



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

HIDROGEOFÍSICA E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
ESTUDOS DE CASOS EM ATERROS SANITÁRIOS NA
PORÇÃO SUL DO SISTEMA AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO,
RMS/BA

ROGÉRIO DE JESUS PORCIÚNCULA

SALVADOR

2020

**HIDROGEOFÍSICA E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
ESTUDOS DE CASOS EM ATERROS SANITÁRIOS NA
PORÇÃO SUL DO SISTEMA AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO,
RMS/BA**

Rogério de Jesus Porciúncula

Orientador : Prof. Dr. Luíz Rogério Bastos Leal

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI - UFBA.

P834 Porciúncula, Rogério de Jesus

Hidrogeofísica e resíduos sólidos urbanos: estudos de casos em aterros sanitários na porção sul do sistema aquífero São-Sebastião/ RMS/BA / Rogério de Jesus Porciúncula. – Salvador, 2020.

53 f.

Orientador: Prof. Dr Luiz Rogério Bastos Leal

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, 2020.

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos. 3. Aterro Sanitário. I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDU:556.3

ROGÉRIO DE JESUS PORCIÚNCULA

**HIDROGEOFÍSICA E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
ESTUDOS DE CASOS EM ATERROS SANITÁRIOS NA PORÇÃO
SUL DO SISTEMA AQUÍFERO SÃO SEBASTIÃO, RMS/BA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como 'requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral em 02/12/2020.

TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador – PPPGG/UFBA



Dr. Cristovaldo Bispo dos Santos
Examinador Externo – UFBA e CPRM



Dra. Susana da Silva Cavalcanti
Examinadora Externa – CPGG/UFBA



Dr. Thomas Vincent Gloaguen
Examinador Externo – CETEC/UFRB



Dra. Vânia Eunice Bahia
Examinadora Externa – UFPA

Salvador – BA
2020

*Às águas de mãe Iemanjá, mãe de Ogum,
guerreiro, pai.*

*Água é vida!
E vida é insípida, inodora e/ou incolor?*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES – Código de financiamento 001.

Agradeço à mãe natureza pela matéria, energia e espírito;

Às minhas/aos meus ancestrais Hilda e Reginaldo, Eulina e João, Maria e Florisvaldo...;

Às minhas/aos meus descendentes Indra e Benjamim...;

À minha família e amigas e amigos;

À Universidade Federal da Bahia e ao Instituto de Geociências (IGEO/UFBA), à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia e ao Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas (UFRB/CCAAB), ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA), ao Centro de Pesquisa em Geologia e Geofísica Aplicada (CPGG) e ao Núcleo de Estudos de Impactos da Mineração (NEIM);

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo provimento de bolsa de pesquisa e à CAPES pelo financiamento do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA;

Aos professores Olivar Lima, Hédison Sato, Sandro Machado, Cristovaldo Santos, pelas contribuições e apoios diversos;

À equipe de campo: Michel, Caio Leão, José Mota e ao grande mestre Luiz Medeiros (“in memorian”);

À Banca Examinadora;

Ao meu orientador, Luiz Rogério Bastos Leal, pela confiança, solicitude, amizade e conhecimento compartilhado;

Às pessoas que realizarem leitura deste manuscrito.

RESUMO

O presente trabalho, intitulado “Hidrogeofísica e resíduos sólidos urbanos: estudos de casos em aterros sanitários na porção sul do sistema aquífero São Sebastião, RMS/BA” apresenta os resultados da pesquisa de doutoramento do discente Rogério de Jesus Porciúncula, em atendimento aos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal da Bahia, sob orientação do prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal. Foram produzidos dois artigos científicos publicados na Brazilian Journal of Geophysics, a saber: (i) o primeiro, intitulado “Caracterização geoeétrica para implantação de aterro sanitário, em Simões Filho, Bahia, Brasil”, foi constituído de 12 sondagens elétricas verticais, 02 sondagens SPTs e 01 sondagem geológica. As inversões unidimensionais apresentaram erro médio de 4,1%, e as bidimensionais, de 5,7%. Os fácies geo-elétricos de menores valores foram atribuídos à ocorrência entre a fração siltica a argilosa, e de maiores valores, à ocorrência entre a fração siltica a arenosa. O modelo hidro-estratigráfico alcançado leva à interpretação de que o aquífero local é do tipo confinado, representado por uma sucessão de camadas arenosas e argilosas intercaladas em contato subhorizontal. A água subterrânea ocorre em camadas permoporosas, a partir da cota entre 40 a 50 m, aproximadamente. Nos primeiros 10 m de profundidade, os solos são classificados como médio a rijo; e (ii) o segundo artigo, intitulado “Caracterização hidrogeofísica do sistema aquífero Marizal – São Sebastião, no entorno do aterro sanitário LIMPEC, município de Camaçari, Bahia, Brasil”, revelou a ocorrência de uma anomalia condutiva, possivelmente atribuída à pluma de contaminação, dispersa na zona saturada, apresentando sentido de convecção na direção SSE. As inversões unidimensionais permitiu interpretar o padrão estratigráfico. As inversões bidimensionais tiveram erro médio inferior a 2%, e confirmaram a ocorrência de possíveis plumas de contaminação disseminadas na zona não saturada e dispersas na zona saturada. Os fácies geoeétricos de maiores valores de resistividade foram atribuídos à Formação São Sebastião, os de valores intermediários, à Formação Marizal, e menores valores, a plumas de contaminação e/ou eventuais ocorrências de silte/argila. Os parâmetros porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade foram estimados serem entre 19,2 a 34,2%, 0,11 a $3,37 \times 10^{-3}$ cm/s e 4,7 a 145,6 m²/d, respectivamente; e a vulnerabilidade do aquífero livre local foi classificada como alta.

Palavras-chave: Método geoeétrico, Hidrogeologia, Caracterização geoambiental

ABSTRACT

The present work, entitled “Hydrogeophysics and solid urban waste: case studies in landfills in the southern portion of the São Sebastião aquifer system, RMS / BA” presents the results of the doctoral research of student Rogério de Jesus Porciúncula, in compliance with the requirements of the Pos-graduate Program in Geology, Federal University of Bahia, under the academic guidance of prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal. There were two scientific articles published in Brazilian Journal of Geophysics: (i) the first, entitled “Goelectrical characterization for landfill implantation, in Simões Filho, Bahia, Brazil”, was made up of twelve vertical electrical soundings, two SPT soundings and one geological sounding composed the quantitative surveys and techniques used. Unidimensional inversions presented mean error of 4.1%. Bidimensional inversions presented 5.7% mean error. Lower-value goelectrical facies were attributed to occurrences between the silt and clay fraction, while higher-value facies corresponded to occurrence between the silt and sand fraction. The hydrostratigraphic model included a confined aquifer, represented by a succession of alternating sandy and clay-rich layers with subhorizontal contact. Moreover, water occurred in permeable porous layers, between depths of 40 and 50 m, approximately. Regarding the degree of compactness, soils were classified as medium to hard; and (ii) the second article, entitled “Hydrogeophysical characterization of the Marizal - São Sebastião aquifer system in the surrounding of the LIMPEC sanitary landfill, municipality of Camaçari, Bahia, Brazil”, revealed the occurrence of a conductivity anomaly, possibly attributed to the contamination plume, dispersed within the saturated zone, and presenting a SSE convection direction. The one-dimensional inversions allowed to interpret the stratigraphic model. The two-dimensional inversions produced inverted goelectrical profiles, with a mean error below 2%, and confirmed the occurrence of possible contamination plumes disseminated within the unsaturated zone and dispersed within the saturated one. The goelectrical facies with the highest resistivity values were related to the São Sebastião Formation, with intermediate values to the Marizal Formation, and the lowest values to contamination plumes and/or eventual occurrences of silt/clay. The porosity, hydraulic conductivity and transmissivity parameters were estimated to be between 19.2 to 34.2%, 0.11 to 3.37×10^{-3} cm / s and 4.7 to 145.6 m² / d, respectively; and the vulnerability of the local free aquifer was classified as high.

Keywords: Goelectrical method, Hidrogeology, Geoenvironmental characterization

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	9
CAPÍTULO 2 – ARTIGO 1 - GEOELECTRIC CHARACTERIZATION FOR IMPLANTATION A LANDFILL, IN SIMÕES FILHO, BAHIA, BRAZIL	15
CAPÍTULO 3 -ARTIGO 2 - HYDROGEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE MARIZAL-SÃO SEBASTIÃO AQUIFER SYSTEM IN THE SURROUNDINGS OF THE LIMPEC SANITARY LANDFILL, MUNICIPALITY OF CAMAÇARI, BAHIA, BRAZIL	29
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	45
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DE PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES	47
ANEXO A- REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA	48
ANEXO B – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 1	52
ANEXO C – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2	53

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Hidrogeofísica é um campo de pesquisa multidisciplinar o qual utiliza a Geofísica no estudo de processos e parâmetros hidrogeológicos (NWAKWOALA & UDOM, 2008; BINLEY et al., 2010). A sua aplicabilidade ascendeu nos anos 90 e, cada vez mais, vem se tornando relevante em estudos de caracterização qualitativa e quantitativa de aquíferos. Uma variedade de métodos geofísicos pode ser utilizada para fins hidrogeológicos, porém, os métodos geoeletricos possuem destaque. Além de serem não invasivos, oferecem redução de custos operacionais, maior volume de obtenção de dados e informações em espaço e tempo.

