} < 100\%$ ) conforme classificação disposta em Design (2005). Apesar disso, em determinados períodos, alguns apresentaram dependência classificada como média ( $40\% \leq \text{ADE} < 60\%$ ), os quais são  $\text{HCO}_3^-$   $_{01-10}$  com 59,8%,  $\text{Ba}_{01-10}$  e  $\text{Ba}_{01-11}$  com 56,7% e 59,3%, respectivamente,  $\sigma_{01-10}$  com 56,2%,  $\text{Dur}_{01-11}$  53,5% e  $\text{Mg}_{01-10}$  com 59,7% de dependência espacial.

O parâmetro com melhor consistência dos valores de ADE foi o Na, seus valores variaram de 94,4 a 100%, indicando dependência espacial muito alta para todo o período estudado (Tabela 5).

A validação cruzada entre os valores observados e estimados de cada parâmetro (Tabela 5 e Apêndices G a L) indicaram variogramas com valores que variaram de 0,402 ( $\text{Mg}_{01-10}$ ) a 0,795 ( $\text{T}_{02-12}$ ). Gerando os mapeamentos estimativos mais próximos às condições de campo.

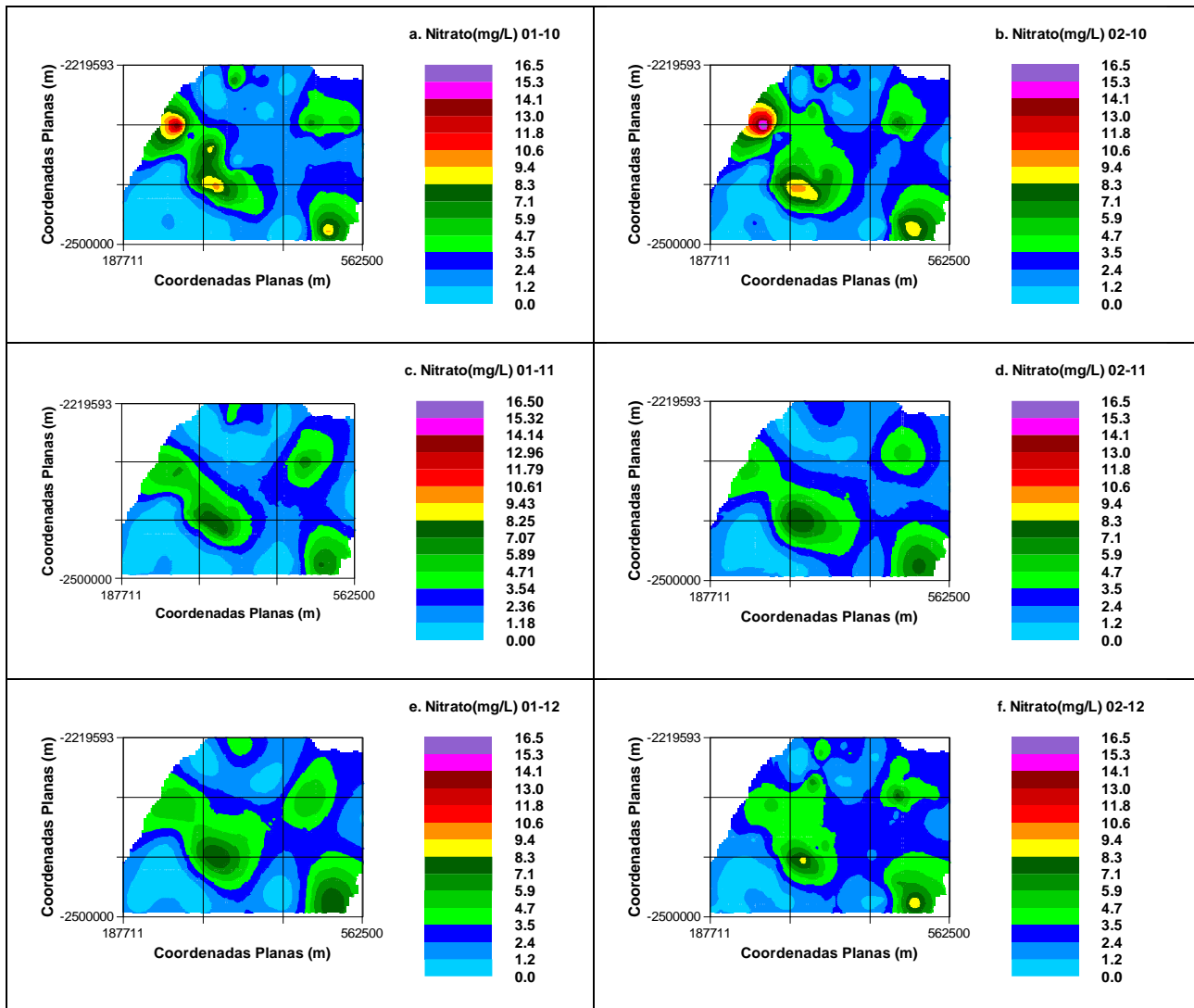
#### 4.4 MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

Os padrões espaciais realizados para cada parâmetro por krigagem, foram apresentados nas Figura 12 a Figura 19, de acordo com sua toxicidade ou impactos que possam causar para saúde humana ou no meio ambiente. Considerando inicialmente o  $\text{NO}_3^-$ , devido a sua toxidade, em algumas áreas os valores de  $\text{NO}_3^-$  foram mais elevados, podendo ser observados os casos nos mapas da Figura 12. As localizações foram: canto superior esquerdo, devido à influência do ponto BA0006P, localizado na área urbana de Andradina, este ponto de coleta apresentou os valores mais elevados de  $\text{NO}_3^-$  dentre todas amostras (média trienal de 19 mg/L), o que pode indicar contaminação por efluentes não tratados; no centro mais ao sul ocorreu valores médios de 10 mg/L no município de Parapuã; e no canto inferior direito os valores do ponto BA0232P totalizara uma média trienal de 10 mg/L, sendo referentes a área urbana de Bauru.

Com base no VMP (10 mg/L) para  $\text{NO}_3^-$ , em 01-10 e 02-10 (Figura 12) foram encontrados valores amostrais mais elevados. Podendo indicar maior poluição no ano de 2010, comparado ao restante do período de estudo. Presenças elevadas de  $\text{NO}_3^-$  indicam contaminações antrópicas do meio, como o problema das tubulações antigas no centro de Bauru relatado por Giafferis e Oliveira (2006). O SAB é o aquífero com maior concentração de  $\text{NO}_3^-$  no Estado de São Paulo. Esta é a substância que mais demanda atenção quanto à variação de valores, segundo a CETESB. Foram verificados registros de contaminação das águas de poços localizados nas áreas urbanizadas de alguns dos municípios que integram a área (CETESB, 2013).

Em estudo do SAB, Kiang, Stradioto e Silva (2016) obtiveram elevados teores de  $\text{NO}_3^-$ , sendo que muitos deles ultrapassaram o limite máximo permitido pela Portaria nº 2914/11 do MS, indicando contaminação antrópica e estando associadas às águas coletadas em porções mais rasas dentre as unidades aquíferas amostradas. De acordo com Varnier et al. (2010) o nitrato é o contaminante com maior frequência nos aquíferos pelo mundo. Uma das fontes potenciais de poluição desse contaminante são as áreas urbanas, principalmente aquelas com falhas no sistema de saneamento ou com redes coletoras de esgoto antigas.

Figura 12 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do parâmetro  $\text{NO}_3^-$  para os dados de 2010 a 2012



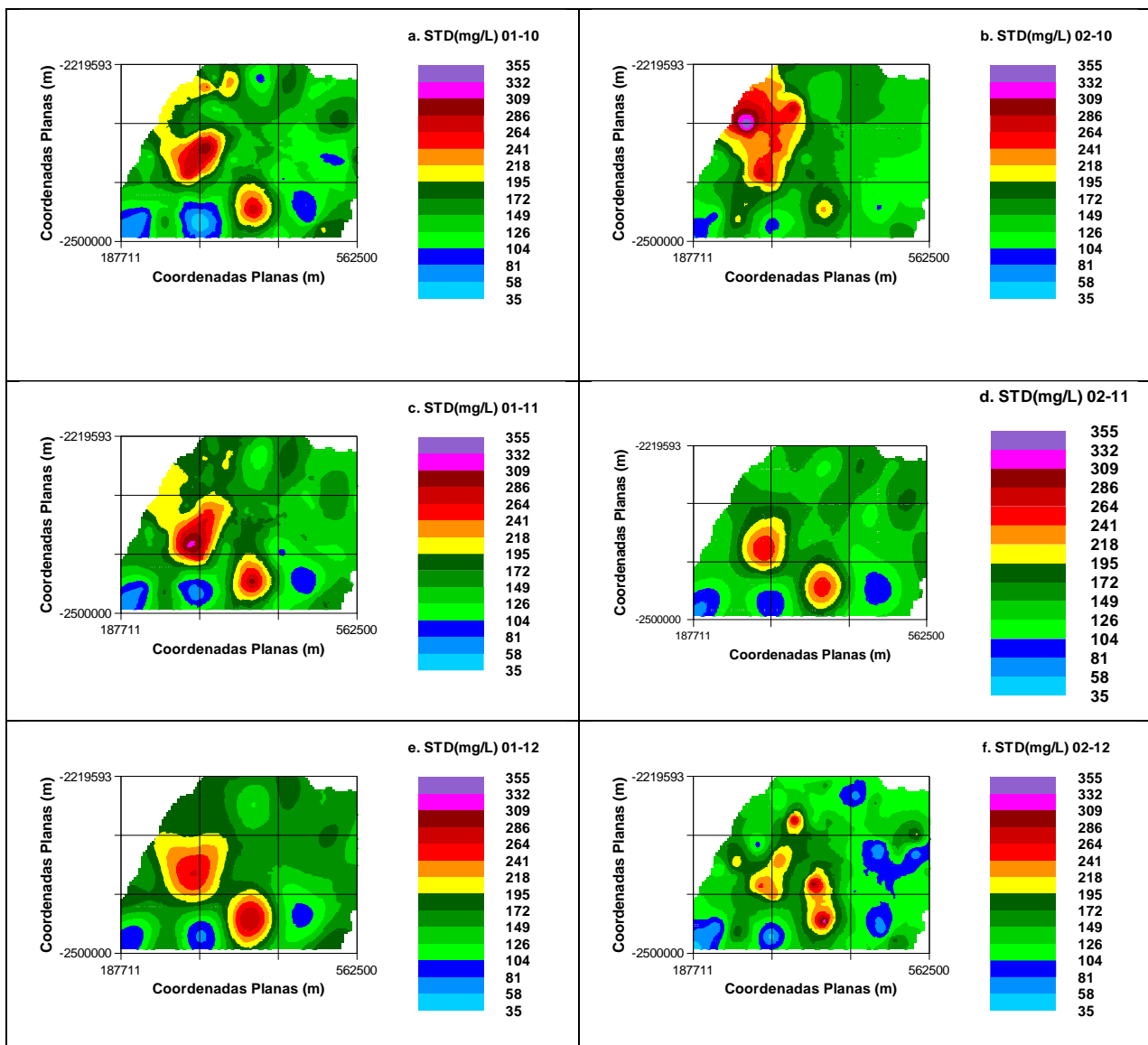
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 13, dos STD, apresenta comportamento estável ao longo do período de estudo. As regiões com concentrações mais elevadas são: no quadrante à esquerda no meio junto ao central e no quadrante inferior da coluna central. As regiões são próximas aos pontos amostrais Pompéia (BA0203P) e Flórida Paulista (BA0040P), respectivamente. Elas possuem valores de 195 a 309 mg/L, enquanto o restante da área mapeada, de 104 a 195 mg/L.

Os menores valores amostrados foram no segundo semestre de 2012, o que refletiu no mapeamento desta data (Figura 13f). Apesar dos valores serem inferiores, o comportamento geral foi semelhante aos demais. Mesmo com as variações existentes nos mapas (Figura 13), todos as quantidades de STD encontram-se dentro dos limites permitidos para consumo humano, apresentado anteriormente na Tabela 3.

As variações observadas na Figura 13 podem estar associadas às variações de nível de água do aquífero. Os sólidos em suspensão de águas superficiais provêm do carreamento de solos pelas águas pluviais, devido aos processos erosivos (VASCO et al., 2011), nesse caso, por serem águas subterrâneas, deve haver a influência da litologia do local, ou seja, o tipo de solo ou rochas locais podem fornecer substâncias para as águas subterrâneas, o que se intensifica com os níveis de água mais baixos. O valor do nível de água nos pontos amostrais não foi disponibilizado nos relatórios da CETESB.

Figura 13 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do STD para os dados de 2010 a 2012

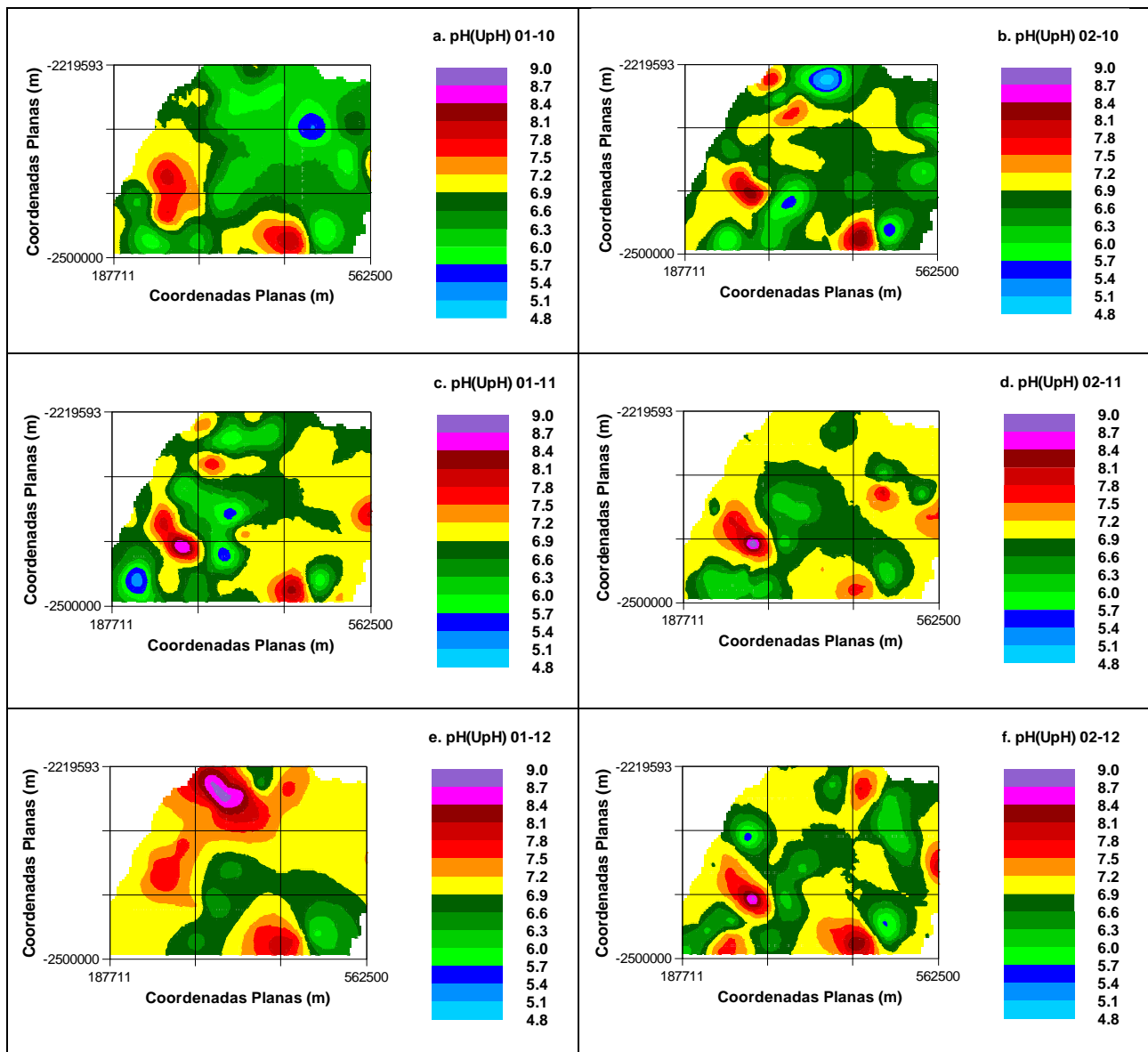


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Podemos observar em 2010 (Figura 14) que os valores de pH foram ligeiramente inferiores aos de 2011 e 2012, por isso, o mapa apresenta mais valores que tendem à acidez ( $\text{pH} < 7$ ). Apesar disso, todo o período de estudo apresentou valores de pH próximo da neutralidade ( $\text{pH} = 7$ ), como observado na Tabela 3.

