



Análise estatística multivariada da qualidade da água subterrânea em projeto pioneiro de encapsulamento de resíduos sólidos: caso da rodovia BR-448/RS

Luis Adriel Pereira¹, Letícia Frantz², Catarina Muñoz³,

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (luisadrielp@gmail.com)

²Serviços Técnicos de Engenharia – STE (leticia@stesa.com.br)

³Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT

Resumo

Para a implantação da Rodovia BR-448 entre os municípios de Sapucaia do Sul e Porto Alegre foi necessário executar um projeto técnico para disposição final adequada dos resíduos sólidos removidos de áreas de ocupação irregular, o qual consistiu na construção e monitoramento de duas células de encapsulamento geotécnico. Foram monitorados 10 parâmetros da qualidade das águas subterrâneas em 16 campanhas mensais de amostragem, realizadas mensalmente em 5 poços piezométricos, entre dezembro de 2013 e março de 2015. Para análise dos resultados, utilizaram-se técnicas de estatística multivariada, devido à elevada variabilidade dos dados obtidos. Os resultados indicaram que os parâmetros que apresentaram os maiores percentuais da variância explicada pelo modelo fatorial foram aqueles associados à composição mineral do aquífero local (Fator 1). Os parâmetros notadamente relacionados a possíveis fontes de poluição antrópica (Coliformes e DBO) não apresentaram relevância estatística para explicar a variância observada nos dados.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas. Células de Encapsulamento. BR-448.

Área Temática: Recursos Hídricos

Multivariate statistical analysis of groundwater quality in a pioneer project of solid waste encapsulation: case of highway BR-448/RS

Abstract

For the implementation of the Highway BR-448 between the cities of Sapucaia do Sul and Porto Alegre, it was necessary to carry out a technical project for adequate final disposal of solid wastes removed from areas of irregular occupation, which consisted in the construction and monitoring of two geotechnical encapsulation cells. Ten parameters of groundwater quality were monitored in 16 monthly sampling campaigns, held monthly between december 2013 and march 2015. To analyze the results, multivariate statistical techniques were used, due to the high variability of the data obtained. The results indicated that the parameters that presented the highest percentages of the variance explained by the factorial model were those associated to the mineral composition of the local aquifer (Factor 1).

The parameters notably related to possible sources of anthropogenic pollution (Coliform and BOD) were not statistically relevant to explain the variance observed in the data.

Key words: Groundwater. Encapsulation Cells. BR-448.

Theme Area: Hidrical resources



1 Introdução

A construção da BR-448, também conhecida como Rodovia do Parque trata-se de uma importante obra rodoviária realizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que teve por finalidade amenizar o intenso fluxo de veículos na BR-116.

O segmento da obra denominado Lote 3, situado no município de Canoas, interceptou uma área antropizada caracterizada por uma ocupação irregular (constituída por 599 famílias) conhecida como Vila Dique, que leva este nome por localizar-se sobre o dique que compõe o sistema de proteção contra as cheias do município de Canoas (STE, 2007).

Os moradores desta comunidade viviam em situação de risco social, sem condição de saneamento e qualidade de vida adequada, utilizando como principal meio de subsistência a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) para a separação e venda do material reciclável. Os materiais rejeitados no processo de separação dos resíduos eram depositados diretamente no entorno das moradias, atingindo as margens dos corpos hídricos e, em alguns pontos, o Parque Estadual Delta do Jacuí, sem qualquer medida de controle. Como consequência, formou-se um cenário de extrema degradação ambiental, resultando na formação de vários focos de poluição a céu aberto, com a presença de elevada quantidade de RSU. Com o reassentamento dessas famílias em decorrência das obras de implantação da Rodovia, foi necessário estudar a viabilidade de alternativas para destinação final de cerca de 40 mil toneladas de resíduos sólidos dispostos irregularmente na área.

Inicialmente, realizaram-se amostragens para caracterização desses resíduos, as quais apresentaram predominância de resíduos plásticos (40%), misturados a fração pouco representativa de matéria orgânica (4,7%) e elevado percentual de solo (55,3%).