No tocante aos resíduos sólidos - substâncias ou materiais descartados resultantes de atividades humanas em sociedade (BRASIL, 2010), o maior problema pode surgir a partir de como esses resíduos são destinados, podendo vir a contaminar o subsolo e águas subterrâneas. Dessa forma, a Hidrogeofísica pode contribuir na busca de informações essenciais para o auxílio da gestão e de tomadas de decisão referente ao meio hidrogeológico.

Para a maioria dos centros urbanos, a questão da disposição final de resíduos sólidos é um problema recorrente. Conforme a Lei Federal 12.306 de 2010, que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e que estabelece que os municípios adotem a modelos mais sustentáveis em substituição aos lixões e/ou aterros controlados, é de responsabilidade e atribuição dos mesmos destinarem os resíduos sólidos gerados de maneira adequada e em local apropriado.

Dentre as técnicas de destinação de resíduos, a de destinação em aterros sanitários é uma das mais seguras e eficazes, a mais adotada nos países do mundo, e a que apresenta melhor custo-benefício. Tais estruturas – aterros sanitários, configuram-se, de modo geral, como uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, de forma a garantir a destinação final dos resíduos sem danos à saúde pública e ao meio ambiente (ABNT NBR 8419).

Se por um lado os aterros sanitários podem servir para mitigar alguns dos problemas ambientais relacionados à disposição inadequada de resíduos sólidos, por outro lado, podem se configurar como potenciais fontes de poluição do ar, solo, subsolo e de águas superficiais e subterrâneas, além do meio biótico, exigindo assim estudos de avaliação e bom gerenciamento, além de monitoramento ambiental e geotécnico do meio ao qual este tipo de empreendimento está instalado. Nesse sentido, alguns métodos geofísicos, a exemplo os

elétricos e eletromagnéticos, podem se configurar como excelentes ferramentas para avaliação e caracterização dessas áreas.

Cavalcanti et al (2001) realizaram um estudo geofísico elétrico prévio, na região do Aterro Metropolitano Centro, de Salvador/BA, para caracterização hidrogeológica do terreno; Elis e Zuquette (2002) apresentaram e discutiram resultados de estudos de ensaios geoeletricos realizados em uma área de disposição inadequada de resíduos sólidos, na cidade de Ribeirão Preto/SP; Grellier et al. (2007) realizaram um estudo no aterro sanitário de Orchard Hills, Ilínois, USA, no qual correlacionaram medidas de resistividade elétrica à umidade da mistura de resíduos; Moreira et al. (2011) a partir de monitoramento geoeletrico anual sobre valas de resíduos, constataram que os resíduos apresentam aumento progressivo da resistividade em função do seu tempo de residência; Bortolin e Malagutti (2012) realizaram um monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos da cidade de Rio Claro/SP; Porciúncula e Lima (2012) caracterizaram o meio hidrogeológico e dimensionaram uma pluma de contaminação proveniente das atividades de um posto de combustíveis e serviços, no município de Alagoinhas/BA; Foti (2013) exemplificou uma variedade de aplicações que integram métodos geofísicos para reconstrução do modelo geoambiental e geotécnico de sítios diversos; Farhana et al (2016) constataram que a resistividade elétrica dos resíduos é inversamente proporcional à heterogeneidade do conteúdo da mistura. Outros estimaram parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos: NIWAS e SINGHAL (1981 e 1985); Mazac et al (1985); Yadav (1995); Soupios et al (2007); Massoud et al (2010); Niwas et al (2011); Ijeh e Onu (2012); Okiongbo e Akpofure (2012); Utom et al (2012); Arulprakasam et al (2013); Anomohanran (2015). Porciúncula e Leal (2019), a partir de sondagens elétricas verticais, geotécnicas e geológicas, caracterizaram geológico-geotecnicamente uma área planejada para implantação de células de destinação final de resíduos sólidos urbanos, no município de Simões Filho, Bahia, sobre o sistema aquífero São Sebastião, nas imediações da borda leste da Bacia do Recôncavo. Também sobre o sistema aquífero São Sebastião, Porciúncula e Leal (2020) realizaram um estudo geoeletrico no entorno de um aterro sanitário em operação no município de Camaçari, Bahia. Os resultados permitiram identificar plumas de contaminação na zona não-saturada e saturada, inferir o sentido do fluxo hídrico subterrâneo, avaliar a vulnerabilidade do aquífero e estimar parâmetros hidrodinâmicos do mesmo.

Este trabalho teve o intuito de apresentar algumas aplicações da Hidrogeofísica em estudos referentes à questão dos resíduos sólidos urbanos, além de fomentar seu uso na abordagem hidrogeológica, de modo a contribuir no planejamento e gestão do meio ambiente. Dessa forma, dois estudos de casos foram realizados respectivamente nos municípios de Simões Filho e Camaçari, que apresentam os maiores números de habitantes dentro da Região Metropolitana de Salvador (RMS) sobre o sistema aquífero São Sebastião, e que

teoricamente produzem os maiores volumes de resíduos. O primeiro estudo de caso tratou caracterizar o meio geológico-geotécnico a partir da integração de sondagens geoeletricas, sondagens geotécnicas (SPT) e geológica, numa área projetada para implantação de células de disposição de resíduos sólidos urbanos. O segundo, de realizar o diagnóstico e monitoramento geoambiental, avaliar a vulnerabilidade e estimar parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero Marizal-São Sebastião, no entorno do aterro sanitário LIMPEC, a partir da utilização do método geoeletrico, associado a dados de poços de monitoramento e informações geológicas de superfície.

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar o ambiente geológico-geotécnico e hidrogeológico a partir da integração do método geofísico geoeletrico a métodos diretos, de modo a contribuir com o incremento do conhecimento sobre o aquífero São Sebastião e fomentar alternativas não convencionais para estimativa de parâmetros hidrodinâmicos. Já os objetivos específicos consistiram em estabelecer a espessura e profundidade de camadas; a profundidade do nível freático; a configuração do fluxo hídrico subterrâneo; a identificação e mapeamento de falhas/fraturas geológicas; a distinção relativa entre litologias; o imageamento de plumas de contaminação e estimativa da porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade.

Dessa forma, tentou-se responder a algumas perguntas:

- Onde e de que forma a Hidrogeofísica pode contribuir na questão dos resíduos sólidos urbanos?
- Como se dá o modelo hidroestratigráfico do sistema aquífero São Sebastião nas regiões de estudo?
- A área planejada para implantação de células de destinação final de resíduos é hidrogeologicamente favorável?
- O aterro sanitário em operação exerce impactos ao subsolo e aquífero local?
- Como forma alternativa, é possível estimar parâmetros de aquíferos de modo não convencional, utilizando a Hidrogeofísica?

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1992. NBR 8419 – **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**, Rio de Janeiro.

ANOMOHANRAN, O. 2015. **Hydrogeophysical investigation of aquifer properties and lithological strata in Abraka, Nigeria**. Journal of African Earth Sciences, 102, 247–253.

ARULPRAKASAM, V.; SIVAKUMAR, R.; GOWTHAM, B. 2013. **Determination of Hydraulic Characteristics Using Electrical Resistivity Methods – A Case Study from Vanur Watershed, Villupuram District, Tamil Nadu.** IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics. 1 (4), 10-14.

BINLEY, A; CASSIANI, G; DEIANA, R. 2010. **Hydrogeophysics: opportunities and challenges.** Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. Vol. 51, n. 4, pp. 267-284.

BORTOLIN, J.R.M.; FILHO, W.M. 2012. **Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade.** Revista do Instituto de Geociências USP. 12(3): 99 – 113.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

CAVALCANTI, S.S.; SATO, H.K.; LIMA, O.A.L. 2001. **Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia.** Revista Brasileira de Geofísica. 19(2).

ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L. V. 2002. **Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos.** Revista Brasileira de Geociências. 32(1): 119 – 134.

FARHANA, S.S.; WEEKES, J.S.; MELIKECHI, N.; HOSSAIN, S.; FLUMAN, D.A.; RANA, M.M. 2016. **In-situ moisture content measurement of fresh municipal solid waste by wenner resistivity method.** Journal of Solid Waste Technology and Management. 42(3): 184 – 189.

GRELLIER, S.; REDDY, K. R.; GANGATHULASI, J.; ADIB, R.; PETERS, C.C. 2007. **Correlation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste in bioreactor landfill.** Geoenvironmental Engineering.

IJEH, I. E ONU, N. 2012. **Appraisal of the Aquifer Hydraulic Characteristics from Electrical Sounding Data in Imo River Basin, South Eastern Nigeria: the Case of Imo shale and Ameki Formations.** Journal of Environment and Earth Science. Vol. 2 (3) 61 – 77.

MASSOUD, U.; SANTOS, F.; KHALIL, M. A.; TAHA, A.; ABBAS, A. M. 2010. **Estimation of aquifer hydraulic parameters from surface geophysical measurements: a case study of the Upper Cretaceous aquifer, central Sinai, Egypt.** Hydrogeology Journal, 18: 699–710.