Segundo Mendonça e Gutierre (2000) o pH das águas do SAB varia de 7,0 a 8,0 para o Aquífero Caiuá, de 5,5 a 6,5 para o Aquífero Anastácio, de 5,3 a 10,3 para o Aquífero Adamantina e de 6,6 a 6,7 para o Aquífero Marília.

Figura 14 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do pH para os dados de 2010 a 2012



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

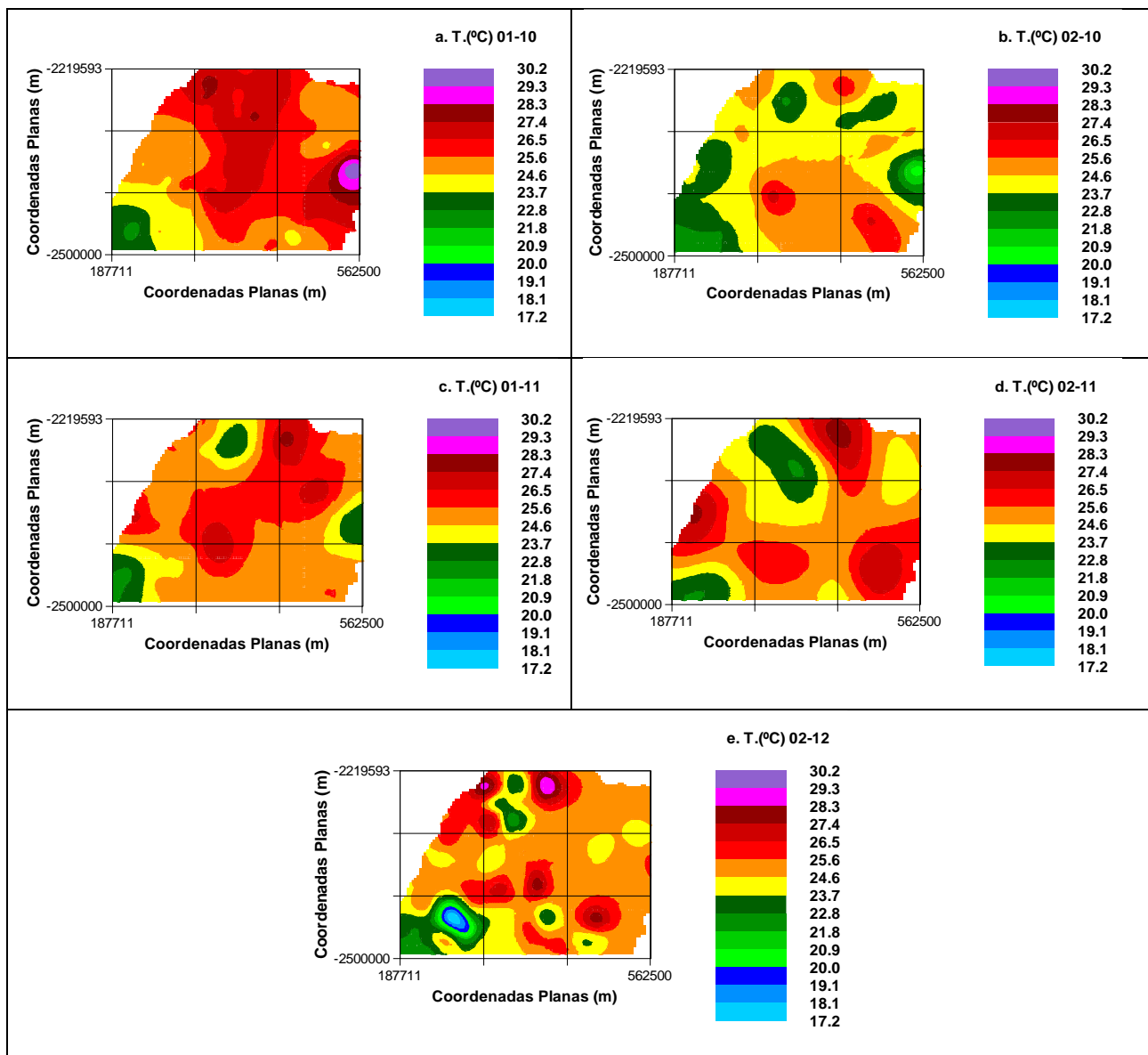
Os valores de temperatura dos segundos semestres (Figura 15b; Figura 15d; Figura 15e) foram ligeiramente inferiores em comparação com os valores dos primeiros semestres (Figura 15a; Figura



15c), o que pode ter ocorrido devido às estações do ano. Os valores de T amostrados são próximos, apesar da área ser extensa (104.000 km<sup>2</sup>).

As alterações pontuais da temperatura podem ser resultado de ações antropogênicas, tendo em vista que as áreas do mapa com temperaturas mais elevadas encontram-se em centros urbanos como São José do Rio Preto, Andradina e Bauru (Figura 15). Benz, Bayer e Blum (2017) citou que os seres humanos alteram as temperaturas de águas subterrâneas ou superficiais pelo uso de sistemas de energia geotérmica superficial, como bombas de calor de águas subterrâneas. Segundo Attard et al. (2016), áreas urbanas podem aumentar até cerca de 4 °C a temperatura de águas subterrâneas.

Figura 15 - Padrões espaciais por krigagem ordinária da T para os dados de 2010 a 2012



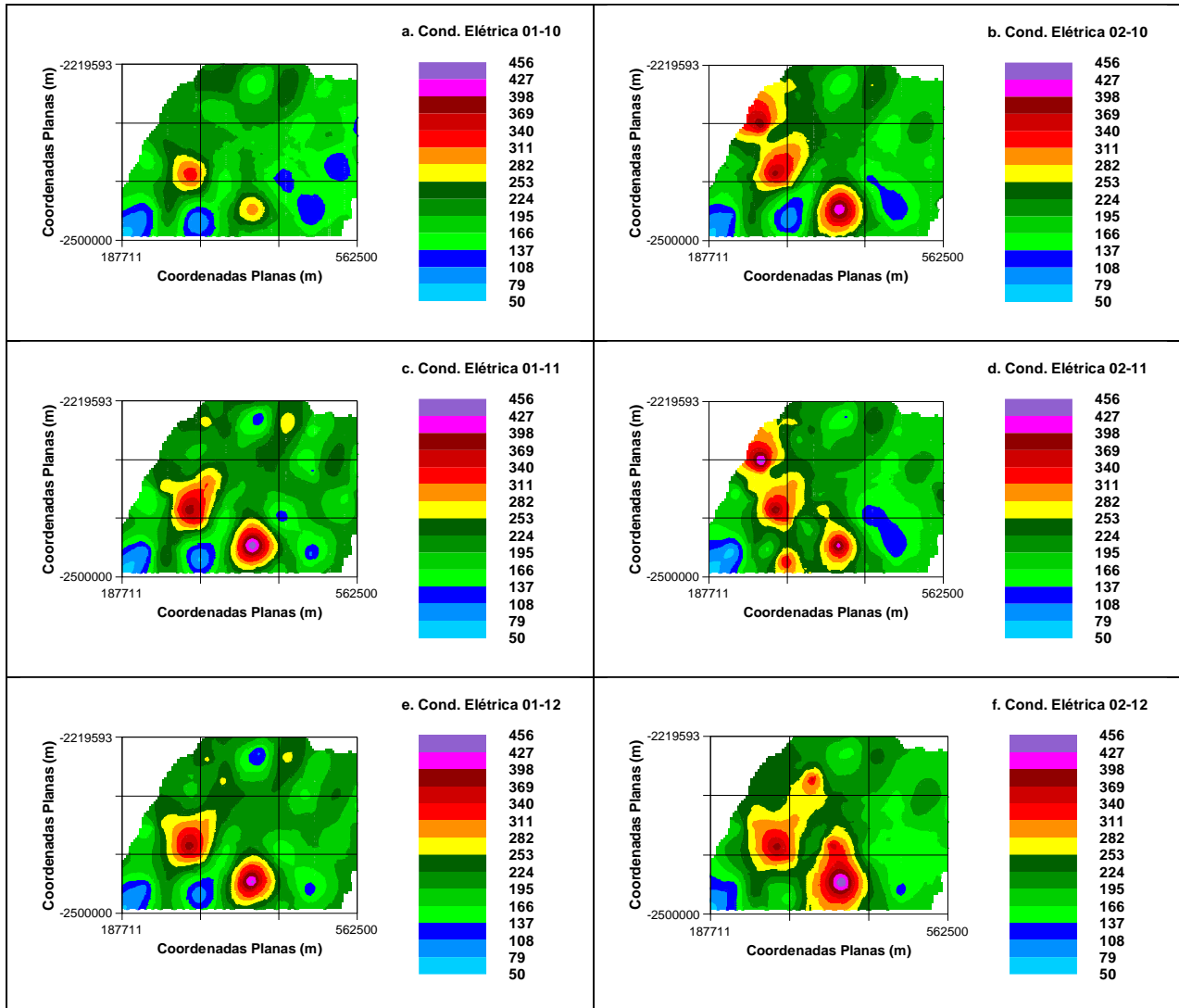
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Alguns parâmetros, que apresentam correlação entre si como mostrados a partir da matriz de correlação (Tabela 4), tiveram comportamentos semelhantes em seus mapas de krigagem. É observado essas características entre  $\sigma$  (Figura 16), Ca (Figura 18), Mg (Figura 19) e  $\text{HCO}_3^-$  (Figura 17), e também com STD, que são formados por outros parâmetros presentes nas águas, e pH.

Iniciando pelo mapeamento do parâmetro  $\sigma$  (Figura 16), o comportamento foi semelhante a STD (Figura 13) e Ca (Figura 18). Como citado anteriormente, segundo Pádua e Ferreira (2006), a partir dos valores de  $\sigma$  é possível estimar a quantidade de STD na água. Além disso, a  $\sigma$  depende principalmente dos cátions e ânions mais importantes presentes na água, dentre os cátions está o cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) e dentro os ânions, o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) (TUTMEZ; HATIPOGLU; KAYMAK, 2006), indicado respectivamente nas Figura 18 e Figura 17.

Sendo assim, as regiões de maior concentração de  $\sigma$  (Figura 16) ao longo do período estudado são as mesmas de maior concentração de STD (Figura 13) e de Ca (Figura 18).

Já a temperatura da água e a condutividade elétrica ( $r = 0,56$ ) tiveram correlação favorecida explicada pelo período menos chuvoso (abril). Em função da elevação da temperatura neste mês e das precipitações reduzidas, ocorreu uma concentração de sais que fizeram a elevação proporcional da variável condutividade elétrica da água (SOUZA et al., 2014).

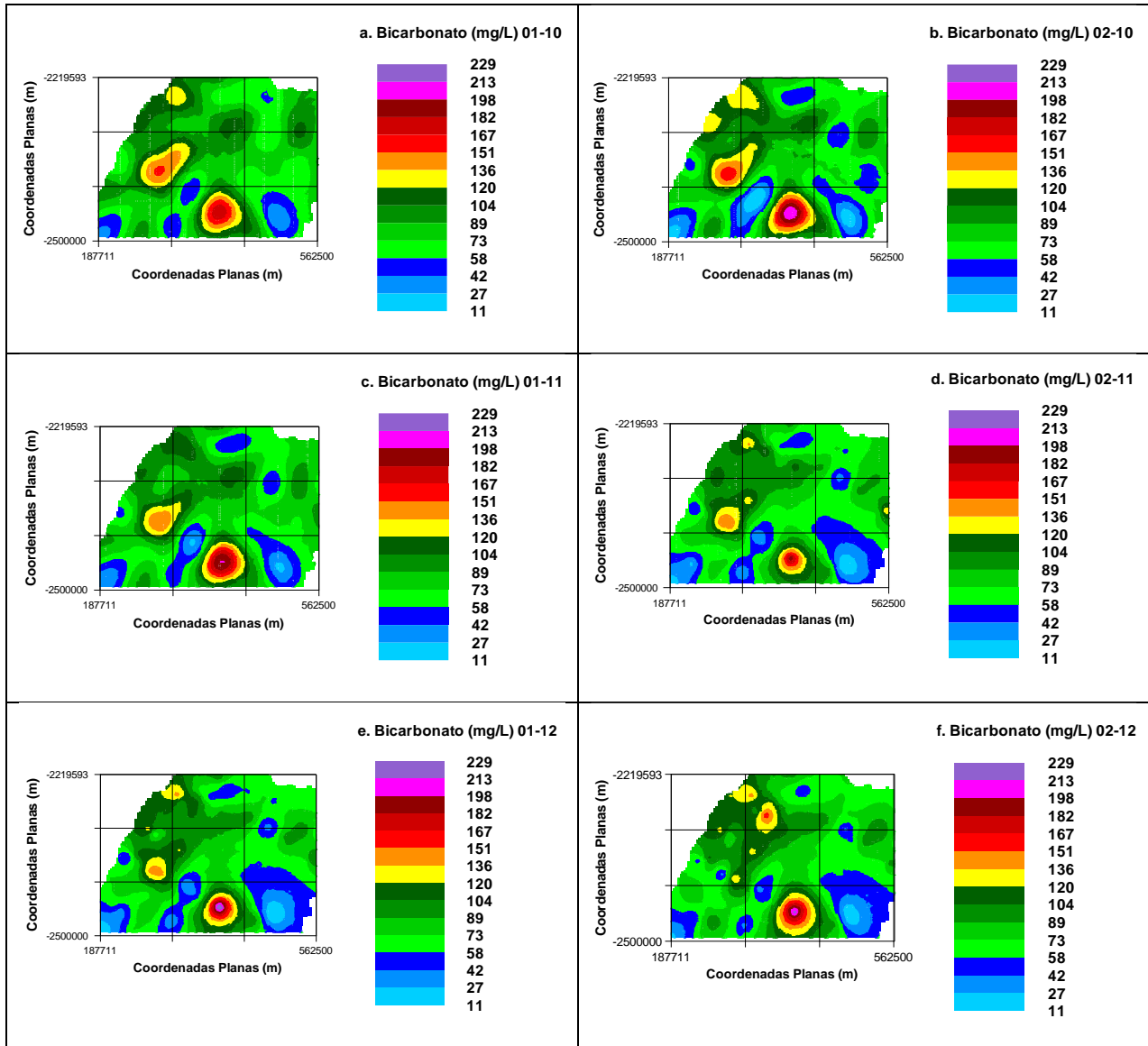
Figura 16 - Padrões espaciais por krigagem ordinária da  $\sigma$  para os dados de 2010 a 2012

Unidades da Condutividade Elétrica ( $\sigma$ ) em  $\mu\text{S/cm}$ .