A partir desses resultados e, após a análise de diferentes possibilidades para a disposição final desses resíduos, a construção de duas células de encapsulamento incorporadas às bermas de equilíbrio da Rodovia foi a alternativa que se apresentou mais viável, tanto em relação aos aspectos técnico-econômicos quanto socioambientais, sendo o projeto técnico aprovado e licenciado pelo Órgão Ambiental Estadual (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – FEPAM).

Conforme previsto no licenciamento ambiental do projeto, foram monitorados 10 parâmetros da qualidade das águas subterrâneas em 16 campanhas mensais de amostragem, realizadas mensalmente em 5 poços piezométricos, no período compreendido entre dezembro de 2013 e março de 2015, de modo a verificar possíveis alterações na qualidade das águas subterrâneas decorrentes da execução das células.

2 Metodologia

Solução de projeto adotada – Células de encapsulamento geotécnico

Para a destinação final dos resíduos originados com o reassentamento das famílias da Vila do Dique, foram projetadas duas células (célula 01 – 700m ext.; célula 02 – 340m ext.), ambas localizadas no Lote 3 da BR-448. Foi prevista a construção das células junto à margem esquerda da Rodovia, ou seja, a montante do corpo de aterro da Rodovia. A localização das células foi definida em função da topografia local e do greide do aterro, considerando ainda a concentração dos resíduos em trechos próximos, minimizando os impactos referentes ao transporte e facilitando o monitoramento a ser realizado.

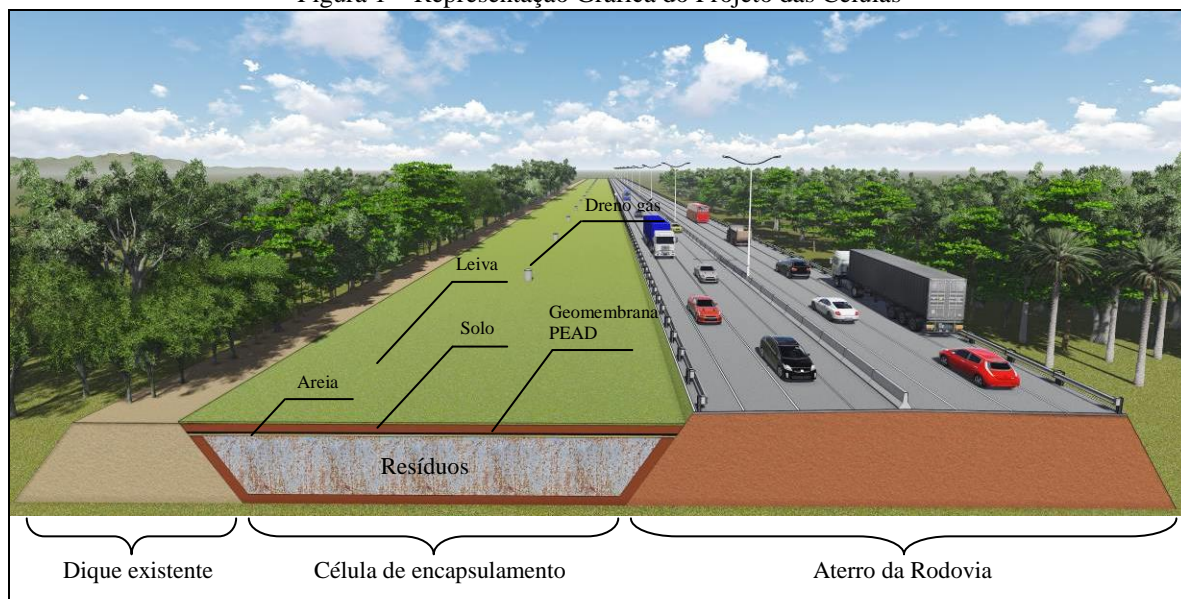
Além de manter o passivo na área de influência do empreendimento, a solução teve por finalidade confinar o maciço de resíduos entre a Rodovia e o dique existente, contribuindo para a estabilidade geotécnica, sendo que os métodos construtivos propostos consideraram os constituintes comumente utilizados em projetos de aterros sanitários.