- MAZAC, O.; KELLY, W. E.; LANDA, I. 1985. **A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers**. *Journal of hydrology*. 79: 1 – 19.
- MOREIRA, C.A.; BRAGA, A.C.O e HANSEN, M.A.F. 2011. **Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica**. *Revista Brasileira de Geociências*. 41(3): 549 – 557..
- NIWAS, S.; SINGHAL, D. C. 1981. **Estimation of aquifer transmissivity from dar-zarrouk parameters in porous media**. *Journal of Hydrology*, 50 (1981) 393—399.
- NIWAS, S.; SINGHAL, D. C. 1985. **Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data**. *Journal of Hydrology*, 82 143—153.
- NIWAS, S.; TEZKAN, B. E ISRAIL, M. 2011. **Aquifer hydraulic conductivity estimation from surface geoelectrical measurements for Krauthausen test site, Germany**. *Hydrogeology Journal*. 19: 307–315.
- NWANKWOALA, HO; UDOM, GJ. 2008. *Hydrogeophysics: An overview of general concepts, applications and future perspectives*. *Scientia Africana*. Vol. 7 (No.2). pp 54-63.
- OKIONGBO, K. S.; AKPOFURE, E. 2012. **Determination of Aquifer Properties and Groundwater Vulnerability Mapping Using Geoelectric Method in Yenagoa City and Its Environs in Bayelsa State, South South Nigeria**. *Journal of Water Resource and Protection*. 4, 354-362.
- PORCIÚNCULA, R.J.; LIMA, O.A.L. 2012. **Geoelectric evaluation of subsurface contamination at a gas and service station, Alagoinhas, BA, Brazil**. *Brazilian Journal of Geophysics*. 30(2): 201-212.
- PORCIÚNCULA, R.J.; LEAL, L. R. B.2019. **Geoelectric characterization for implantation a landfill in simões filho, Bahia, Brazil**. *Brazilian Journal of Geophysics*. 37(4): 481 - 487.
- SOUPIOS, P. M.; KOULI, M.; VALLIANATOS, F.; VAFIDIS, A.; STAVROULAKIS, G. 2007. **Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece)**. *Journal of Hydrology* (2007) 338, 122–131.
- UTOM, A. U.; ODOH, B. I.; OKORO, A. U. 2012. **Estimation of Aquifer Transmissivity Using Dar Zarrouk Parameters Derived from Surface Resistivity Measurements: A Case History from Parts of Enugu Town (Nigeria)**. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 993-1000.

YADAV, G. S. 1995. **Relating hydraulic and geoelectric parameters of the Jayant aquifer, India.** Journal of Hydrology. 167. 23-38.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1 - GEOELECTRIC CHARACTERIZATION FOR IMPLANTATION A LANDFILL, IN SIMÕES FILHO, BAHIA, BRAZIL

ABSTRACT

The present study brings the results from the integration of applying a geoelectrical method and direct investigation methods in the qualitative and quantitative characterization of the geological-geotechnical environment. The purpose was to establish a local hydrostratigraphic model, in order to survey information that would aid in the implementation of cells for the final destination of urban solid waste over the sediments of the São Sebastião Formation, in Simões Filho, Bahia, Brazil. Twelve vertical electrical soundings, two SPT soundings and one geological sounding composed the quantitative surveys and techniques used. Unidimensional inversions presented mean error of 4.1%. Bidimensional inversions presented 5.7% mean error. Lower-value geoelectrical facies (<1,000 Ohm.m) were attributed to occurrences between the silt and clay fraction, while higher-value facies (> 1,000 Ohm.m) corresponded to occurrence between the silt and sand fraction. The hydrostratigraphic model included a confined aquifer, represented by a succession of alternating sandy and clay-rich layers with subhorizontal contact, often laterally truncated, with at least two thick layers of clay occupying the first 100 m in depth. Moreover, water occurred in permeable porous layers, between depths of 40 and 50 m, approximately. Regarding the degree of compactness, soils were classified as medium to hard.

Keywords: final waste disposal cells, geoelectrical method, hydrostratigraphic model.

RESUMO

O presente estudo traz os resultados da integração do método geo-elétrico a métodos diretos de investigação, utilizados para caracterização qualitativa e quantitativa do ambiente geológico-geotécnico. O propósito foi estabelecer o modelo hidro-estratigráfico local, de modo a levantar informações que auxiliem na implantação de células de destinação final de resíduos sólidos urbanos sobre os sedimentos da Formação São Sebastião, no município de Simões Filho, Bahia. 12 sondagens elétricas verticais, 02 sondagens SPTs e 01 sondagem geológica compuseram o quantitativo de ensaios e técnicas utilizados. As inversões unidimensionais apresentaram erro médio de 4,1%. As inversões bidimensionais, de 5,7%. Os fácies geo-elétricos de menores valores (<1000 Ohm.m) estão atribuídos à ocorrência entre a fração siltica a argilosa, e de maiores valores (>1000 Ohm.m), à ocorrência entre a fração siltica a arenosa. O modelo hidro-estratigráfico inclui um aquífero do tipo confinado, representado por uma sucessão de camadas arenosas e argilosas intercaladas em contato subhorizontal, por vezes truncadas lateralmente, com no mínimo duas camadas espessas de argila nos primeiros 100 m de profundidade, e ocorrência de água, quando em camadas permoporosas, entre as cotas de 40 a 50 m, aproximadamente. Quanto ao estado de compactação, nos primeiros 10 m de profundidade, os solos são classificados como médio a rijo.

Palavras-chave: células de disposição final de resíduos, método geoeletrico, modelo hidroestratigráfico.

INTRODUCTION

The issue of final disposal of solid waste is a recurring problem in most urban centers. It is a matter of concern because of the way in which this waste is disposed and how the places that receive them are managed. Landfills are a type of solid waste management system still adopted in many countries. In Brazil, Federal Law No. 12,306 of 2010, which implemented the National Policy on Solid Waste, established that Brazilian municipalities should use more sustainable models for the final disposal of their waste, replacing dumps and/or controlled landfills as a measure for environmental protection. If on the one hand, landfills partly solve some of the environmental problems related to inadequate disposal of solid waste, on the other, they can represent potential sources of pollution, affecting the air, soil, subsoil, surface water, groundwater and biota. Thus, this system requires studies that evaluate and characterize the environmental conditions in which this type of enterprise will be implemented.

Cavalcanti et al. (2001) conducted a previous electrical geophysical study in the region of the Aterro Metropolitano Centro landfill, located in Salvador/BA, for the hydrogeological characterization of the terrain; Elis and Zuquette (2002) presented and discussed the results of geoelectrical surveys conducted in an area of inadequate disposal of solid waste in the municipality of Ribeirão Preto/SP; Grellier et al. (2007), in

turn, conducted a study on the Orchard Hills landfill, Illinois, USA, in which they correlated measurements of electrical resistivity to moisture in the waste mixture; Moreira et al. (2011), based on an annual geoelectrical monitoring survey regarding waste ditches, found that this residue presented a progressive increase in resistivity due to its residence time; Porciúncula and Lima (2012) characterized the hydrogeological environment and measured the contamination plume from activities of fuel and service stations in the municipality of Alagoinhas/BA; Foti (2013) exemplified several applications that integrate geophysical methods for the reconstruction of geoenvironmental and geotechnical models of different sites; Farhana et al. (2016) observed that the electrical resistivity of waste is inversely proportional to the heterogeneity of the content of the mixture.

The objective of the present study was to characterize the geological-geotechnical environment based on the integration of a geoelectrical method and direct investigation methods, in an area projected for the implementation of urban waste disposal cells.

STUDY AREA

The study site, the municipality of Simões Filho, is located in the Recôncavo Basin, state of Bahia, between UTM coordinates (WGS-84S) 561800 to 564000 (longitude) and 8592400 to 8593800

(latitude). **Figure 01** shows the location and general setting of the study site. The cell polygons, main accesses and position of the survey points are also illustrated in this figure.

Geologically, the study area is situated over the sediments of the São Sebastião Formation (Lower Cretaceous, Barremian-Aptian). These sediments consist of quartzose sandstones that are poorly sorted, yellow-reddish in color, friable, feldspathic, and interleaved with variegated clays rich in silt (Ghignone, 1979). The area hosts the largest reservoir of groundwater in the Recôncavo Basin, the São Sebastião aquifer.

Outcrops of the São Sebastião Formation are locally observable from road cuts. Some of these outcrops are presented in **Figure 02**. They indicate that the sandy/silt-rich and clay-rich/silt-rich layers (centimetric to metric) are alternated in subhorizontal contact (**Figures 02A, B, C** and **D**), presenting lateral (**Figure 02 D**) and tilted variations, occasionally, as noted by the altimetric difference of the interfaces between layers A and B identified in **Figures 02C** and **D**. Both photographs were taken from the same spot, in diametrically opposite directions.

THE GEOELECTRICAL METHOD

Geophysical surveys were conducted using the geoelectrical method, which aims to investigate variations in subsurface resistivity (Koefoed, 1979). This

method can be broadly applied: in hydrogeology and geoenvironmental studies for investigations on the depth of the saturated zone, mapping of contamination plumes, placement of wells, determination of underground flow, monitoring of saline wedge; in geotechnical studies for mapping faults, fractures, cavities, fresh rock, thickness of the weathering mantle, to assist in the implementation of enterprises and utilities such as landfills, fuel stations, tunnels and bridges; in geology for the identification of a stratigraphic model, width of layers, mapping of lithologic contacts and geological structures.

The procedure basically consists on introducing by means of an artificial source and electrodes an electrical current in the terrain, followed by the measurement of the difference in electrical potential obtained (Telford, 1990). After the data collected are treated and processed, it is possible to determine subsurface resistivity. Results are expressed in the form of curves, maps, profiles and/or sections that, through their interpretation, supply information on subsurface geoelectrical behavior.