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O bicarbonato é o principal ânion encontrado no SAB (KIANG; STRADIOTO; SILVA, 2016). Segundo Tutmez, Hatipoglu e Kaymak (2006) o  $\text{HCO}_3^-$  (Figura 17) influencia na  $\sigma$  (Figura 16) da água, o que foi observado devido à correlação entre os parâmetros (Tabela 4), por isso notou-se semelhança nos dois mapeamentos

Outro parâmetro associado a  $\text{HCO}_3^-$  é o pH (Figura 14), pois a alcalinidade tem a capacidade de neutralizar ácidos na água. Em algumas regiões, notou-se tal relação, de maiores quantidades de  $\text{HCO}_3^-$  e maiores valores de pH. Como no caso do segundo semestre de 2010, foram observados os valores de  $\text{HCO}_3^-$  e pH no quadrante central superior. Outro local onde essa correlação está presente é entre os quadrantes inferiores da esquerda e do centro do mapa de krigagem.

Figura 17 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do  $\text{HCO}_3^-$  para os dados de 2010 a 2012

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

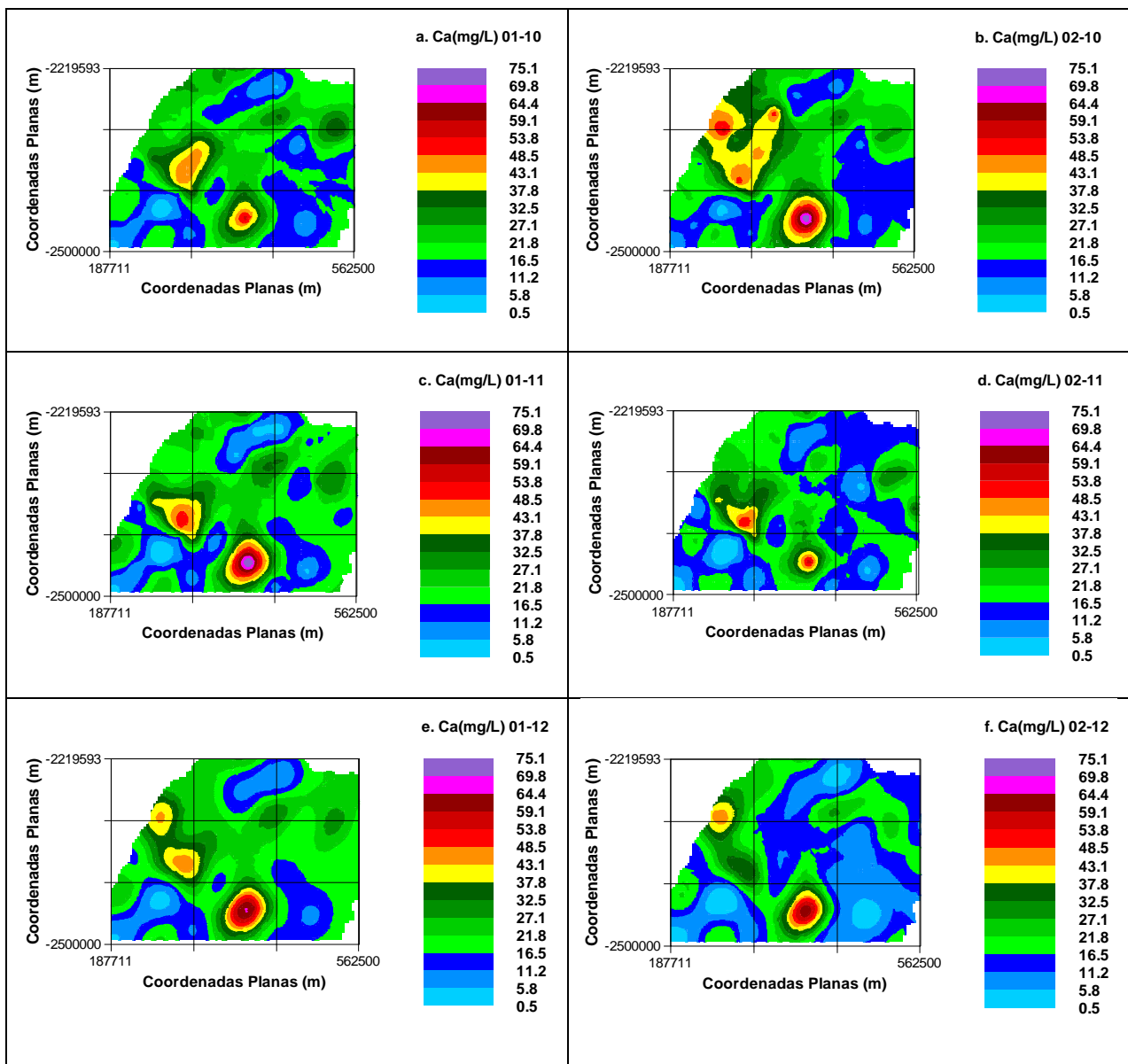
Os parâmetros Ca (Figura 18) e Mg (Figura 19) apresentaram considerável valor de correlação,  $r = 0,80$  (Tabela 4). Na região do quadrante centro-sul, há uma área com maiores valores de ambos parâmetros, tal ocorrência pode ser associada à realização do processo de calagem do solo. Nesta área observou-se regiões agrícolas, onde estão localizados os pontos BA0203P e BA0211P, ambos no município de Pompéia.

Visto que a calagem do solo tem o intuito de reduzir a acidez e aumentar a produtividade do solo, outro parâmetro relacionado a região centro-sul, é o pH (Figura 14). O pH apresentou valores mais elevados, ou seja, menor acidez. Moreira et al. (2001), mostrou em estudo que a calagem e os anos de cultivo acarretaram ao solo maiores teores de Ca e Mg e maiores valores de pH.

O comportamento do Ca e do Mg ao longo dos períodos de estudo, foi similar ao de STD em 02-10 (Figura 13b), no quadrante superior da esquerda. Nota-se valores elevados para o ponto de coleta BA0006P, localizado na área urbana de Andradina. Segundo Vasco et al. (2011), todos os contaminantes da água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos em suspensão. Assim sendo, alguns elementos têm ainda uma maior correlação com os STD (Figura 13), como é o caso do Ca (Figura 18) e Mg (Figura 19).

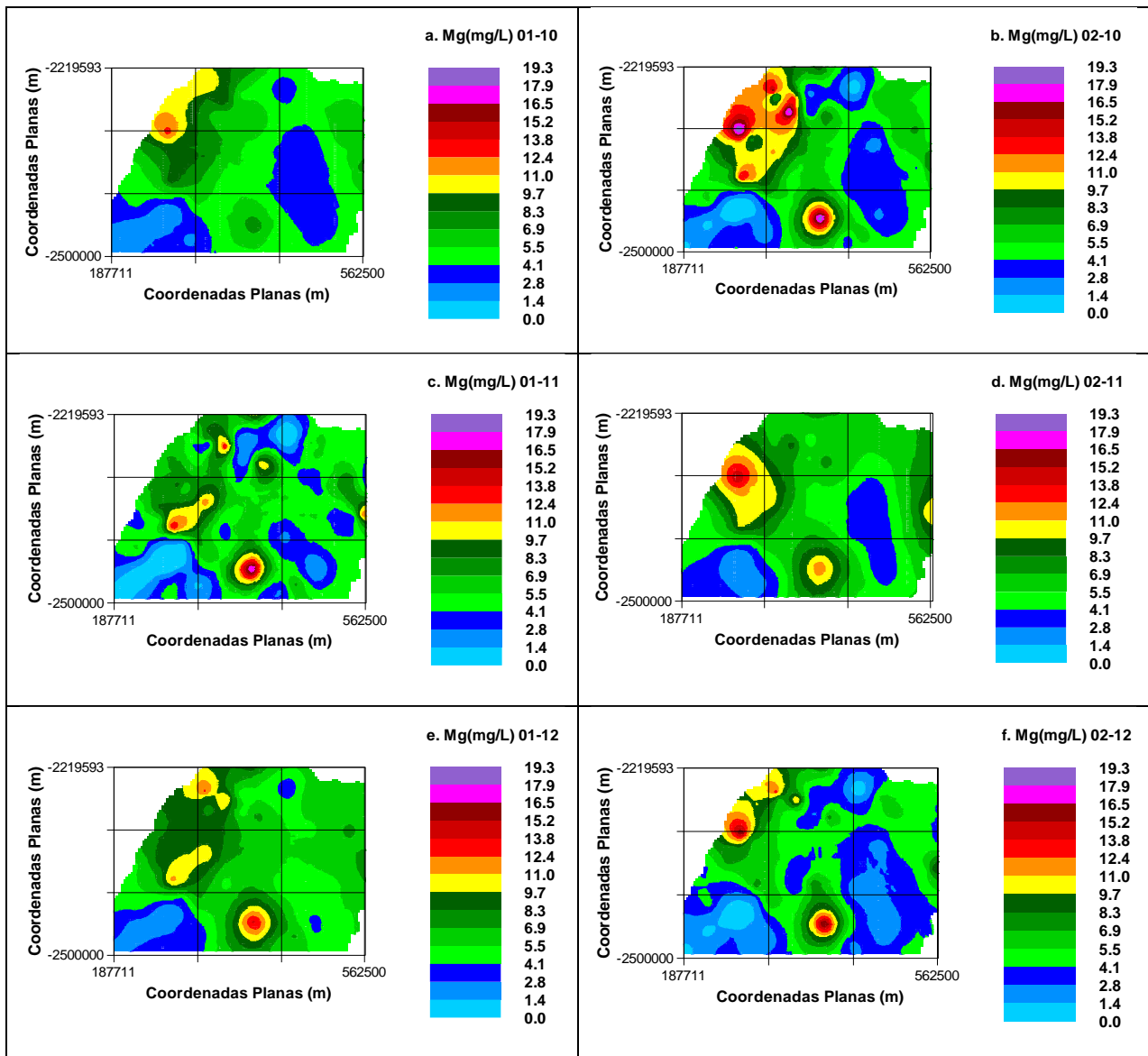
Ademais, de acordo com Mendonça e Gutierre (2000) as águas do SAB são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, secundariamente como magnesianas ou sódicas. Por isso, é comum a presença de cálcio nas águas do Aquífero Bauru. É comum a predominância de águas fortemente bicarbonatadas, cálcicas e calco-magnesianas.

Figura 18 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do Ca para os dados de 2010 a 2012



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

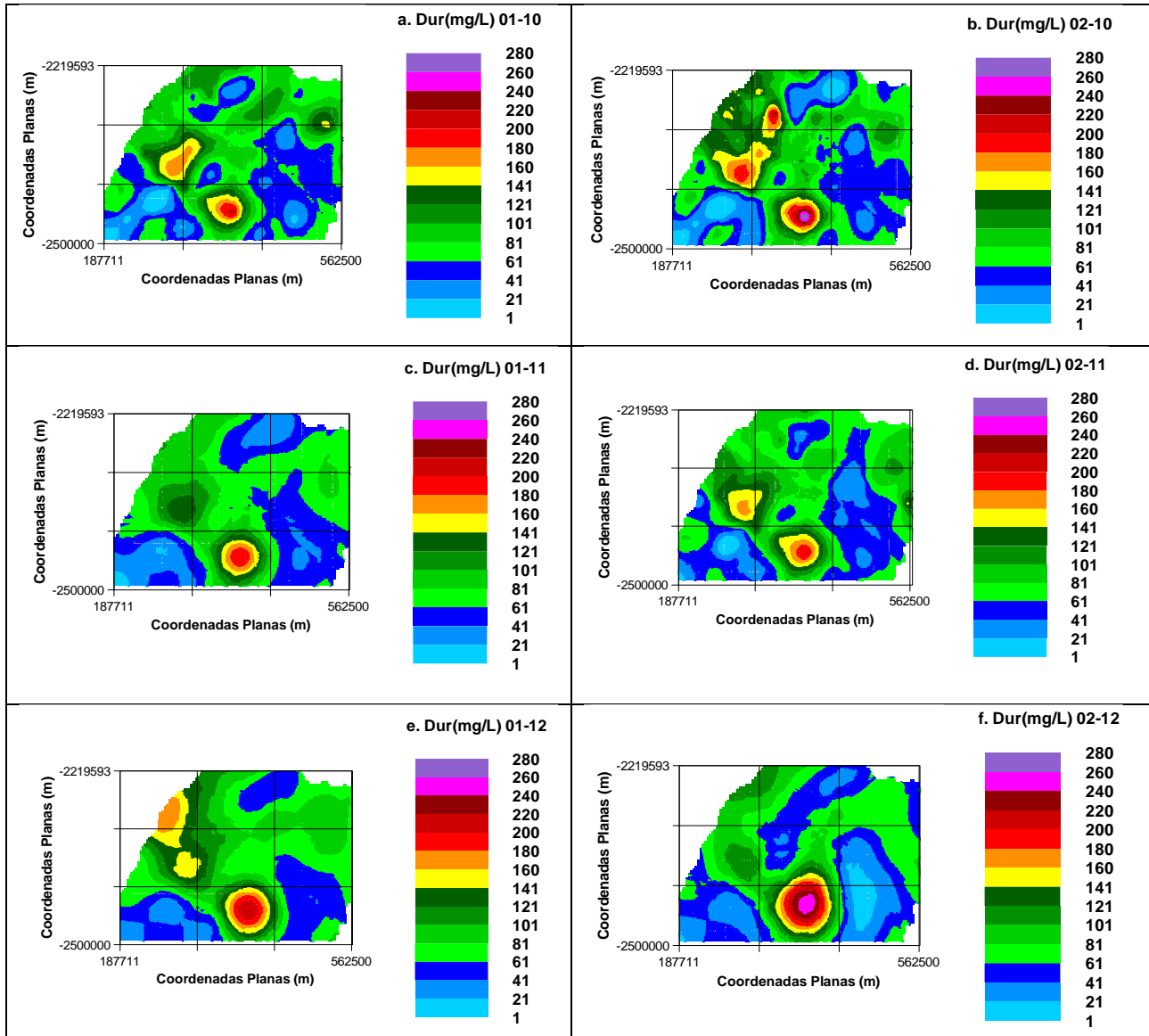
Figura 19 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do Mg para os dados de 2010 a 2012



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como visto anteriormente, a dureza é maior quando as águas apresentam maiores quantidades de Ca e Mg. Como no SAB é encontrado Ca devido a composição geológica da área, podemos notar semelhança no comportamento das concentrações de Ca e Mg com Dur, Figura 18, Figura 19 e Figura 20, respectivamente. As áreas com maiores concentrações são comuns aos três mapeamentos, como visto no quadrante central da parte inferior dos mapas uma região de maior concentração, região administrativa de Marília (Figura 3).