Na Figura 1 a seguir é apresentada a representação gráfica da concepção de projeto



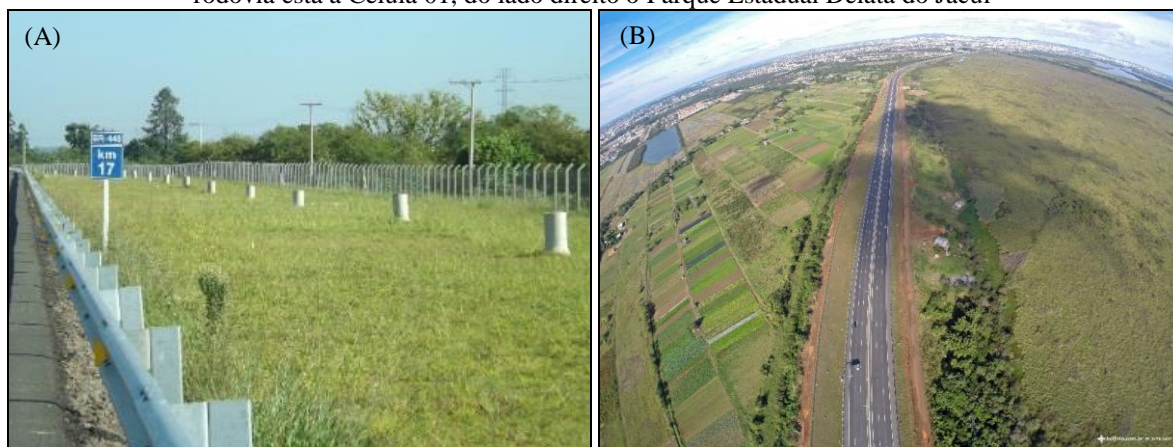
adotada.

Figura 1 – Representação Gráfica do Projeto das Células



Fonte: Autores do trabalho

Figura 2 – (A) Vista geral da Célula 01 finalizada. (B) Foto aérea BR-448 em operação. Lado esquerdo da rodovia está a Célula 01, do lado direito o Parque Estadual Delata do Jacuí



Fonte: Autores do trabalho

Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas

As atividades de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas foram executadas por equipe técnica da gestora ambiental da BR-448 através de campanhas mensais realizadas em 5 poços piezométricos, sendo 1 a montante (P1M) e 4 a jusante (P2J, P3J, P4J e P5J), entre dezembro de 2013 e março de 2015, totalizando 16 campanhas de monitoramento, onde foram monitorados os parâmetros Temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD), Alcalinidade total (At), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais (ST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Cloretos (Cl⁻) e Coliformes Termotolerantes. A localização das células e dos piezômetros é apresentada na Figura 2.



Figura 3 – Localização das células e poços piezométricos.



Fonte: Autores do trabalho

Considerando-se que dados de qualidade da água apresentam elevada variabilidade, fez-se necessário, além da usual análise de estatística descritiva, a utilização de métodos de avaliação estatística multivariada, de modo a compreender melhor o conjunto complexo de dados originados por diferentes variáveis possivelmente interdependentes. Foram utilizados dois métodos multivariados, a saber: a Análise dos Componentes Principais (ACP) e a Análise Fatorial (AF).

A ACP consiste numa técnica matemática que possibilita classificar e estabelecer correlações entre elementos de uma população, partindo-se do princípio de que haja influência de um conjunto de variáveis interagindo concomitantemente em um determinado fenômeno. Inicialmente, o que se obtém da transformação das “p” variáveis originais correlacionadas são “p” componentes principais (CPs). Assim, a maior parte desta variabilidade pode ser explicada por um número menor “k” de componentes principais ($k < p$), reduzindo-se o número de variáveis do problema em questão, perdendo no processo a menor quantidade de informação possível (FRANÇA, 2009).

A AF tem objetivos semelhantes aos da ACP, visto que visa reduzir a dimensão de dados multivariados e a melhor compreensão do relacionamento existente entre as variáveis. Enquanto a ACP acomoda toda a estrutura contida nos dados e descreve a máxima variância de todas as variáveis, a AF descreve as intercorrelações máximas existentes entre as variáveis, o que resulta em fatores baseados apenas na variância comum, sendo que as variáveis não comuns não entram no modelo (TRINDADE, 2013).