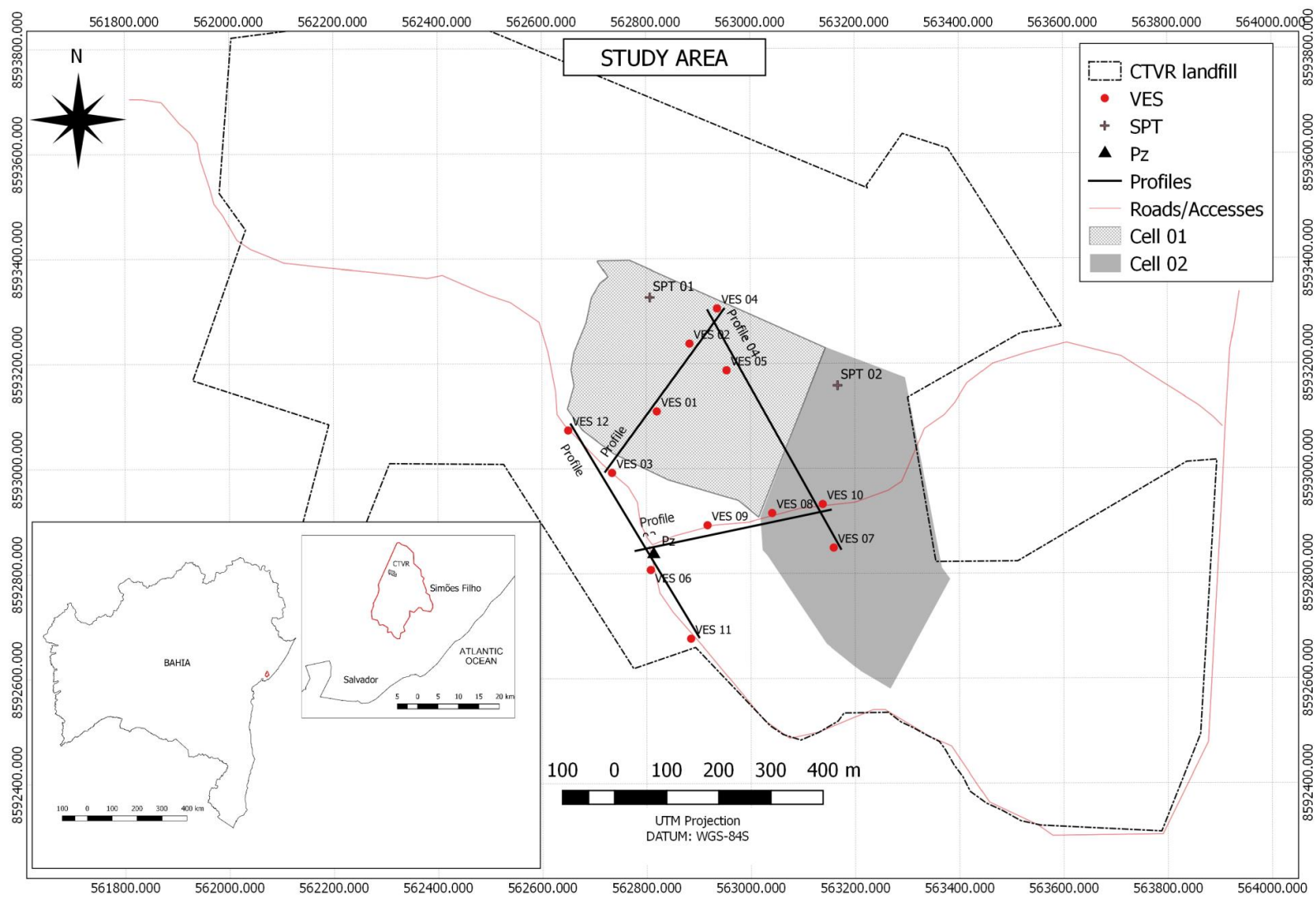


Figure 01 – Location and setting of the study area. The cell polygons and position of the survey points considered in the present study are highlighted.

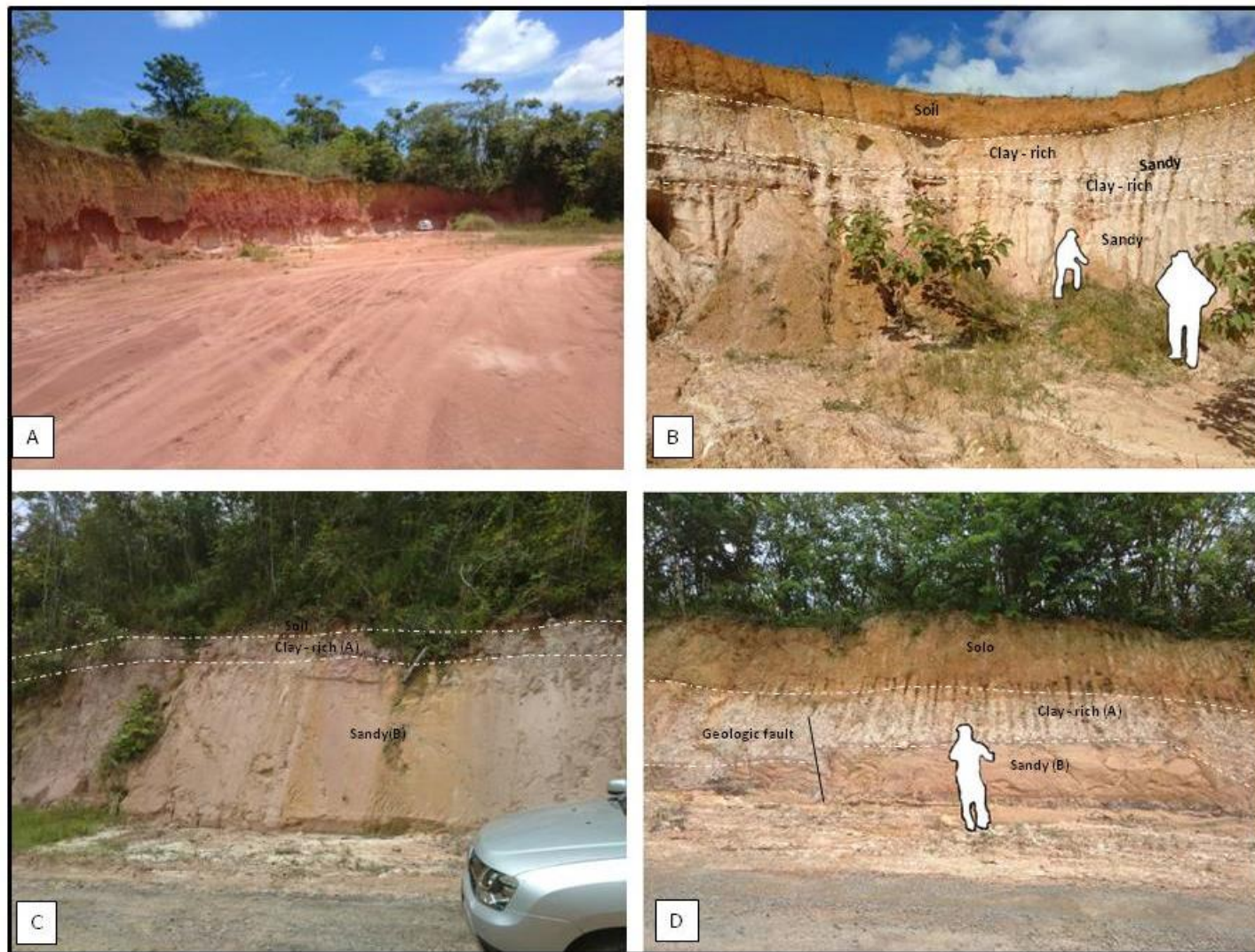


Figure 02 – Photographic records of outcrops of the São Sebastião Formation adjacent to the study area. Sandy strata are generally interleaved with clay-rich strata, in subhorizontal contact.

METHODOLOGIES

Direct geological methods (surface geologic mapping and geotechnical and geological soundings) and indirect investigation through the geoelectrical method were integrated in the present study.

Geologic mapping was conducted previously and comprised field visits to observe lithologic, structural and geomorphological elements. Visual-tactile analyses, photographic records, measurements of direction and structural attitudes, and survey of hydrogeological attributes were the main procedures adopted during this stage of the study.

Soundings were conducted based on the Brazilian norm ABNT/NBR 15,492/2007, using mechanized auger and probe. The material excavated underwent tactile and visual analysis for geologic description, following ABNT/NBR 6,502/1995.

The geoelectrical acquisition campaign was conducted over the course of the month of November 2017, using vertical electrical sounding (VES) with Schlumberger electrode configuration. The instruments used in the field encompassed basically: a transmitting unit, which allows the supply of output tensions of the order of up to 1,000 V, associated with a milliammeter, where the injected electrical current is read, fed by a 12 V battery; and a receptor unit, millivoltmeter; as well as

cables, reels and non-oxidizable electrodes that are interconnected and arranged over the surface of the terrain investigated.

The VES centers and the position of the electrodes in the geoelectrical profiles were taken using UTM coordinates with a geodesic GPS.

The data surveyed were registered in tables, treated in spreadsheets, interpolated and submitted to unidimensional and bidimensional inversion, generating apparent resistivity profiles and maps and inverted sections of true resistivity, which model the geological-geotechnical environment assessed qualitatively and quantitatively.