Figura 20 - Padrões espaciais por krigagem ordinária da Dur para os dados de 2010 a 2012

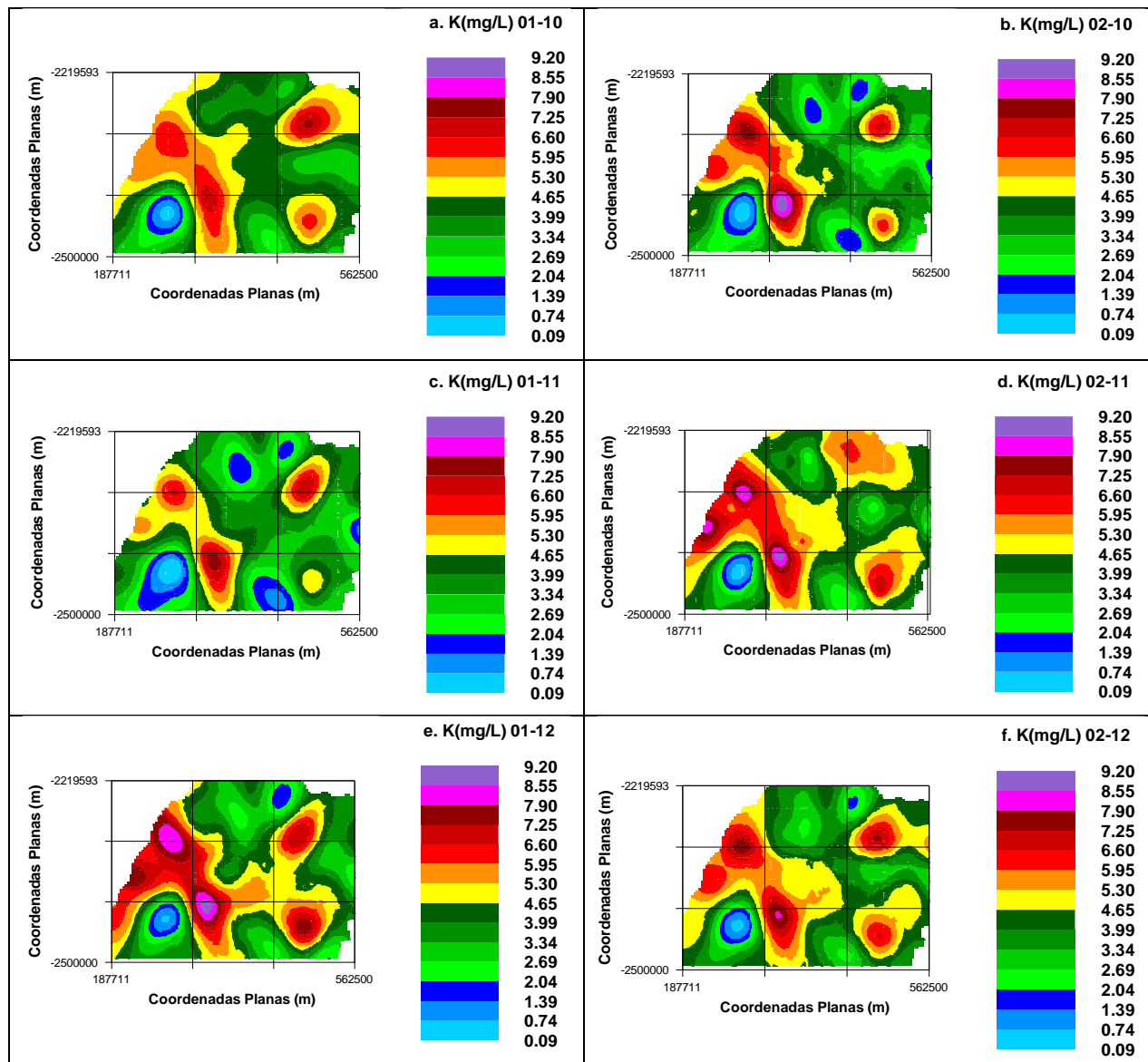


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 21, observa-se que as concentrações de K são distribuídas de maneira similar ao longo do período de estudo. No Brasil, os esgotos sanitários apresentam concentrações de K na faixa de 6 a 10 mg/L (CONAMA, 2005). O SAB tem como valor de referência de qualidade de K 4,5 mg/L (Tabela 1), o que acompanha os valores médios anteriormente apresentados (Tabela 3) e pode ser observado na área mapeada (Figura 21).

Tendo em vista que, para obter um aumento produtivo na agricultura são realizadas adubações com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) e a disponibilidade de nitrogênio influencia diretamente na presença do K (SANTOS, 2017), a existência desse nutriente pode ocorrer devido a infiltração de águas em áreas de agricultura onde são aplicadas adubações.

Figura 21 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do K para os dados de 2010 a 2012



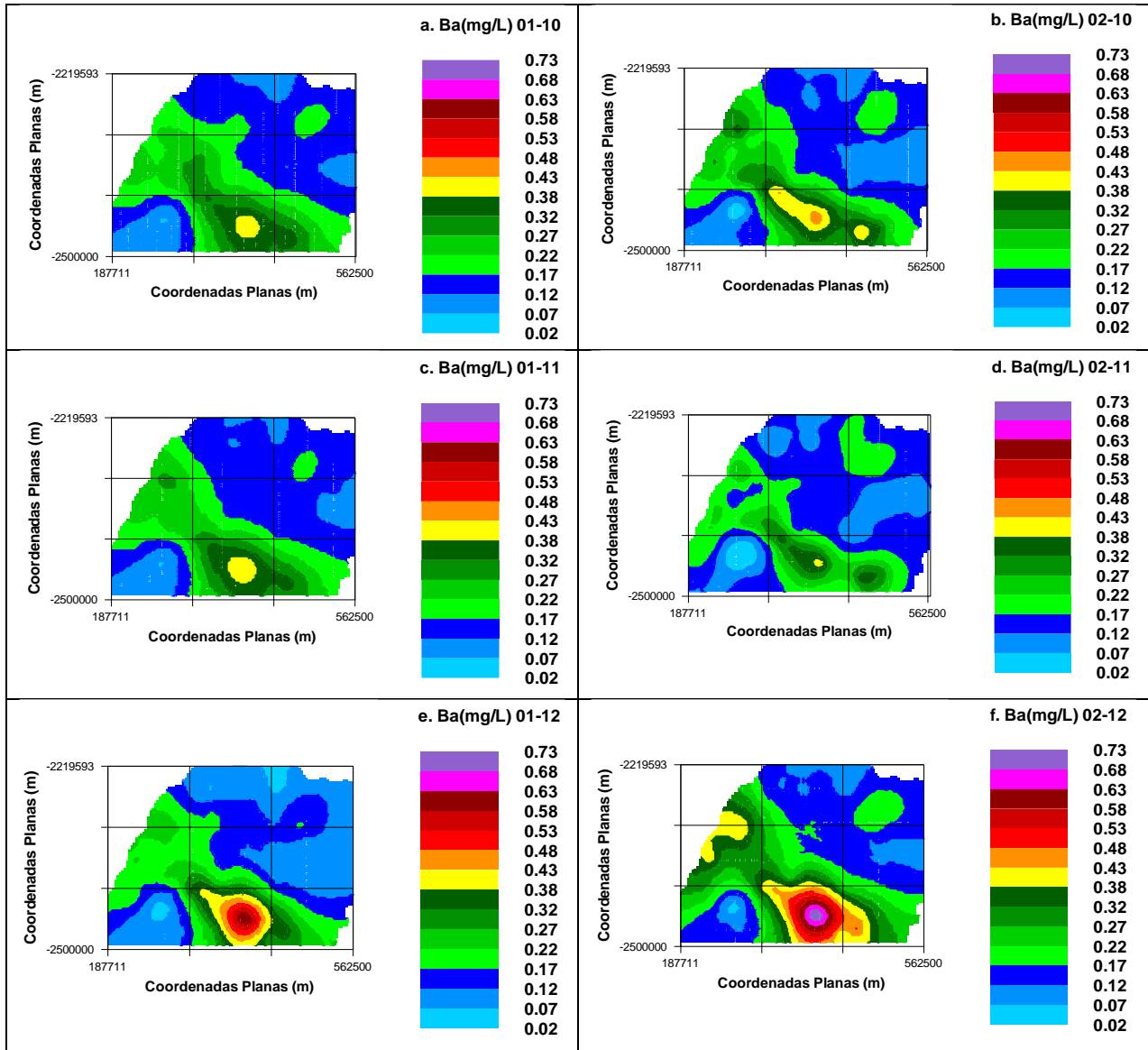
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 3 nota-se valores máximos maiores para o ano de 2012, este aumento não ocorreu de forma pontual, pois também pode ser observada uma área de maiores de concentrações no quadrante central inferior dos mapas do ano 2012 (Figura 22).

Para 02-12 a quantidade de Ba na região central inferior está acima da permitida para consumo humano, segundo o Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), valores acima de 0,70 mg/L. Região que abrange o município de Pompéia, BA0211P. A ocorrência de Ba pode ser proveniente de fábricas que processam fertilizantes, produzem estruturas metálicas, soldagens em oficinas, ou mesmo descarte de lixo urbano e industrial (LIMA et al., 2010).



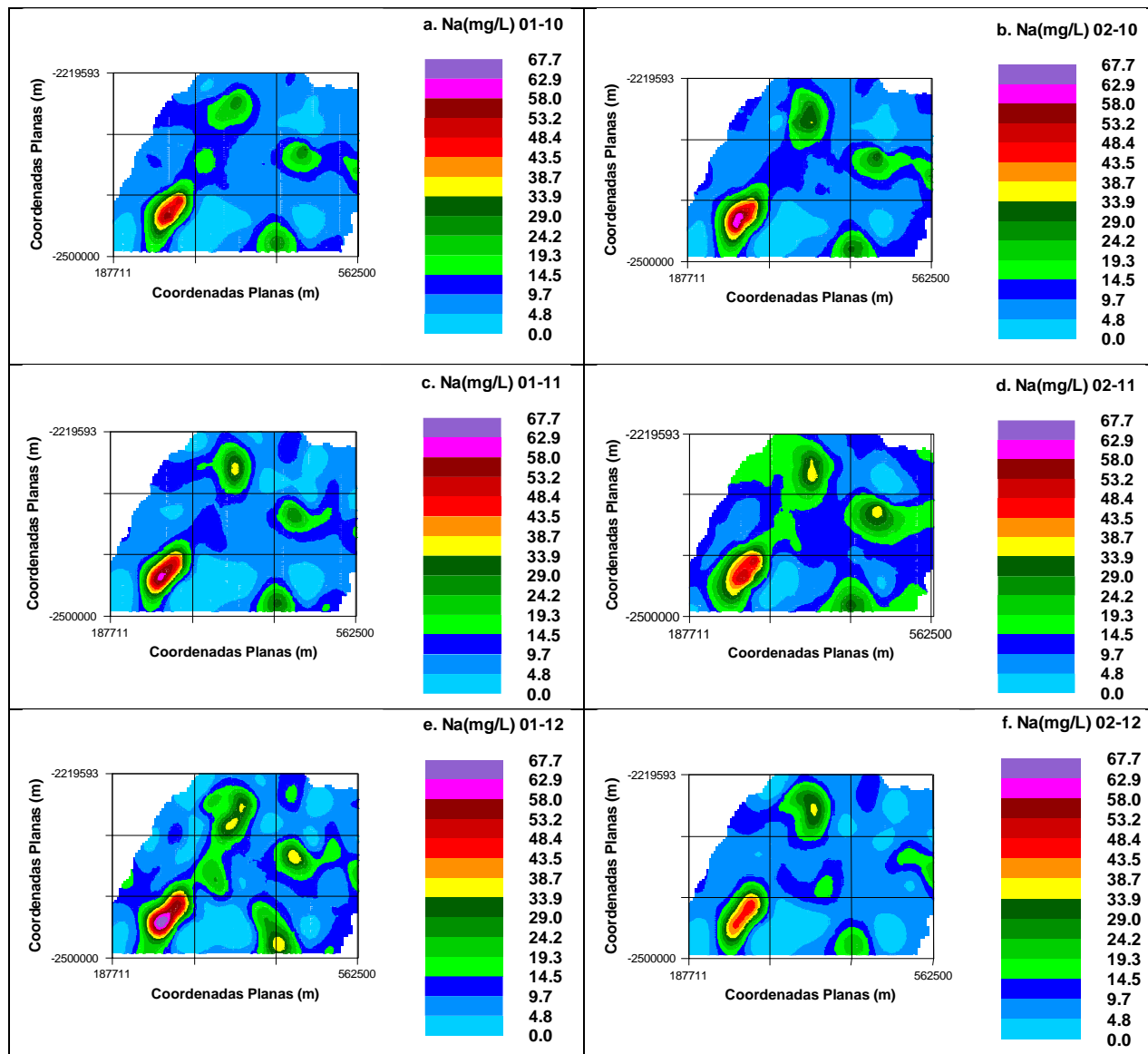
Figura 22 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do Ba para os dados de 2010 a 2012



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As concentrações de Na mapeadas para o SAB mostram valores dentro das condições naturais, pois o sódio ocorre no meio ambiente. É um constituinte de rochas liberado por intemperismos. Geralmente, para águas subterrâneas, encontra-se em concentrações de 50mg/L, sendo que o valor máximo para o consumo humano é de 200 mg/L (BRASIL, 2011) e o valor máximo mapeado foi de 67,7 mg/L.