A análise multivariada foi realizada com auxílio do software SPSS – Statistical



Package for Social Science (versão demo) –, onde foram extraídos os componentes principais dos dados obtidos do monitoramento dos cinco poços, reduzindo o número de variáveis não correlacionadas que conseguem representar a estrutura dos dados amostrados e o maior percentual da variância encontrada nos mesmo, eliminando informações redundantes.

3 Resultados

O banco de dados analisado contém 960 observações, distribuídas em 5 poços de monitoramento e 10 parâmetros. Para uma análise exploratória global dos parâmetros (variáveis) monitorados nos 5 poços instalados, inicialmente calcularam-se a média, desvio padrão (Dp), variância (Var) e coeficiente de variação (CV) (Tabela 1). Os resultados médios obtidos ficaram próximos aos valores da campanha de monitoramento inicial, a qual corresponde à caracterização inicial da região de inserção do projeto.

Tabela 1 – Estatística descritiva global dos parâmetro para os 5 piezômetros.

Parâmetros	Média	Dp	Var	CV
Temperatura	22,54	2,05	4,22	0,1
pH	5,21	0,92	0,85	0,2
Condutividade Elétrica	943,49	555,26	308317,20	0,6
Oxigênio Dissolvido	2,76	0,76	0,58	0,3
Alcalinidade Total	73,06	47,79	2283,96	0,7
Cloretos	101,54	96,01	9217,03	0,9
Demanda Bioquímica de Oxigênio	2,19	2,08	4,32	1,0
Sólidos Dissolvidos Totais	660,59	320,29	102583,11	0,5
Sólidos Totais	1019,86	1201,48	1443545,13	1,2
Coliformes Termotolerantes	454,67	1314,23	1727203,07	2,9

Fonte: Autores do trabalho

Para verificar se a análise através da ACP/AF é adequada à matriz de dados, inicialmente foi realizado o Teste de Esfericidade de Bartlett, conforme descrito por França (2009). Para tanto foi utilizado o resultado da Medida de Adequacidade de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), indicando se a AF é adequada a análise das 10 variáveis (parâmetros monitorados). Valores de KMO entre 0,5 e 1,0 indicam que o uso da AF é apropriado. O valor KMO obtido na análise foi igual a 0,65.

Para evitar possíveis incoerências devido à diferença de unidades e escalas dos valores medidos, são obtidos da matriz de correlação os autovalores que, em ordem decrescente, definem a importância das componentes principais e explicam a variância apresentada (%) por cada uma, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Variância total explicada.

Componentes	Autovalor	% de variância explicada	% cumulativa
1	3,18	31,77	31,77
2	1,60	16,04	47,81
3	1,33	13,28	61,09
4	0,96	9,62	70,72
5	0,86	8,56	79,28
6	0,66	6,60	85,88



Componentes	Autovalor	% de variância explicada	% cumulativa
7	0,61	6,15	92,03
8	0,44	4,37	96,40
9	0,27	2,71	99,12
10	0,09	0,88	100,00

Fonte: Autores do trabalho

A escolha do número de CP é realizada considerando autovalores maiores que 1, conforme critério proposto por Kaiser (apud FRANÇA, 2009), considerando-se suficiente a variância explicada nos 3 primeiros componentes, os quais representam juntos 61% da variância total.

O resultado das comunalidades dos parâmetros, que representam a porção de variância dos parâmetros distribuída pelos fatores, é apresentado no Tabela 3. É a partir das comunalidades que se definem quais parâmetros podem ser considerados mais relevantes na análise. Assim, considerou-se que parâmetros com comunalidade inferior a 0,70 poderiam ser dispensados das análises (HAIR *et al.*, 2005). No entanto, optou-se pela não exclusão destes, levando-se em conta que apresentam correlação com outros parâmetros, embora menor.

Obtidos os valores das comunalidades e pesos (ou cargas) dos fatores, utilizou-se uma solução proposta por Kaiser (1958), denominada rotação varimax, a qual consiste na transformação ortogonal utilizada em álgebra matricial para rotacionar os eixos com os fatores (TRINDADE, 2013). A Tabela 3 exibe as cargas dos 3 fatores após ser realizada a rotação.