Unidimensional inversions were conducted using the program RESIST successively, creating an initial model with estimates on the number, width and resistivity of layers obtained per automatic inversion carried out in RES1D. In this option, the program conducts the inversion generating an equal number of layers to the number of points measured that compose the VES. An initial model for the final inversion in RESIST was constructed by grouping layers of resistivity that were close to each other, considering a lower number of layers. Bidimensional inversions were conducted using the program RES2DINV applying the least squares method and considering the altimetric heights of the geoelectrical sounding centers.

RESULTS OBTAINED

Figure 03 illustrates an example of an SPT sounding profile, which was carried out before the geoelectrical surveys. Note that the profile is located within the polygon of the future cells, in lower terrains of the study area. Moreover, it contains information on the type of material and rate of resistance to penetration, obtained by inserting a sampler through successive strikes with a hammer weighing 65 kg, in free-fall from a height of 75 cm. The graph showing resistance to penetration in function of the depth marked by the blue line corresponds to the sum of strikes needed to insert the sampler into the initial 30 cm, while the red line represents the amount for the final 30 cm.

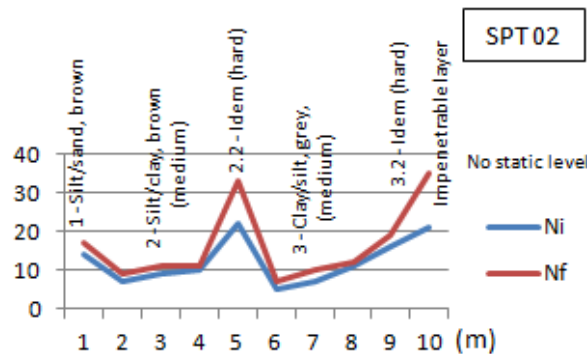


Figure 03 – Percussion sounding (SPT 02).

The sounding demonstrated that, over the first 10 m in depth, the soil is predominantly rich in clay and silt, reaching an impenetrable substrate at approximately 11 m in depth, not reaching the water level. The mean rates of initial (Ni) and final (Nf) resistance to penetration were 12.2 and 16.4, respectively. The classification for the soil, considering state of compactness and

consistency, according to ABNT 6,484/2001, was that of soils predominantly composed of clay and silt, varying between medium and hard.

The inflexion and concavity of VES 01 (**Figure 04**), conducted in the upper quotas, were turned upwards. This configuration is attributed to the possible occurrence of a clay-rich/silt-rich layer, at 8 m in depth, measuring at least 25 m in thickness. This layer was mapped in SPT, being impenetrable at 10 m in depth. In turn, VES 04 (**Figure 05**), located in topographically lower portions, presented two inflexion points, which suggests the occurrence of two possible clay-rich/silt-rich layers interleaved with sandy/silt-rich layers. The occurrence of the clay-rich layer, at times silt-rich in nature, identified in the SPT soundings until approximately 10 m in depth, is marked by a curve descent due to the decrease in resistivity that it promotes. Moreover, it presents ascendant terminality, indicating proximity to electrically more resistant horizons, suggesting basal sandy substrate. The mean error, considering the 12 unidimensional inversions was of approximately 4.1%. The interval varied between 2.3 and 6.8%. Only one VES exceeded the error of 5%.

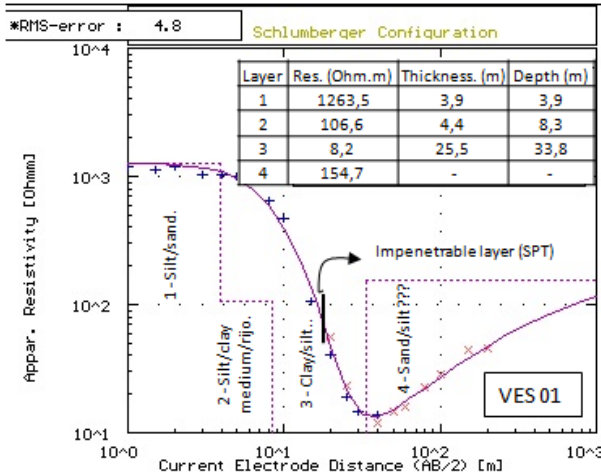


Figure 04– Vertical electrical sounding (VES01).

Water is inferred to occur between the altitude quotas of 40 to 50 m, approximately, when in sandy lithologies, based on some of the electrical soundings, such as VES 09 (Figure 07), and information on water level at the piezometer (Pz) that was installed at 60 m in depth.

A piezometer well of 95 m (and a piezometric level of 59 m in depth) was installed considering the preliminary results of this study.

The purpose of the equipment was to optimize the local hydrostratigraphic model and serve as a background and a monitoring station for local groundwater quality. Interpretations regarding VES 09 (Figure 07), adjacent to the piezometer, support the model of interleaved sandy and clay-rich layers with, at least, two thick layers of clay/shale (layers 4 and 7), confining the aquifer within the first 100 m in depth, as shown in Figure 06. These results can be compared to show the correlation in the stratigraphic model.

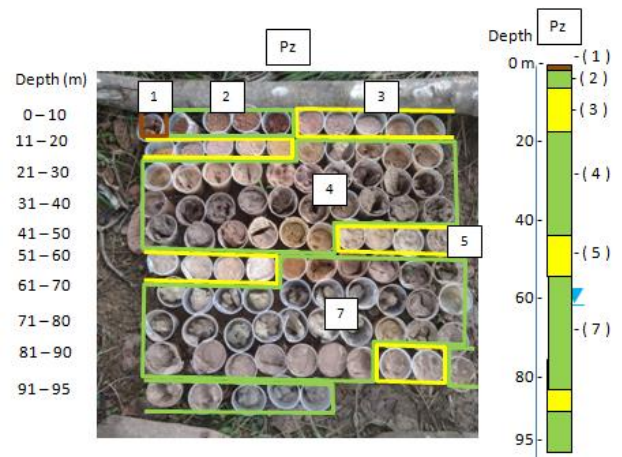


Figure 06 – Trough samples of the Pz.

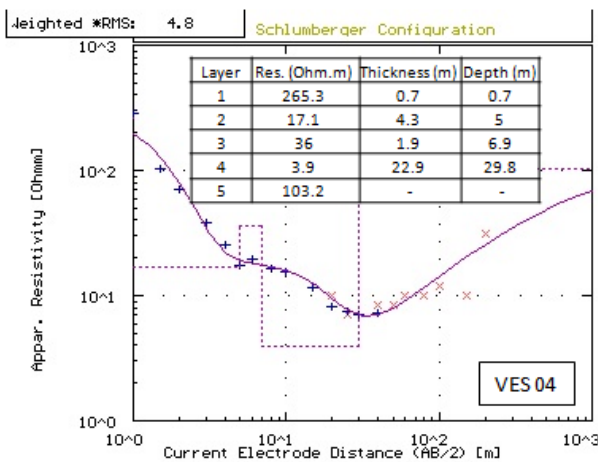


Figure 05 – Vertical electrical sounding (VES 04).

Figures 08A and 08B show the result of two of the four bidimensionally inverted geoelectrical profiles based on aligned VES profiles, comprising transects. These inversions were carried out considering the altimetric variation of surface.

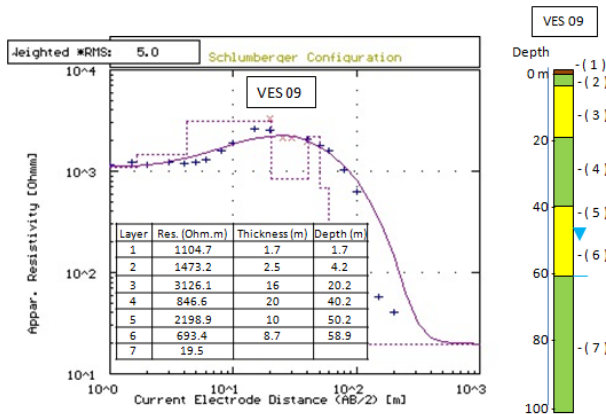


Figure 07 – Vertical electrical sounding (VES 09).

Generally, geoelectrical facies with greater values, signaled in warm colors (red to orange; $> 1,000 \Omega.m$), correspond to materials with greater predominance of silt and sand fractions. In turn, the geoelectrical facies with lower resistivity values (signaled in colors from green to blue; $< 1,000 \Omega.m$) correspond to materials that are relatively richer in dry silt and clay. These can be shales and silt-rich clays.

Profile 01, with SSW-NNE orientation, taken from the slope direction, crossing the region of Cell 01, allowed the imaging of a thick layer of clay, which occurs from near the surface to depths beyond those presently investigated. This layer was confirmed through SPT sounding profile 01 until 11 m in depth, which was the point when depth became impenetrable. Moreover, the layer is associated with silt and presented a mean rate of resistance to penetration of 14 strikes, considering the first 10 m.

Moreover, higher terrains were shown to have a relatively more resistive (Profile 03) geoelectrical signature, while

terrains in lower altitudes presented a more conductive signature (Profile 04).