Figura 23 - Padrões espaciais por krigagem ordinária do Na para os dados de 2010 a 2012



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O monitoramento tem se mostrado importante no conhecimento da qualidade das águas subterrâneas. A aplicação de redes contínuas que a verifique é necessário para acompanhamento e para possibilitar identificação de contaminantes nos sistemas.

Diversos relatórios e materiais de apoio existem para dar suporte à gestão do recurso subterrâneo, porém existem dificuldades e inúmeros desafios para aplica-los. A maioria das redes regionais, como também as nacionais, de monitoramento, encontram-se em fase operativa inicial e apresentam falhas.

Ainda no sentido de melhorar o diagnóstico da qualidade das águas, é importante a atuação dos comitês de bacia na promoção de estudos e monitoramento de maior detalhe, bem como a

integração das informações obtidas pelas concessionárias e órgãos municipais responsáveis pelo abastecimento público de água e os órgãos gestores.

De maneira geral, a qualidade das águas dos Aquíferos pertencentes ao Grupo Bauru pode ser considerada como excelente para o consumo humano, animal e para os usos industrial e agrícola. Com apenas algumas regiões específicas devido a concentrações de  $\text{NO}_3^-$  acima da indicada para consumo humano.

A partir dos valores gerados pela krigagem, foram apresentados os mapeamentos de toda a área de estudo, com o melhor ajuste para retratar a realidade de cada parâmetro. Para análise mais detalhada seria adequado possuir os valores de nível de água para os pontos amostrais. Porém os órgãos de monitoramento não oferecem esse valor em seus relatórios.

Mesmo assim, é possível afirmar que existem parâmetros que se correlacionam, e que podem ser realizadas aproximações espaço-temporais para encontrar valores de pontos não amostrados, mesmo para extensas áreas com pontos de coleta distribuídos de maneira não uniforme.

O conhecimento de parâmetros de monitoramento de qualidade da água é relevante para gerenciar os recursos hídricos. Considerar as ocorrências ao longo de períodos possibilita embasamento para tomada de iniciativas decisivas no planejamento e uso da terra, além de aumento da praticidade, confiabilidade e redução de gastos. Tais iniciativas contribuem para o desenvolvimento sustentável.

Principalmente se tratando de águas subterrâneas, pois elas compõem elevada porcentagem no abastecimento de municípios e são podem ser afetadas por fontes poluentes antrópicas.

Cabe também ressaltar a importância de se basear em fontes adequadas de referência. Adotar valores internacionais ou de regiões com condições climáticas, tecnológicas e pedológicas distintas da área de estudo pode acarretar avaliações errôneas.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram elevada variabilidade dos dados para os parâmetros avaliados. A exceção do pH e da Temperatura, que apresentaram variabilidade baixa e média.

A partir dos dados gerados, pôde ser observada correlação linear entre alguns parâmetros. Os mais significativos, do ponto de vista da praticidade laboratorial para obtenção, foram relacionados aos Sólidos Totais Dissolvidos o Ca ( $r = 0,77$ ) e o Mg ( $r = 0,70$ ). Sendo assim, os parâmetros Ca e Mg podem ser determinados indiretamente pelos STD, pelas equações de regressão entre os valores, que apresentaram elevada significância estatística. Tal correlação foi evidenciada com a análise dos principais componentes (PCA), onde o primeiro componente principal, os STD, explicou 86,36% da variação total dos parâmetros  $\sigma$ , Ca, Mg e Dur.

Da mesma maneira a correlação entre Dureza e Ca permite que seja feita a estimacão de cálcio a partir da dureza por equação de regressão com aproximadamente 83% de confiabilidade.

Do ponto de vista geoestatístico, à exceção da Temperatura (01-12) que não apresentou dependência espacial (epp), todos os parâmetros apresentaram dependência espacial com apreciáveis ajustes variográficos e mapas de krigagem bem definidos.

O Nitrato apresentou relação com fontes de poluição antrópicas. Os valores que superaram o máximo permitido de 10 mg/L, foram na região de Andradina, em todo o período de estudo, e no município de Bauru para o ano de 2010. A contaminação pode ser relacionada com a ocorrência de efluentes domésticos ou industriais, ou também tubulações antigas no sistema de coleta de esgoto da cidade, ocorrendo vazamentos e a contaminação, como é o caso de Bauru, por se tratarem de áreas predominantemente urbanas.

Assim como o Nitrato, o Bário é um parâmetro que deve ser observado com atenção, por poder acarretar problemas de saúde se ingeridos em elevadas concentrações. Considerando o VMP, existem valores elevados deste metal para o último ano de estudo, observado no mapa de 02-12 em uma região.

A variação advinda da sazonalidade foi observada de forma sutil no decorrer da variabilidade dos parâmetros estudados. Tal variação, por provocar alteração no regime pluviométrico influencia diretamente no volume de recarga do SAB, por ser um aquífero de baixa profundidade. Parâmetros associados às fontes de poluição, como o Nitrato, podem ser encontrados em maiores concentrações nos períodos chuvosos, pois são carreados e percolam no solo. Parâmetros associados à composição geológica local, como Cálcio, e Magnésio, são encontrados em maiores concentrações em períodos de seca. Como consequência desses últimos, eleva-se a condutividade elétrica da água, a qualidade de sólidos totais dissolvidos, e a dureza.

## REFERÊNCIAS

- ALSUHAIMI, A. O.; ALMOHAIMIDI, K. M.; MONANI, K. A. Preliminary assessment for physicochemical quality parameters groundwater in Oqduş Area, Saudi Arabia. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2016.12.002>>. Acesso em: 7 set. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUAS – ANA. 2018. **Informações hidrológicas projetos e programas**. Águas subterrâneas. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/agua-subterranea>>. Acesso em: 18 maio 2018.
- AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V. **Abordagens espaciais em estudos de população: métodos analíticos e técnicas de representação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2017. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1636348/>>. Acesso em: 29 jan. 2018.
- ATTARD, G. et al. Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 572, p. 986-994, 2016.
- BARCHA, S. F. **Ocorrência de vanádio no Aquífero Botucatu**. 1998. p. 1-6. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/22242>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- BARISON, M. R. **Estudo hidroquímico na porção meridional do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. 2003. 153 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.
- BARISON, M. R.; KIANG, C. H. **Parâmetros hidrogeoquímicos regionais do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. 2004. p. 1-22. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/viewFile/23569/15647>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- BODRUD-DOZA, M. D. et al. Characterization of groundwater quality using water evaluation indices, multivariate statistics and geostatistics in central Bangladesh. **Water Science**, Oxford, v. 30, n. 1, p. 19-40, 2016.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39-46.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. **Qualidade de águas superficiais**. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 053, de 18 mar. 2005, p. 58-63.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 396. **Qualidade de águas subterrâneas**. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 66, de 07 abr. 2008, Seção 1, p. 64-68, 2008.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações, In: CÂMARA, G. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1-36.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, H. C. N. S. **Caracterização e cartografia das províncias hidrogeológicas do estado de São Paulo**. 1993. 177 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CAMPOS, H. C. N. S. **Contribuição ao estudo hidrogeológico do grupo Bauru no estado de São Paulo**. 1987. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

CAMPOS, J. E. et al. Carta Hidrogeológica do Estado de São Paulo (Brasil) na Escala 1: 1.000.000-Resultados Parciais. **Águas Subterrâneas**, 2000. p. 1 – 17.

CARVALHO, M. A. C. et al. Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the Southern Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 184, n. 1, p. 207-2015, 2018.

CASTRO, J. S. O. et al. Potabilidade das Águas Subterrâneas para o Consumo Humano na Área do Polo Industrial de Barbacena-Pára. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 2921-2934, 2014.

CASTRO, S. C. S. et al. Contaminação por água subterrânea em São José do Rio Preto (SP): Contaminação por nitratos. 1992. p. 103-106. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24154/0>>. Acesso em: 04 set. 2018.

CEPAGRI. Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima do municípios paulistas – classificação de Koeppen**. Disponível em <<https://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade de águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2004-2006**. São Paulo: CETESB, 2007.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2010-2012**. São Paulo: CETESB, 2013. p. 1-241. Série Relatórios.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade das águas superficiais do Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2015. p. 1-53. Apêndice D - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas subterrâneas**. 2016. Disponível em <<http://aguassubterraneas.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 7 set. 2017.

CPTEC/INPE - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS/INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento clima**. 2017. Disponível em <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>>. Acesso em: 9 dez. 2017.

- COSTA, P. S. F. Avaliação da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do rio Capivari no município de Chapada do Norte–MG. **Caderno de Geografia**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 195-211, 2016.
- DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA. ESTUDO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Regiões administrativas 7, 8 e 9 (Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba)**. São Paulo: DAEE, 1976. v. 3.
- DESIGN. Gamma. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences**. Version7. Plainwell, MI. Gamma Design, 2005. 159 p.
- DEUTSCH, C. V; PYREZ C. **Geostatistical reservoir modeling**. New York: Oxford University Press, 2014. 377 p.
- DUQUE, J.; ALMEIDA, C. Caracterização hidroquímica do sistema aquífero dos Gabros de Beja. 1998. p. 1-14. Disponível em: < <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/164.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- FALEIRO, G. F.; ANDRADE, S. R. M. **Encontro de jovens talentos da Embrapa Cerrados**, Planaltina, DF: Embrapa, 2007. v. 1, 2007. 85 p.
- FARIAS, D. S. C. R.; FARIAS, S. A. R.; NETO, J. D. Avaliação de água de poços tubulares para consumo humano no Município de Boa Vista, Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n. 5, p. 08-14, 2016.
- FEIJOO, A. M. L. C. **A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010. 64 p.
- FERNANDES, L. A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. 1998. 216 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- GIAFFERIS, G. P.; OLIVEIRA, E. L. **Investigação da qualidade das águas subterrâneas do Município de Bauru**. 2006. p. 1-10. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23047/15171>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU - Núcleo de Estudos Estatísticos e Biomédicos, 2004. 77 p.
- HANKE, J. R.; FISCHER, M. P.; POLLYEA, R. M. Directional semivariogram analyses to identify and rank controls on the spatial variability of fracture networks. **Journal of Structural Geology**, New York, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.012>>. Acesso em: 09 dez 2017.
- HASSUDA, S. **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru**. 1989. 92 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1989.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

KIANG, C. H.; STRANDIOTO, M. R.; SILVA, F. P. **Tipos hidroquímicos do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. 2016. p. 224-246. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28005>>. Acesso em: 04 set. 2018.

LEPRI, F. G. **Espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua como ferramenta analítica para o desenvolvimento de método para determinação de níquel e vanádio por espectrometria de absorção atômica em forno de grafite em amostras de óleo cru**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Florianópolis, 2005.

LIBERA, N. D. et al. Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater. **Science of the Total Environment**, v. 598, p. 330-340, 2017.

LIMA, A. C. P. et al. **Avaliação das concentrações de bário e chumbo em águas do aquífero freático do entorno do centro industrial do Subaé – Feira de Santana-BA**. 2010. p. 1-11. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22914/15055>>. Acesso em: 04 set. 2018.

LISBÔA, E. G.; CARVALHO, J. M. C.; MENDES, R. L. R. O uso da geoestatística na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos para compor o mapa de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 188-199, 2016.

MACEDO, L. G. M. et al. **Geoestatística aplicada a Hidrogeologia para confecção de mapas potenciométricos**. 2014. p. 11-12. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28270>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MATOS, B.; PACHECO, A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22635/14860>>. Acesso em: 04 set. 2018. p. 1-21.

MAZZINI, F. **Hidrogemoquímica do aquífero Bauru no área Urbana do Município de Marília (SP)**. 56 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98298/mazzini\\_f\\_me\\_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98298/mazzini_f_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 04 set. 2018.

MENDONÇA, J. L. G.; GUTIERRE, T. M. C. **O potencial hidrogeológico do grupo Bauru no Estado de São Paulo**. 2000. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24338>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MIRANDA, C.; PARANHOS FILHO, A. C.; LASTORIA, G. **Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria**. 2015. p. 1923-1928. Disponível em: <<http://livrozilla.com/doc/1603102/aplica%C3%A7%C3%A3o-da-geoest%C3%A1tistica-no-estudo-da-variabilidade-es>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MOREIRA, S. G. et al. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. - 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v25n1/08.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2018.



- NAGHETTINI, M. Mananciais superficiais: aspectos quantitativos. In: HÉLLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2006. p. 223-274.
- NIAZI, A.; BENTLEY, L. R.; HAYASHI, M. Estimation of spatial distribution of groundwater recharge from stream baseflow and groundwater chloride. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 546, p. 380-392, 2017.
- OGAWA, A. T.; CAMPOS, H. C. N. S. **Aplicação de análise fatorial para dados hidroquímicos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo**. 1982. p. 335-344. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22418/0>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists**. New York: Springer Science and Business Media, 2012. 219 p.
- OLIVEIRA, J. N. **Ferramental de gestão de águas subterrânea para a cidade de São José do Rio Preto, SP**. 2002. 117 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-11082009-140524/pt-br.php>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- PÁDUA, V. L.; FERREIRA, A. C. S. Qualidade de águas para consumo humano. In: HÉLLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2006. p. 153-222.
- PALMIER, L. R. Mananciais subterrâneos: aspectos quantitativos. In: HÉLLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2006. p. 275-302.
- PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 2. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. 703 p.
- REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; SCHNEIDER, V. E. Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 1-14, 2013.
- RIBEIRO DE SÁ, V. **Aplicação de métodos geoestatísticos no estudo das distribuições espaciais de condutividade hidráulica em áreas do sistema Aquífero Guarani (SAG) e do sistema Aquífero Bauru (SAB) no Estado de São Paulo**. 191 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan: Gamma Design Software, 2004. 159 p.
- ROCHA, C. H. B.; PEREIRA, A. M. Análise multivariada para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 176-187. 2016.

SAHUQUILLO, A. Water Storage and Conjunctive Water Use. In: ZIOLKOWSKA, J. R.; PETERSON, J. M. **Competition for water resources: experiences and management approaches in the US and Europe**, 2017. Cap. 3. p. 382-402.

SANTOS, K. E. L. **Geoestatística e geoprocessamento aplicados à tomada de decisão agroambiental em um sistema de produção de leite a posto intensivo**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-27102017-162650/pt-br.php>>. Acesso em: 04 set. 2018.