Tabela 3 – Matriz de peso dos parâmetros em cada fator e comunalidades.

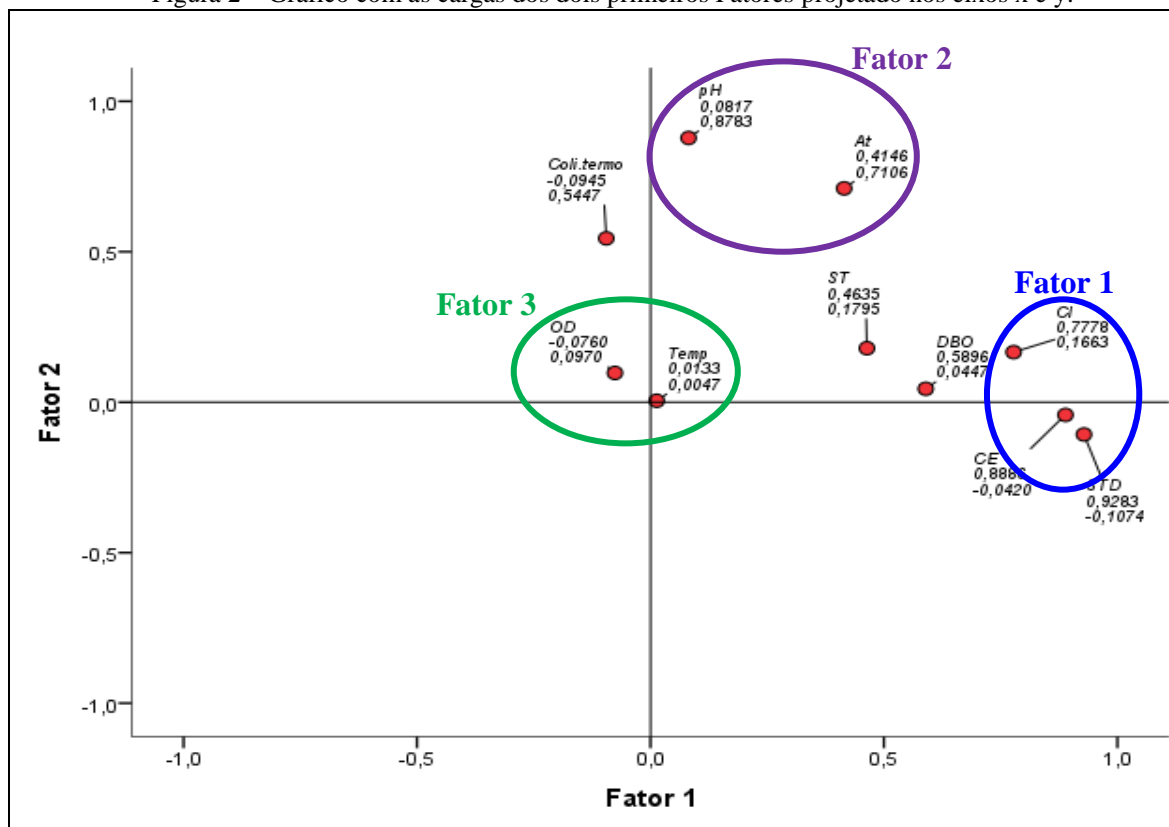
Parâmetro	Comunalidade	Carga dos Fatores		
		Fator 1	Fator 2	Fator 3
Sólidos Dissolvidos Totais	0,87	0,93	-0,11	0,01
Condutividade Elétrica	0,79	0,89	-0,04	0,05
pH	0,78	0,08	0,88	0,05
Alcalinidade Total	0,71	0,41	0,71	-0,17
Temperatura	0,64	0,01	0,00	0,80
Cloretos	0,63	0,78	0,17	0,04
Oxigênio Dissolvido	0,61	-0,08	0,1	0,77
Demanda Bioquímica de Oxigênio	0,49	0,59	0,04	-0,38
Coliformes Termotolerantes	0,32	-0,09	0,54	0,12
Sólidos Totais	0,26	0,46	0,18	-0,13

Fonte: Autores do trabalho

Na Figura 2 é apresentada uma projeção das cargas fatoriais em relação aos dois primeiros fatores.