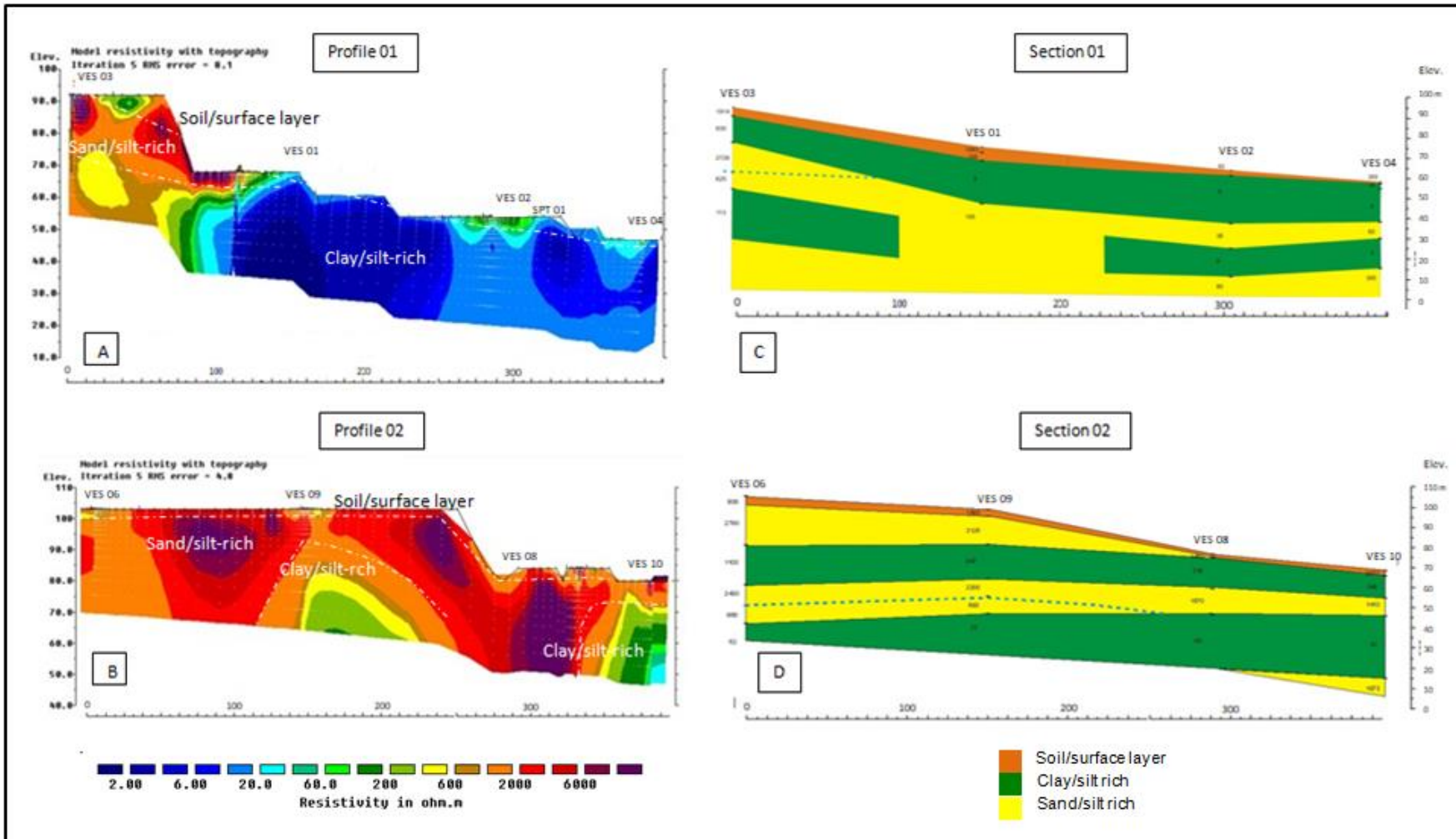


Figure 08 – Bidimensionally inverted profiles and interpretative geological section based on the aligned VES profiles, corresponding to cells 01 (A and C) and 02 (B and D).

Two schematic sections were constructed based on the results of the uni and bidimensional inversions integrated to information from the geotechnical and geological soundings (**Figures 08C and 08D**), which characterize the study area regarding interpretation. Section 01, composed of VES 03, 01, 02 and 04, cuts across approximately the center of the area of Cell 01 in the slope direction. In turn, section 02, also in the slope direction, partially cuts the polygonal area of Cell 02. Both sections indicate a confined aquifer model, with sandy to silt-rich layers interleaved with clay-rich/silt-rich layers, in subhorizontal contact, with lateral variations and discontinuities of these layers.

CONCLUSIONS

The integration of a geological-geotechnical characterization, conducted with geoelectrical geophysical surveys, and direct soundings, yielded relevant information for the planning of urban solid waste disposal cells in a landfill. Moreover, the investigation served as a background survey of the geoelectrical behavior of the area before the implementation and operation of this enterprise in the municipality of Simões Filho, metropolitan region of Salvador, Bahia. The SPT soundings indicated that the first 10 m of soil is predominantly composed of silt and clay and characterized as having medium to hard compactness, becoming impenetrable at approximately 11 m. The

unidimensional inversions of VES presented mean error of 4.1% and indicated that the clay-rich layer in the SPT soundings extends to depths of the order of 20 to 30 m in the area of the cell polygons. The inversions also showed that the stratigraphic pattern in the first 100 m is of alternated clay-rich and sandy to silt-rich layers, with at least two thick layers of clay/shale. The bidimensional inversions reached approximately 35 m and presented mean error of 5.7%. They presented contrasting electrical resistivity values, of the order of tens to thousands of Ohm.m, varying laterally and vertically. Lower electrical resistivity values predominated the lower terrains, while relatively higher terrains showed predominance of higher values. The facies of lower values (< 1,000 Ohm.m) were attributed to the occurrence of a silt to clay fraction, while higher values (> 1,000 Ohm.m) were attributed to a silt to sand fraction. The piezometer profile of 95 m installed confirmed and optimized the model of interleaved sandy to clay-rich layers. Thus, the integration of the data and results indicate a confined aquifer model, composed of successive sandy to clay-rich layers, with occasional occurrence of silt, interleaved in subhorizontal contact, with lateral variation and occurrence of water between quotas of 40 to 50 m in height, when in sandy fractions. Expansive properties of the clay layer subjacent to the cell polygons should be analyzed.

AKNOWLEDGMENTS

The authors thank NEHMA/UFBA for infrastructure, CNPq for financed research scholarship and the Professors Olivar Lima, Sandro Machado and Cristovaldo Santos for their contributions and suggestions.

REFERENCES

- BRASIL. 2010. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- CAVALCANTI, S.S.; SATO, H.K.; LIMA, O.A.L. 2001. **Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia**. Revista Brasileira de Geofísica. 19(2), 155 - 168.
- ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L. V. 2002. **Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos**. Revista Brasileira de Geociências. 32(1): 119 – 134.
- FARHANA, S.S.; WEEKES, J.S.; MELIKECHI, N.; HOSSAIN, S.; FLUMAN, D.A.; RANA, M.M. 2016. **In-situ moisture content measurement of fresh municipal solid waste by wenner resistivity method**. Journal of Solid Waste Technology and Management. 42(3): 184 – 189.
- FOTI, S. 2013. **Combined use of geophysical methods in site characterization**. Taylor & Francis Group, London, 43 - 61.
- GHIGNONE JI. 1979. **Geologia dos Sedimentos Fanerozóicos do Estado da Bahia**. In: Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos. SME/CPM: 23–117, Salvador.
- GRELLIER, S.; REDDY, K. R.; GANGATHULASI, J.; ADIB, R.; PETERS, C.C. 2007. **Correlation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste in bioreactor landfill**. Geotechnical Special Publication 163: 1-14.
- KOEFOED O. 1979. **Geosounding principles: Resistivity sounding measurements**. Elsevier, Amsterdam. 276 pp.
- MOREIRA, C.A.; BRAGA, A.C.O & HANSEN, M.A.F. 2011. **Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica**. Revista Brasileira de Geociências. 41(3): 549 – 557.
- PORCIÚNCULA, R.J.; LIMA, O.A.L. 2012. **Geoelectric evaluation of subsurface contamination at a gas and service station, Alagoinhas, BA, Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica. 30(2): 201-212.
- TELFORD WM, GELDART LP & SHERIFF RE. 1990. **Applied Geophysics**.

Cambridge University Press, Cambridge.
770 pp.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2 - HYDROGEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE MARIZAL-SÃO SEBASTIÃO AQUIFER SYSTEM IN THE SURROUNDINGS OF THE LIMPEC SANITARY LANDFILL, MUNICIPALITY OF CAMAÇARI, BAHIA, BRAZIL

ABSTRACT

A detailed hydrogeophysical survey was conducted using the geoelectrical method in the surroundings of the LIMPEC sanitary landfill, municipality of Camaçari, Bahia, Brazil. Twenty-six vertical electrical soundings (VESs) were done, configured according to the Schlumberger electrode array and spaced up to 400 m between current electrodes. Hydrogeological qualitative information was obtained by integrating geoelectrical results to data from wells and local geology information, namely: (i) an apparent resistivity map showed the occurrence of a conductivity anomaly, possibly attributed to the contamination plume, dispersed within the saturated zone, and presenting a SSE convection direction; (ii) one-dimensional inversions allowed to interpret the stratigraphic pattern, identify static level depth and the occurrence of possible contamination plumes, and indicate the direction of groundwater flow, which was also towards SSE; (iii) two-dimensional inversions produced inverted geoelectrical profiles, with a mean error below 2%, and confirmed the occurrence of possible contamination plumes disseminated within the unsaturated zone and dispersed within the saturated one. The geoelectrical facies with the highest resistivity values (> 600 ohm.m) were related to the São Sebastião Formation. Facies with intermediate values (100 to 800 ohm.m) regarded the Marizal Formation. In turn, those with the lowest values (< 100 ohm.m) were related to contamination plumes and/or eventual occurrences of silt/clay; (iv) the parameters of porosity, hydraulic conductivity, and transmissivity were estimated between 19.2 and 34.2%, 0.11 and 3.37×10^{-3} cm/s, and 4.7 and 145.6 m²/d, respectively; and (v) local free aquifer vulnerability was classified as high, according to the evaluation using the GOD method.