SAVAZZI, E. A. **Determinação da presença de bário, chumbo e cromo em amostras de água subterrânea coletadas no Aquífero Bauru**. 74 f. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/60/60134/tde-04062009-164102/pt-br.php>>. Acesso em: 04 set. 2018.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary stactical analysis**. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 441 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, F. de P.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Perfis de referência do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. **Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 127-139, 2003.

SILVA, S. R. **Caracterização hidrogeoquímica dos sistemas Aquíferos Bauru e Guarani no Município de Bauru**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009. Disponível em: < [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/92830/silva\\_sr\\_me\\_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/92830/silva_sr_me_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 04 set. 2018.

SILVA, S. R.; CHANG, H. K. Hidroquímica dos sistemas Aquíferos Bauru e Guarani na região metropolitana de Bauru (SP). **Água Subterrâneas**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 69-84, 2010.

SOUZA, J. R. et al. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **REDE – Revista Eletrônica da Prodema**, Fortaleza, Brasil, v. 8, n. 1, p. 26 a 45, 2014.

TODD, D. K. **Groundwater hydrology**. New York: John Wiley, 1980. 535 p.

TUTMEZ, B.; HATIPOGLU, H.; KAYMAK, U. Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy inference. **Computers and Geosciences**, New York, n. 32, p. 421-433, 2006.

VARNIER, C. et al. Nitrato nas águas subterrâneas do sistema Aquífero Bauru, Área Urbana do Município de Marília (SP). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, n. ½, p. 1-21, 2010.

VASCO, A. N. et al. Avaliação espacial e temporal da qualidade da água na sub-bacia do rio Poxim, Sergipe, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 1, p. 118-130, 2011.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 1995. 243 p.

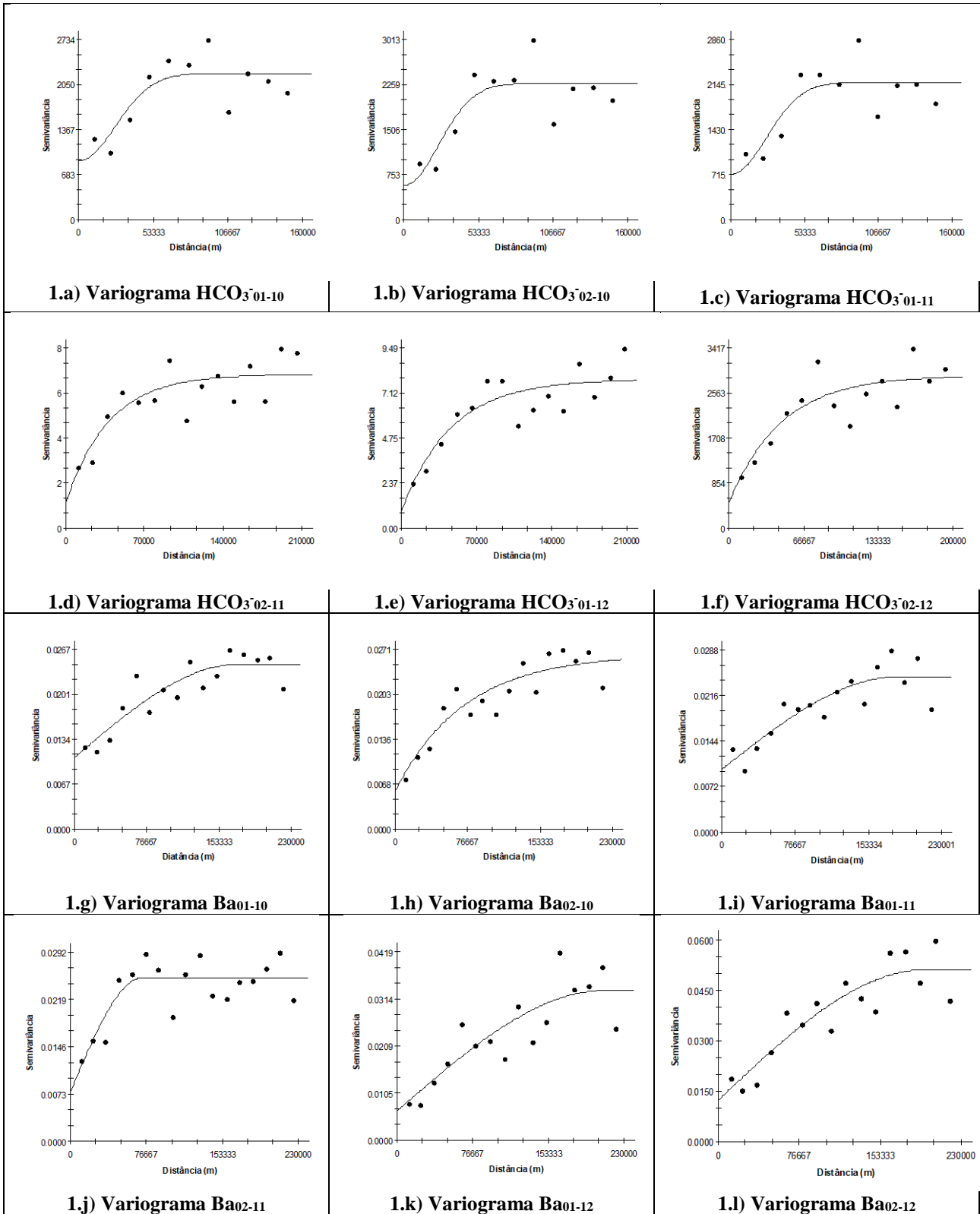
WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Water quality assessments**: a guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. London: [S.n.], 1996. 651 p.

WENDLAND, E.; MARIN, I. S. P. Contaminação de águas subterrâneas. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental**. São Paulo: Elsevier, 2013. Cap. 123, p. 269-293.

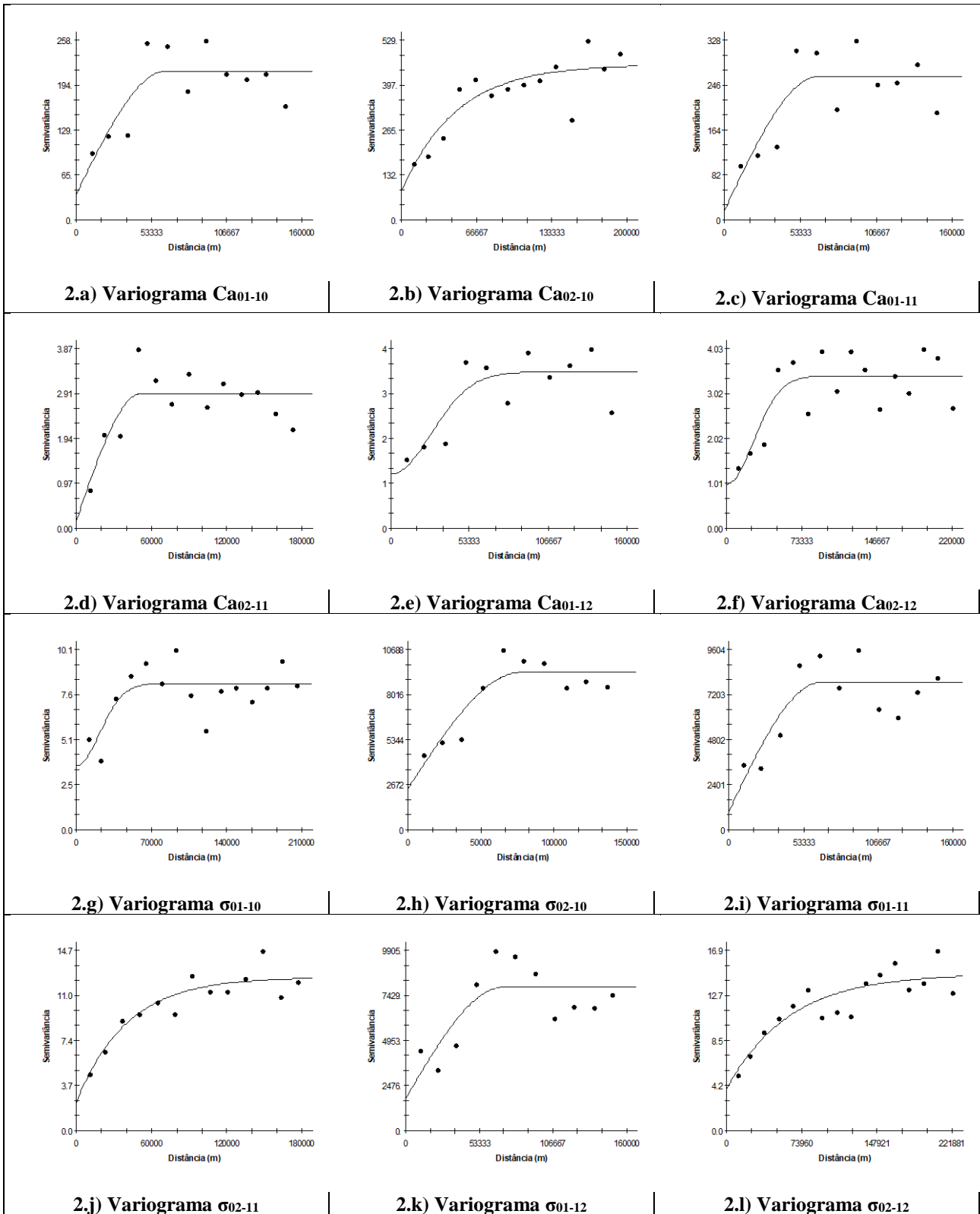
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 215 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Agrônômica), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

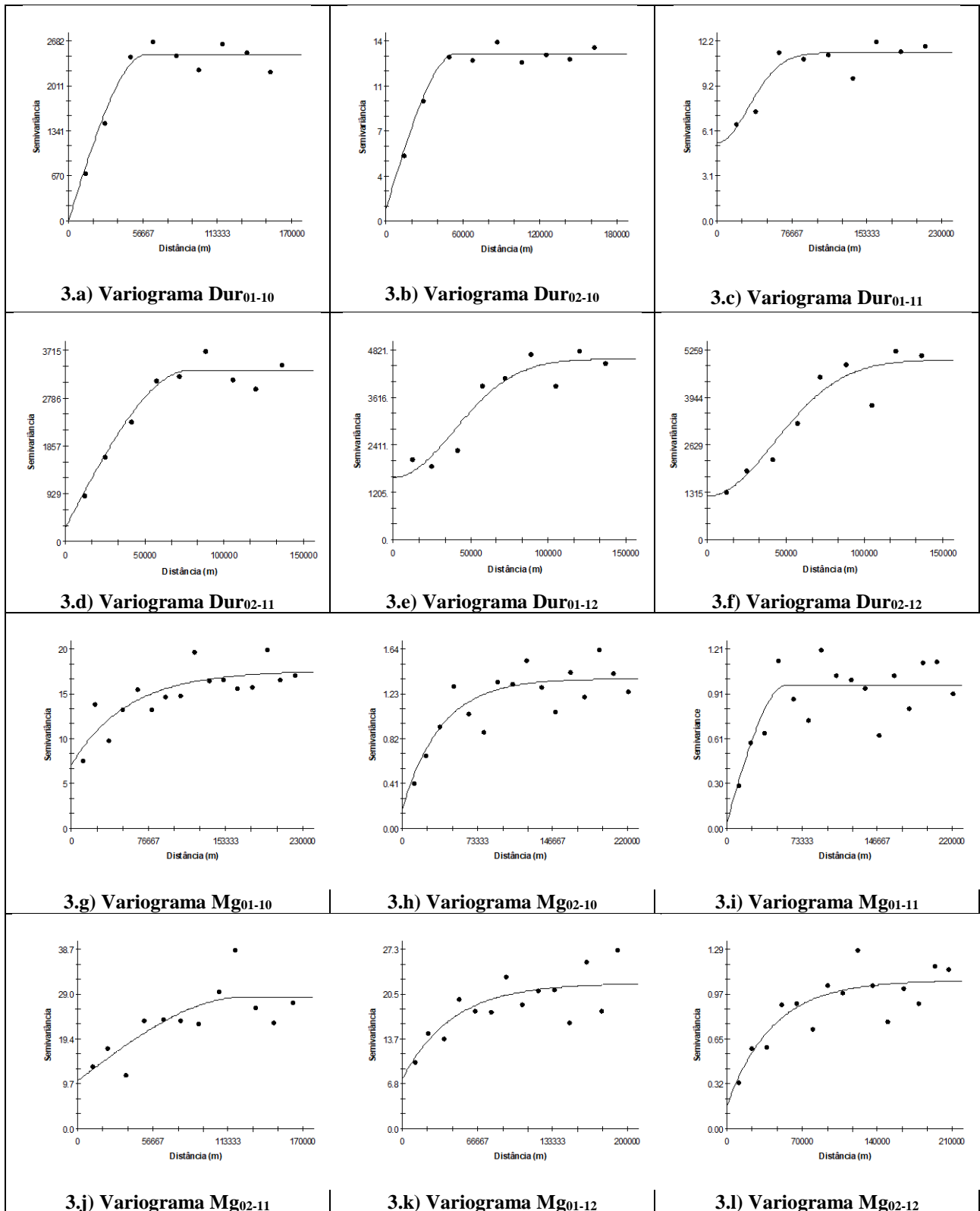
APÊNDICE A – Variogramas de  $\text{HCO}_3^-$  e Ba