Figura 2 – Gráfico com as cargas dos dois primeiros Fatores projetado nos eixos x e y.



Fonte: Autores do trabalho

Podem-se observar quais dos parâmetros estão mais proximamente associados a cada um dos fatores, bem como quais medidas são mais semelhantes, refletidas por pontos que são próximos no gráfico, sendo possível agrupá-los por fatores.

Os parâmetros que carregam as maiores cargas nos fatores 1 e 2 alocam-se mais próximo às extremidades do gráfico, sendo que aqueles localizados mais ao centro do gráfico carregam muito pouco em ambos fatores (Fator 3).

Verifica-se que os parâmetros SDT, CE e Cl- destacam-se no Fator 1 com cargas acima de 0,7, caracterizando este fator como “Fator Mineral”, pois envolve variáveis constituintes da fração mineral presente na água subterrânea; No Fator 2 destacam-se o pH e At com as maiores cargas, podendo o fator ser denominado como “Fator Químico”; No Fator 3, menos importante na explicação da variância dos dados, observam-se cargas elevadas para Temperatura e OD, que pode ser caracterizado como “Fator Dissolução de Gases”.

Coincidente com os baixos valores das comunalidades obtidas (<0,50), os parâmetros DBO, ST e Coliformes não apresentaram valores considerados relevantes em nenhum dos fatores, ainda assim, não foram descartados da análise.

Conforme apresentado na Figura 2, observam-se nos fatores 1 e 2 um padrão nas associações dos parâmetros coerente com os fenômenos que ocorrem no ambiente natural. No Fator 1 os pesos altos e positivos apresentados pelos parâmetros SDT, CE e Cl- indicam elevada inter-relação entre eles, e que o aumento de um influencia na elevação do valor do outro, o que é de se esperar, visto que são parâmetros físico-quimicamente relacionados; OD e Coliformes estão negativamente correlacionados, indicando que a diminuição da concentração de OD influencia na redução de coliformes; A diferença entre os sinais das cargas entre OD e DBO indica justamente o contraste existente entre estes, ou seja, com o aumento da DBO ocorre a diminuição da disponibilidade de OD, assim como o aumento da temperatura influencia na diminuição do OD (VON SPERLING, 2005). No Fator 2 destaca-se a elevação



da At em função do aumento do pH.

4 Conclusão

Com base nos resultados obtidos na análise multivariada, verifica-se que os parâmetros que apresentaram os maiores percentuais da variância explicada pelo modelo fatorial foram aqueles associados à composição mineral do aquífero local (Fator 1). Do ponto de vista da análise fatorial, os parâmetros notadamente relacionados a possíveis fontes de poluição antrópica (Coliformes Termotolerantes e DBO) não apresentaram relevância estatística para explicar a variância observada nos dados. Considerando-se que as células estão inseridas em espaço urbano com histórico impacto antrópico decorrente de ocupações irregulares e moradias desprovidas de instalações hidrossanitárias, os resultados indicam que a disposição dos resíduos nas células não influenciou negativamente na qualidade das águas subterrâneas, e que a variabilidade apresentada pelo conjunto de dados decorre de alterações naturais do aquífero local.

5 Referências

FRANÇA, M. S. **Análise Estatística Multivariada dos Dados de Monitoramento de Qualidade de Água da Bacia do Alto Iguaçu: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos**. Curitiba-PR. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

KAISER, H.F. **The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis**. Psychometrika, 23, p. 187- 200, 1958.

Serviços Técnicos de Engenharia S.A. (STE), 2007. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto ao Meio Ambiente da BR-448 – Rodovia do Parque (EIA/RIMA)**. DNIT-CGMAB/STE, 2007.

TRINDADE, A. L. C. **Aplicação de Técnicas Estatísticas para Avaliação de Dados de Monitoramento de Qualidade das Águas Superficiais da Porção Mineira da Bacia do Rio São Francisco**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3.ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.