Keywords: geoelectrical method, urban solid waste, hydrodynamic parameters.

RESUMO

Um estudo hidrogeofísico de detalhe, utilizando o método geoeletrico, foi conduzido no entorno do aterro sanitário LIMPEC, município de Camaçari, Bahia, Brasil. Vinte e seis sondagens elétricas verticais (SEVs), sob configuração do arranjo Schlumberger de eletrodos, com espaçamento de até 400 m entre os eletrodos de corrente foram executadas. Informações quali-quantitativas de âmbito hidrogeológico foram alcançadas a partir da integração dos resultados geoeletricos a dados de poços e informações da geologia local, a saber: (i) o mapa de resistividade aparente revelou a ocorrência de uma anomalia condutiva, possivelmente atribuída à pluma de contaminação, dispersa na zona saturada, apresentando sentido de convecção na direção SSE; (ii) as inversões unidimensionais possibilitaram interpretar o padrão estratigráfico, identificar a profundidade do nível estático, a ocorrência de possíveis plumas de contaminação e apontar o sentido do fluxo hídrico subterrâneo também para SSE; (iii) as inversões bidimensionais geraram perfis geoeletricos invertidos, com erro médio inferior a 2%, e confirmaram a ocorrência de possíveis plumas de contaminação disseminadas na zona não saturada e dispersas na zona saturada. Os fácies geoeletricos de maiores valores de resistividade (>600 Ohm.m) estão atribuídos à Formação São Sebastião. Os fácies de valores intermediários (100 a 800 Ohm.m), referem-se à Formação Marizal. Já os de menores valores (<100 Ohm.m), a plumas de contaminação e/ou eventuais ocorrências de silte/argila; (iv) os parâmetros porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade foram estimados serem entre 19,2 a 34,2%, 0,11 a 3,37 x10⁻³ cm/s e 4,7 a 145,6 m²/d, respectivamente; e (v) a vulnerabilidade do aquífero livre local foi classificada como alta, segundo avaliação realizada utilizando o método GOD.

Palavras-chave: método geoeletrico, resíduos sólidos urbanos, parâmetros hidrodinâmicos.

INTRODUCTION

Brazilian municipalities are responsible for disposing of their solid waste correctly in an adequate area, as determined by Federal Law No. 12,306 of 2010. This piece of legislation instituted the National Policy on Solid Waste, which determines that municipalities must adopt more sustainable models, replacing wastelands and/or controlled landfills, as an environmental protection measure.

Among the various techniques for solid waste disposal, the use of sanitation landfills is one of the safest and most effective. It is also the most adopted technique around the world and presents the best cost-benefit ratio. These structures – sanitation landfills – are generally projected as a work of engineering designed under technical criteria in order to guarantee that the final disposal of waste does not harm public health and the environment (ABNT NBR 8419).

If on the one hand sanitary landfills can be used to partly solve some of the environmental problems related to inadequate solid waste disposal, on the other they can be potential sources of air, soil, underground, surface water and groundwater pollution, and can contaminate the biota. This therefore demands good studies on management, environmental and geotechnical evaluations and monitoring. In this sense, some geophysical approaches, such as the

electrical and electromagnetic methods, for example, can be excellent tools for evaluating and characterizing these areas.

In the literature, there are authors who have shown the effectiveness of the geoelectrical method in studies on geoenvironmental characterization, diagnoses and monitoring in urban solid waste disposal areas: Cardarelli and Bernabini (1997); Meju (2000); Cavalcanti et al (2001); Elis and Zuquette (2002); Moreira et al (2011); Bortolin and Malagutti (2012); Porciúncula and Leal (2019). Grellier et al (2007) and Farhana et al. (2016) showed the applicability of this method in studies on moisture and content of waste mass. Others have estimated hydrodynamic parameters of aquifers: Niwas and Singhal (1981 and 1985); Mazac et al (1985); Yadav (1995); Soupios et al (2007); Massoud et al (2010); Niwas et al (2011); Ijeh and Onu (2012); Okiongbo and Akpofure (2012); Utom et al (2012); Arulprakasam et al (2013); and Anomohanran (2015).

The objective of the present hydrogeophysical study was to conduct a geoenvironmental diagnosis and characterization, evaluate vulnerability, and estimate hydrodynamic parameters of the Marizal-São Sebastião aquifer system in the surroundings of the LIMPEC sanitary landfill, Camaçari, Bahia, Brazil, using the geoelectrical method associated with monitoring well data and surface geology information.

STUDY AREA

The study area is located in the municipality of Camaçari, within the Salvador Metropolitan Area, state of Bahia, Brazil, between UTM coordinates (WGS-84S) 579800 to 581300 (longitude) and 8596700 to 8597700 (latitude). **Figure 1** shows a satellite image and overall situation of the study area, indicating the location of the Vertical Electric Soundings (VES), Profiles and wells monitored (WM).

In the geological context, the study area is located in the Recôncavo Sedimentary Basin. This basin is part of a rift system related to the fragmentation of Gondwana (Eocretaceous) and the opening of the Atlantic Ocean (late Jurassic through early Cretaceous). This system consists of an elongated N-S-oriented crustal depression, over an area that encompasses part of the states of Bahia, Sergipe and Pernambuco (Silva et al, 2007).

The study area is locally situated upon the Marizal-São Sebastião aquifer system (Lower Cretaceous, Barremian - Aptian) and consists of poorly sorted, reddish-yellow, friable, feldspar-rich quartz sandstones alternated with variegated silty clays (Ghignone, 1979). It is characterized for presenting the largest groundwater reserve in the Recôncavo Basin, the São Sebastião aquifer.

Figure 2 shows examples of aerial images of the study area and occurrences of outcrops in its surroundings: A) bird's-eye-view of the LIMPEC sanitary landfill and the Via Atlântica highway located northwards from it. Sedimentary cover outcrops can be seen in road cuts in the detail; B) example of lateral discontinuity next to VES 14, characterized by the lithological contact between predominantly sandy and silty/clay-rich materials; C) example of cross-bedding occurring near VES 15 found in sandy, medium-grained, poorly-sorted, brown to yellow material – Marizal facies; and D) area southwards from the landfill, showing a slightly wavy relief, pasture vegetation, and occurrence of white to grayish, moderately sorted, and friable sands of the São Sebastião Formation.

THE GEOELECTRICAL METHOD

The geoelectrical method is a geophysical technique that allows the investigation of subsurface regions based on the contrast of electrical resistivity found in various geological and/or geotechnical material. This method consists basically on introducing, through an artificial source and electrodes, an electrical current in the terrain and measuring the difference of electrical potential provided (KOEFOED 1979; TELFORD et al 1990; BRAGA 2016). After data is treated and processed, subsurface resistivity and geoelectrical behavior can be determined. Results are expressed as contours, maps, profiles

and/or sections, which interpretatively provide information of geological, geotechnical, and hydrogeological interest.

A Syscal Pro resistivity imaging system was used in the field. Regarding technique, the VES method was applied, with maximum spacing of 400 m between current electrodes. In total, 26 geoelectrical soundings, using the Schlumberger array, were obtained along the main access routes and roads of the study area, as shown in **Figure 1**.

Examples of the use of the geoelectrical method in studies on the Marizal-São Sebastião aquifer system are available in the literature. Lima (1999) characterized the hydraulic and qualitative pattern of the Recôncavo aquifer, in the

region of Camaçari and Dias D'Ávila, Bahia. Porciúncula (2007), in a regional study conducted in the municipality of Alagoinhas/BA, Brazil, classified the Marizal-São Sebastião aquifer system as being free in its upper portion and semi-confined from 100 m and deeper, approximately. Pereira and Lima (2007), Porciúncula and Lima (2012) and Amarante and Lima (2015) studied the geoelectrical behavior of disperse contamination plumes within the aquifer. Porciúncula and Leal (2019), in a geoelectrical detailed study, classified this aquifer as semi-confined, presenting alternated sandy and clay-rich layers close to the eastern border of the basin, in the region of the municipality of Simões Filho/BA, Brazil.