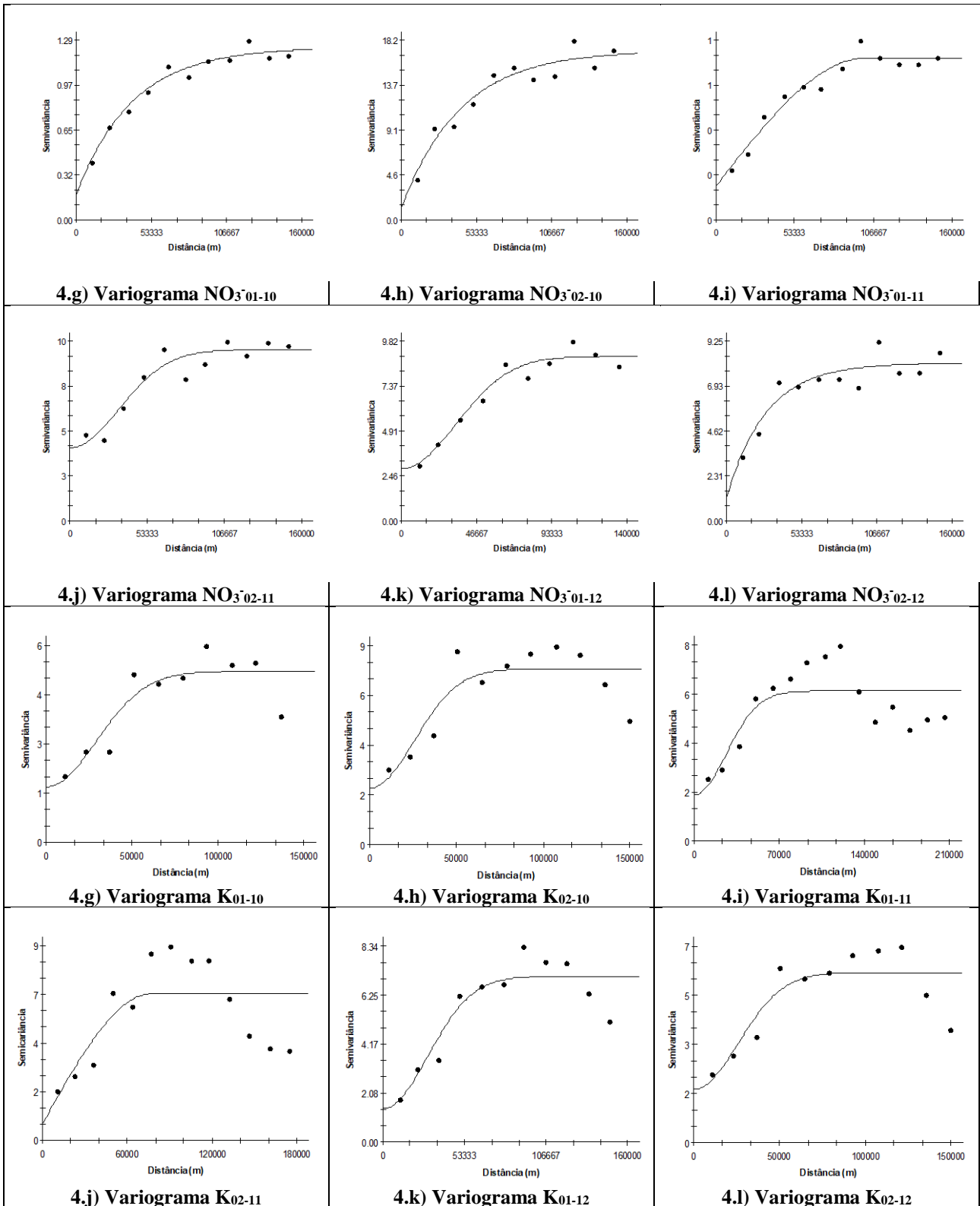
APÊNDICE B – Variogramas de Ca e  $\sigma$



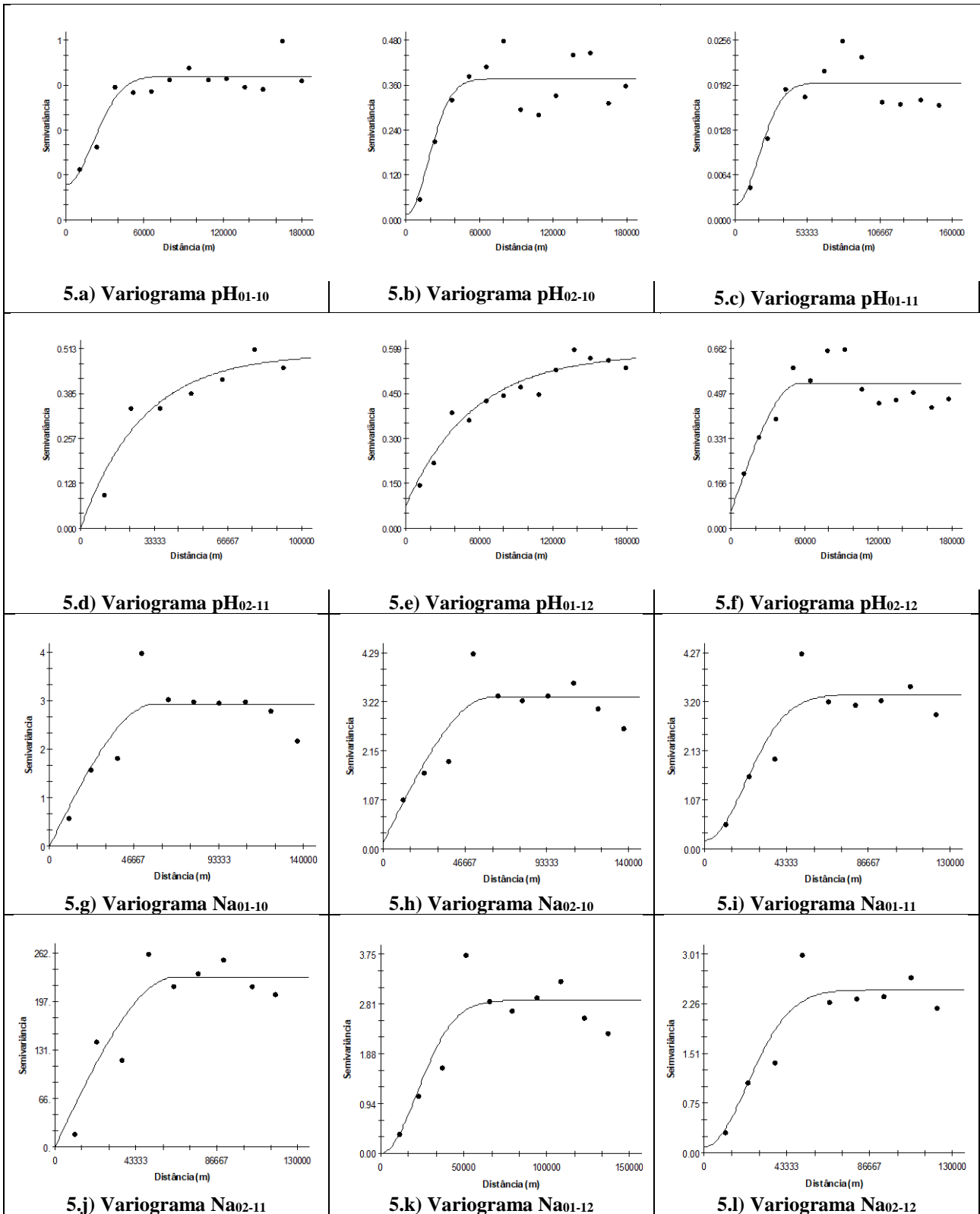
APÊNDICE C – Variogramas de Dur e Mg



APÊNDICE D – Variogramas de  $\text{NO}_3^-$  e K

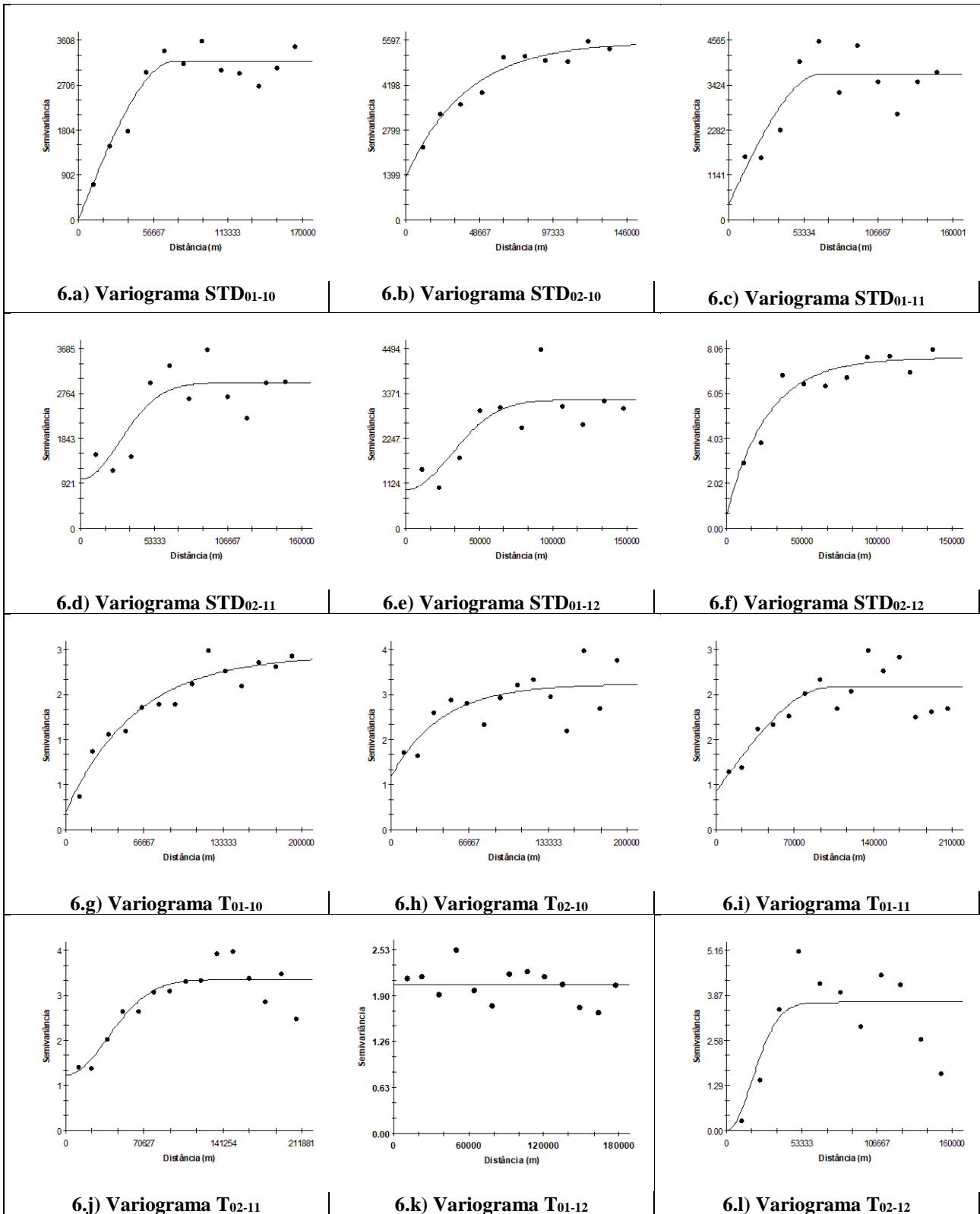


APÊNDICE E – Variogramas de pH e Na

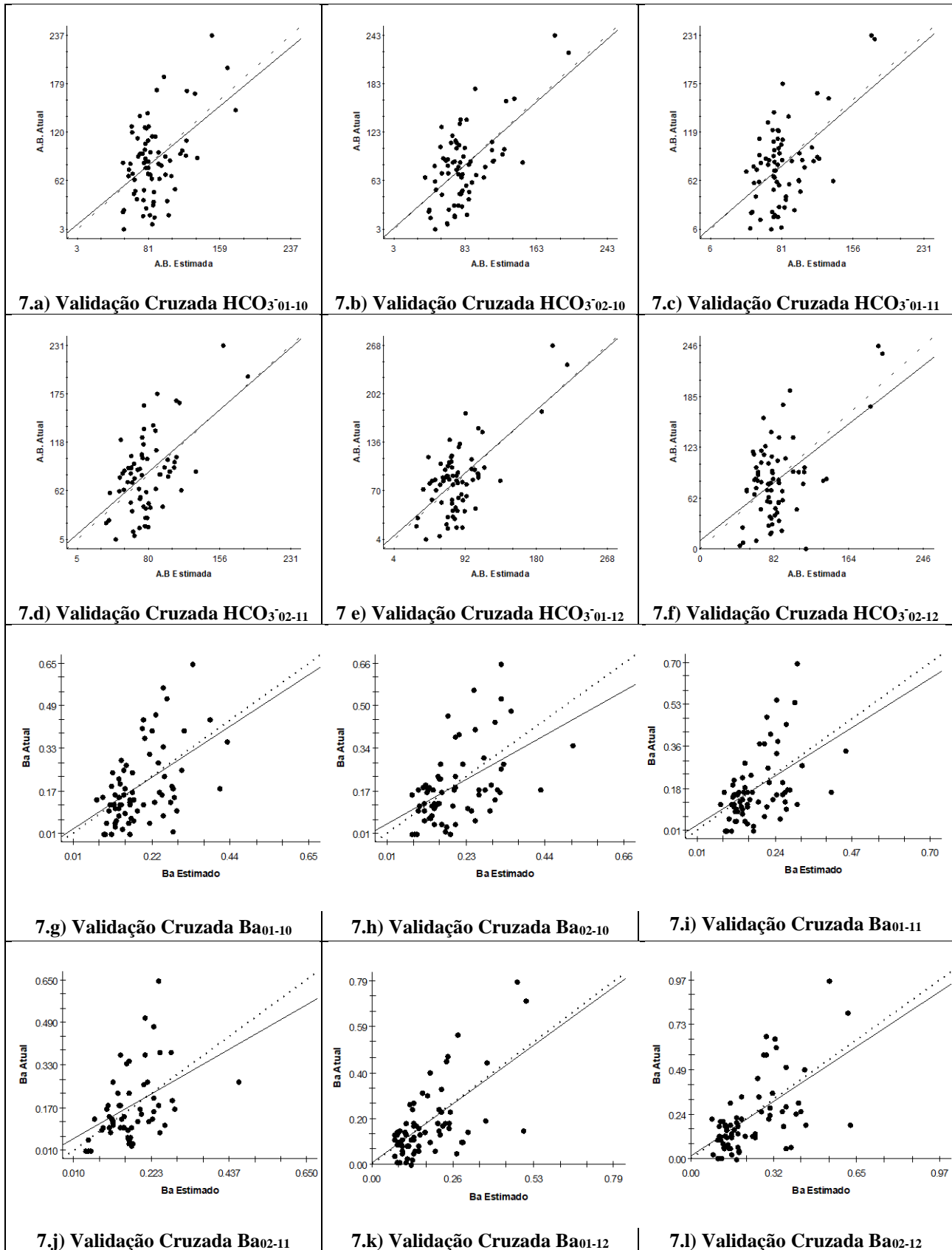




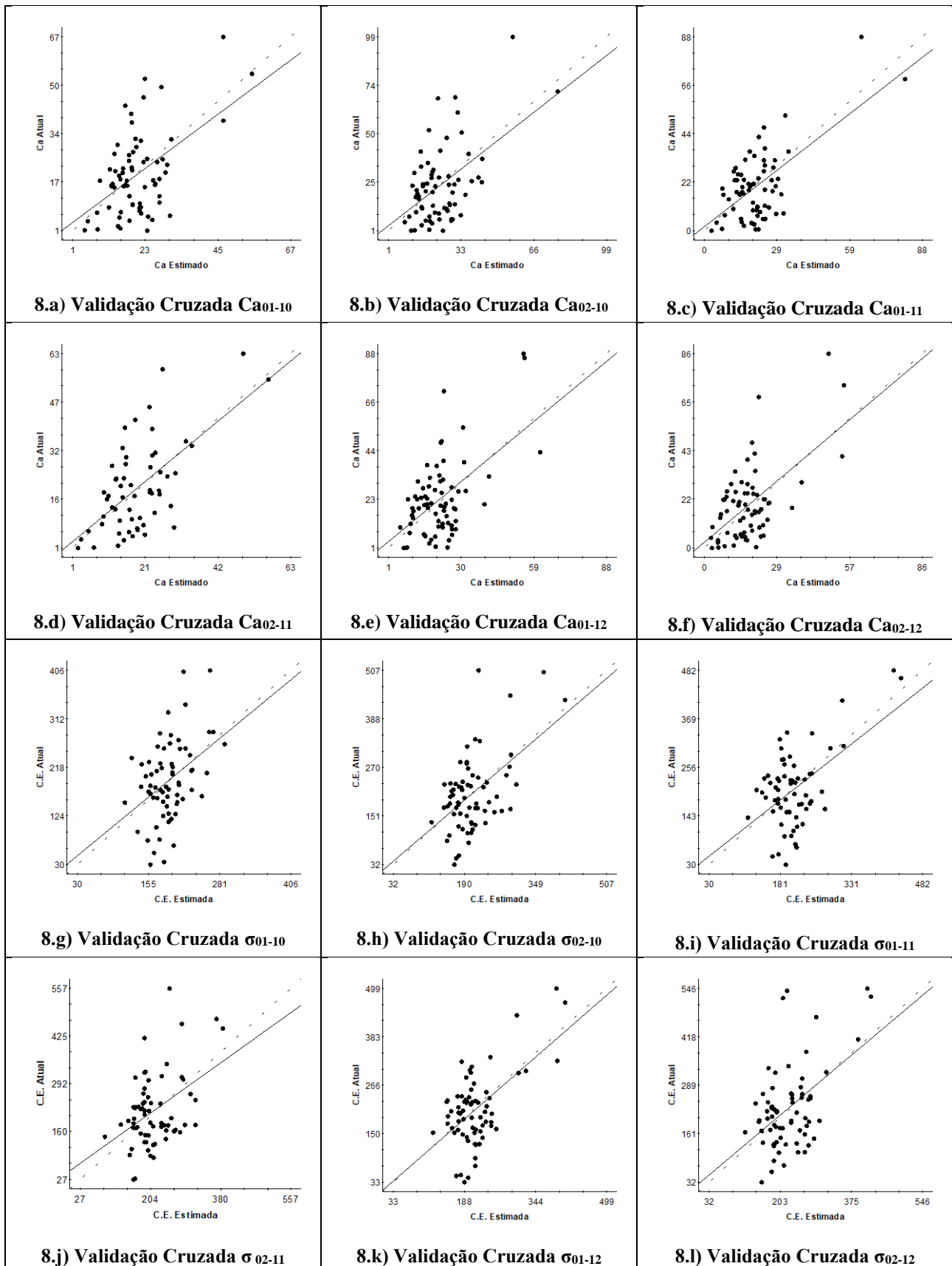
APÊNDICE F – Variogramas de STD e T



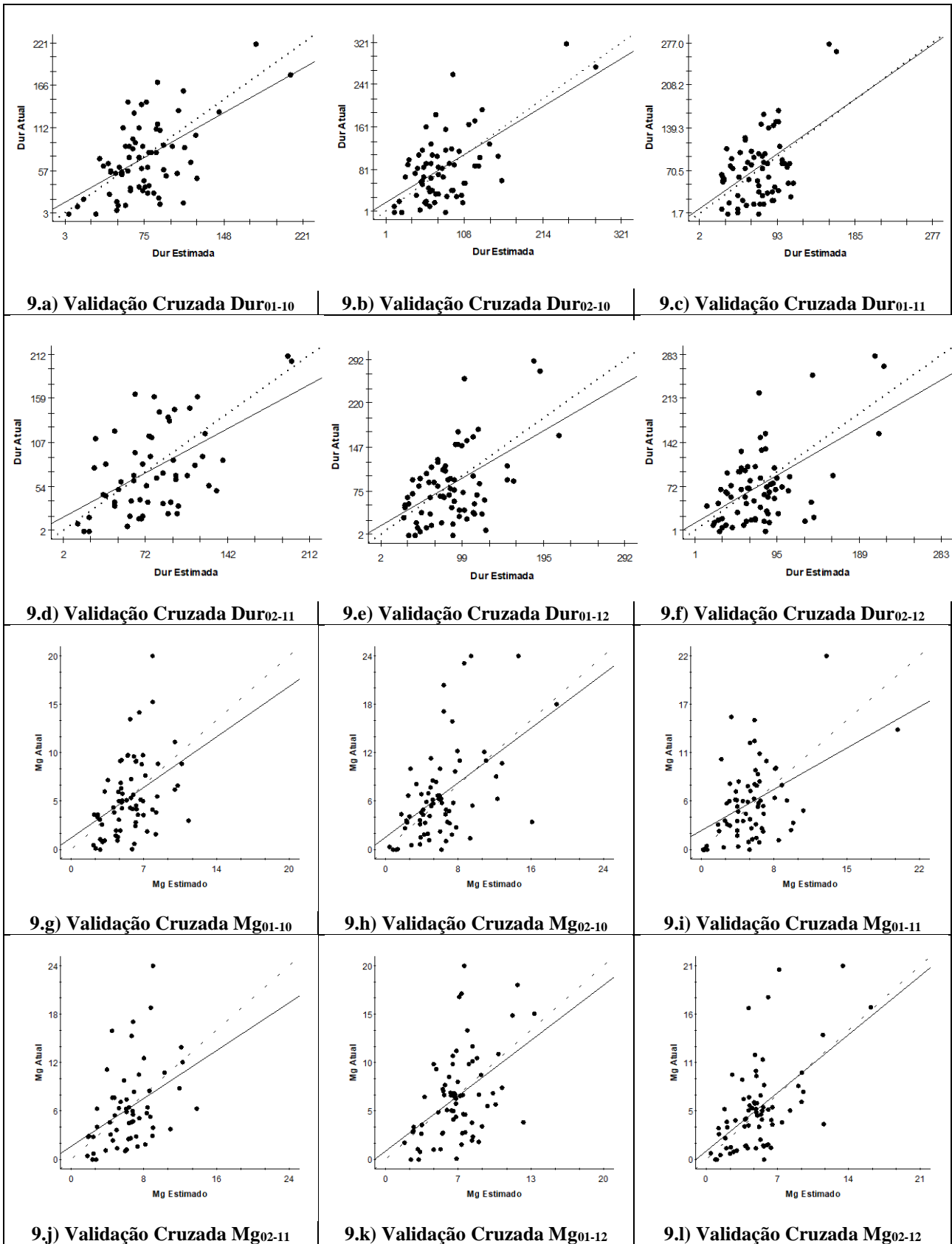
## APÊNDICE G – Validações Cruzadas de $\text{HCO}_3^-$ e Ba



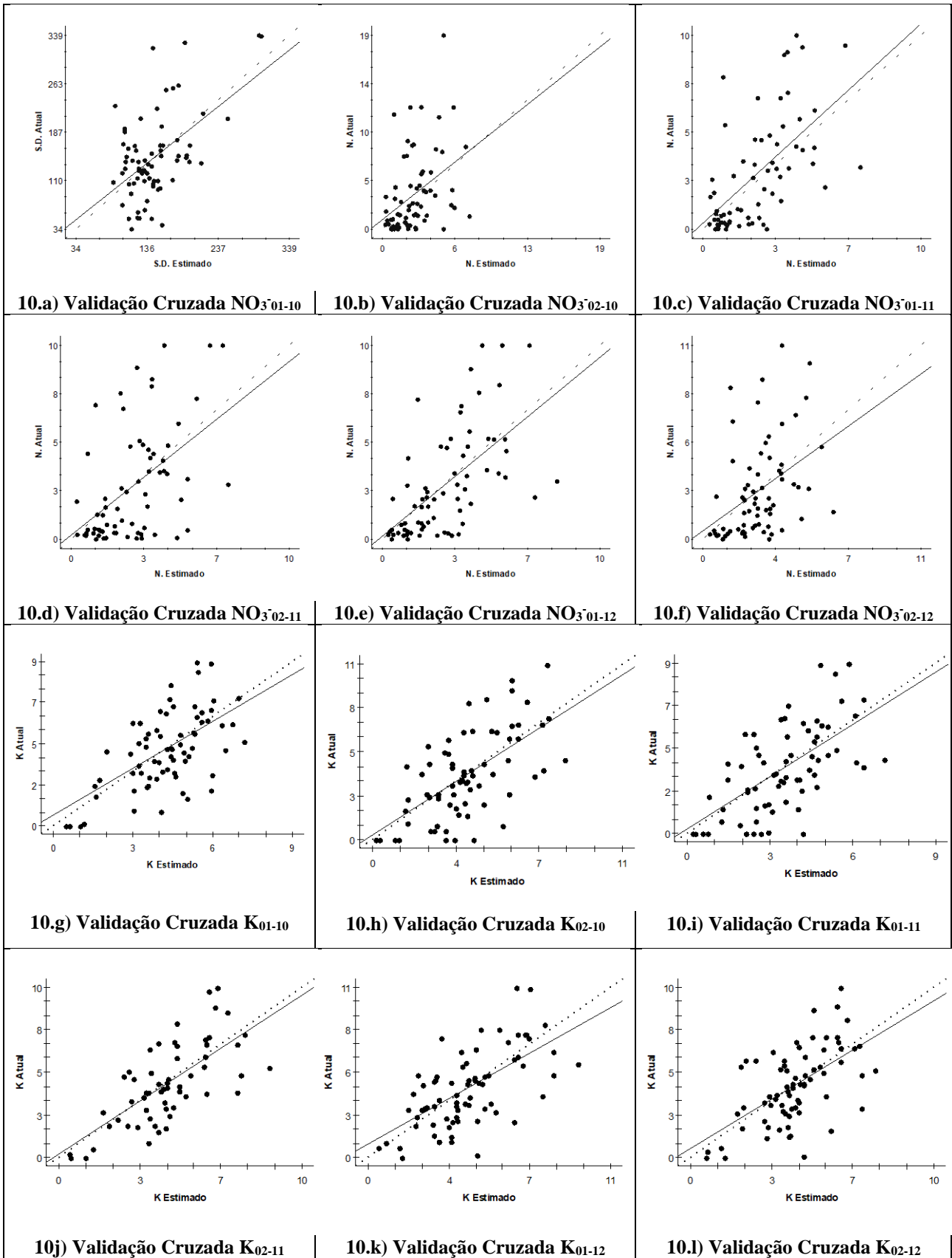
## APÊNDICE H – Validações Cruzadas de Ca e $\sigma$



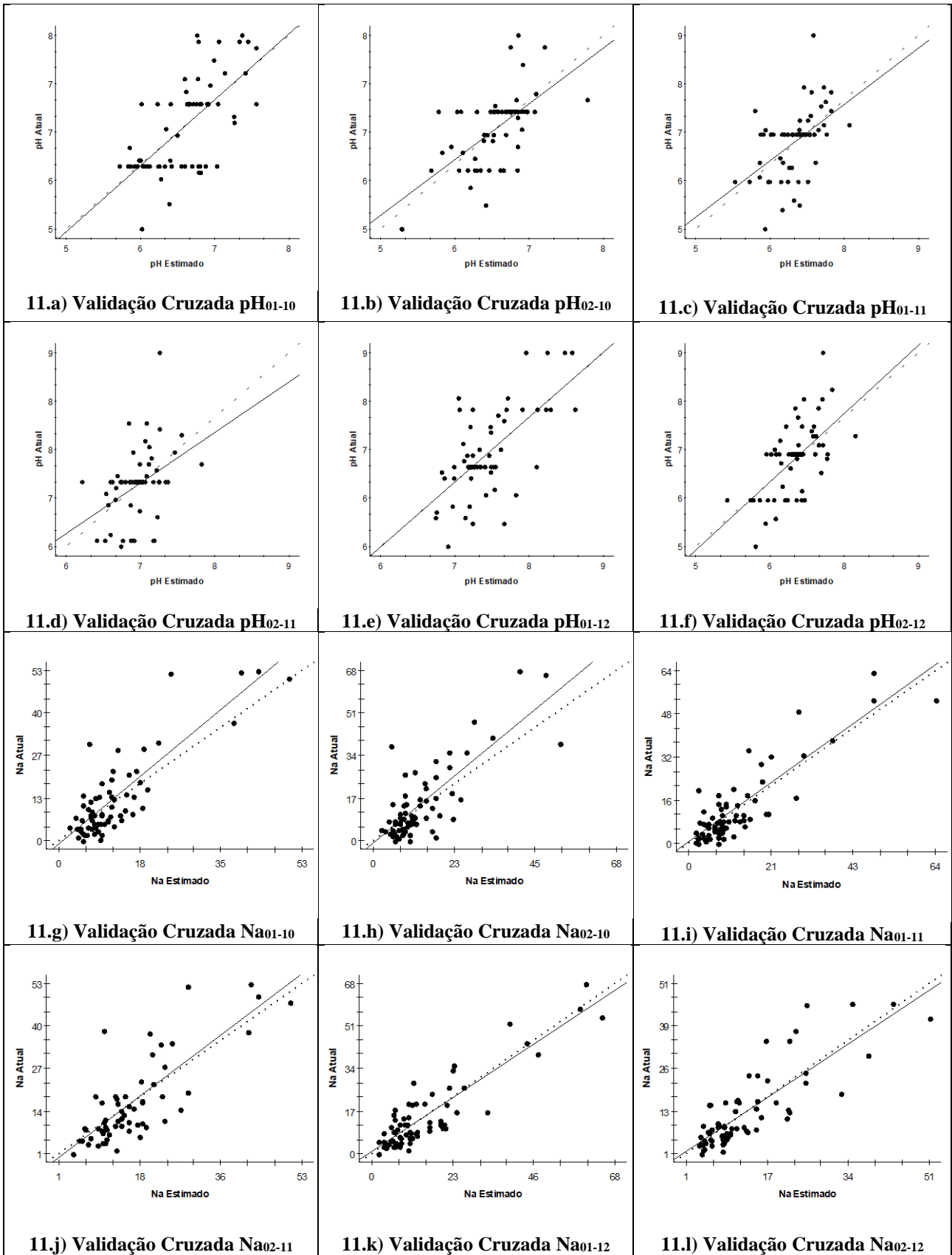
APÊNDICE I – Validações Cruzadas de Dur e Mg



APÊNDICE J – Validações Cruzadas  $\text{NO}_3^-$  e K



**APÊNDICE K – Validações Cruzadas pH e Na**



**APÊNDICE L- Validações Cruzadas STD e T**