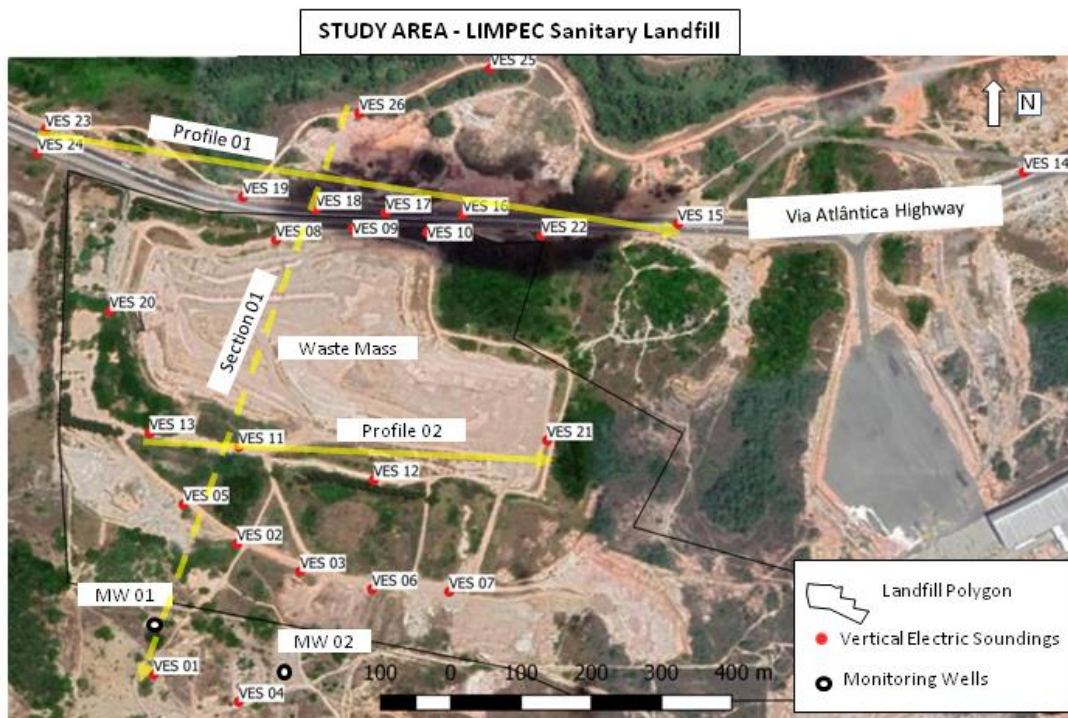


Figure 1 – Study area and location of VESs (modified from Google Earth).

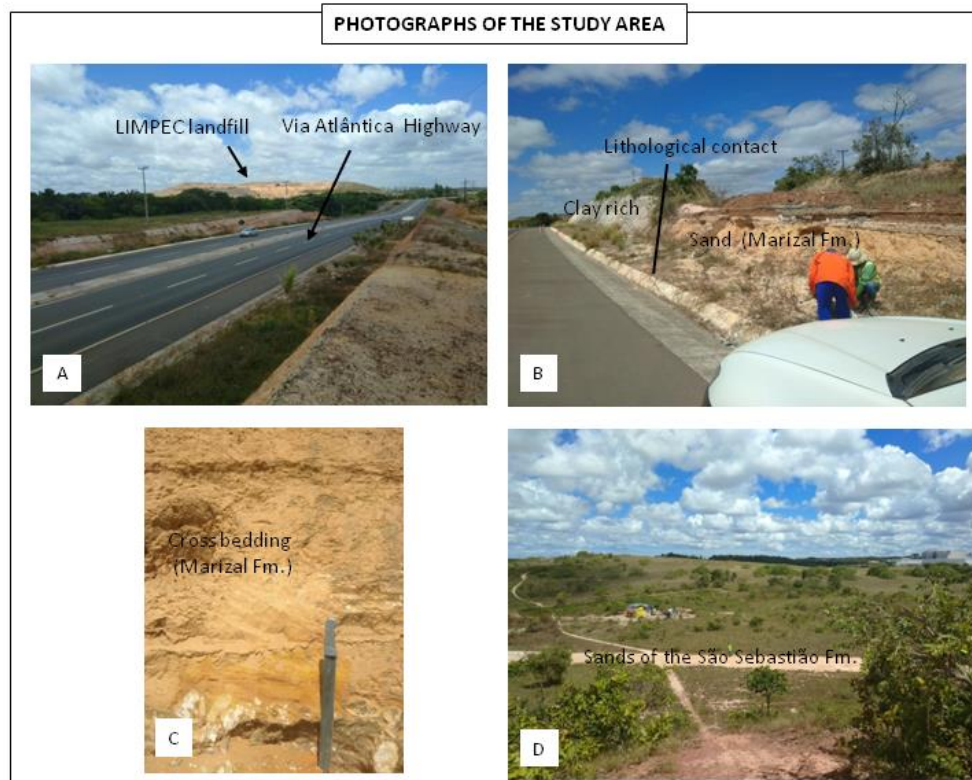


Figure 2 – Photographs of the study area. A) overview of the study area; B) lithological contact; C) cross-bedding (Marizal Formation); and D) sands of the São Sebastião Formation.

RESULTS

Apparent resistivity map

Maps of apparent electrical resistivity for various depths were constructed through interpolation. Qualitative information on local subsurface geoelectrical behavior were obtained through these maps.

Figure 3 shows an example of an apparent resistivity map (into the aquifer) for an approximate depth of 30 m, considering a depth theory about $AB/4$. An ellipsoidal conductive anomaly can be observed in the surroundings of VESs 08 and 11. The anomaly is slightly elongated

towards SSE, indicating the possible direction of local groundwater flow. This feature, represented in blue, persists at other depths and may be related to possible occurrences of contamination plumes. In turn, these plumes could have been caused by subsurface leachate leaking or due to the ineffectiveness of retention cells and/or operational errors and/or possible leakage from groundwater pipes that carry leachate, by gravity, to the CETREL water treatment station located approximately 3 km east-northeastwards from the LIMPEC sanitary landfill.

One-dimensional inversions

All 26 VESs obtained underwent one-dimensional inversion, presenting an error ranging between 2.0 and 7.0%, with a mean value of 3.7%. These soundings reached survey depths of approximately 100 m.

Figure 4 shows examples of inverted VESs (VESs 01, 04, 08, and 11). Two monitoring well profiles (MW 01 and MW 02) were correlated with VESs 01 and 04, respectively. Hydrostratigraphic correspondence could be observed between MWs and their respective VESs, especially when identifying the phreatic level, which was interpreted as being located approximately at 10 m of depth. This correspondence between geoelectrical results and well data should be considered when validating the hydrogeophysical model interpreted in the area.

In addition, VESs 08 and 11, located near the conductive geoelectrical anomaly (identified in the apparent iso-resistivity map), more precisely upstream and downstream from this feature, respectively, presented a low range of electrical resistivity values, varying between tens to hundreds of ohm.m. On the other hand, VESs 01 and 04, located upstream and more distant from the anomaly, presented relatively higher values, ranging between hundreds and thousands of ohm.m. Moreover, the existence of a possible contamination plume in the surroundings of VESs 08 and 11, which caused a reduction in local electrical resistivity values, could be inferred by comparing these VESs. This interpretation reiterates the previously obtained results in the qualitative evaluation of the apparent resistivity map in the earlier section.

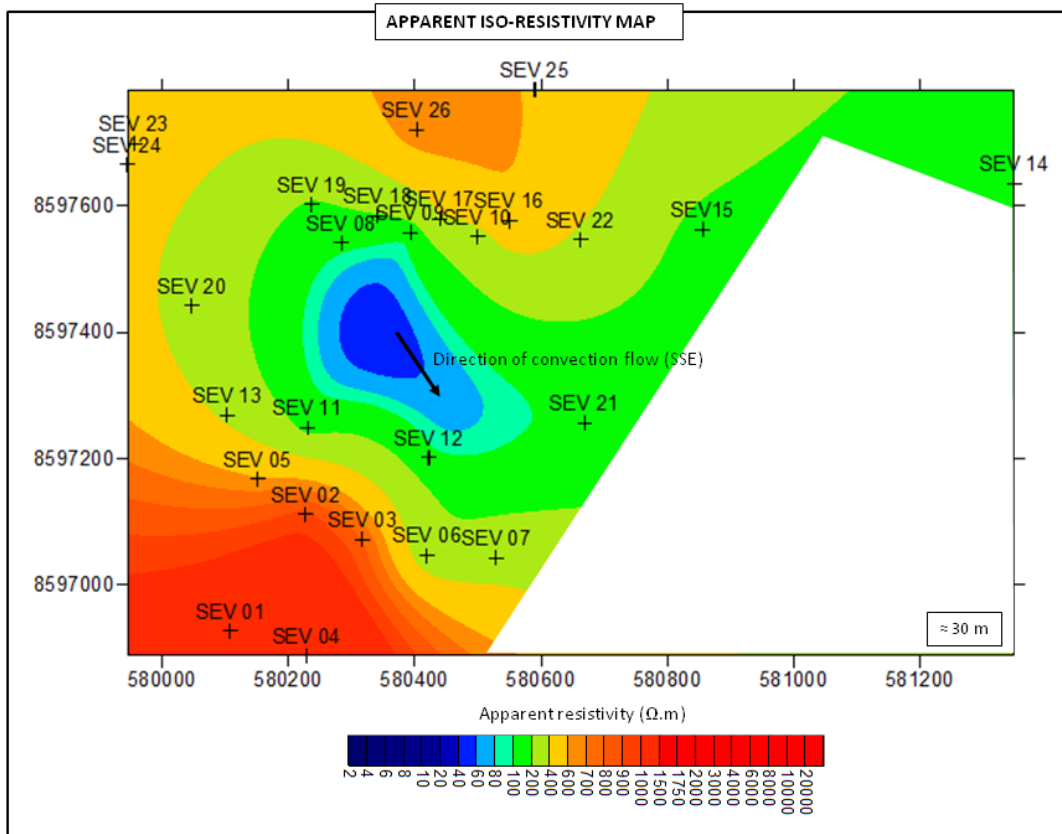


Figure 3 – Apparent iso-resistivity contour map.

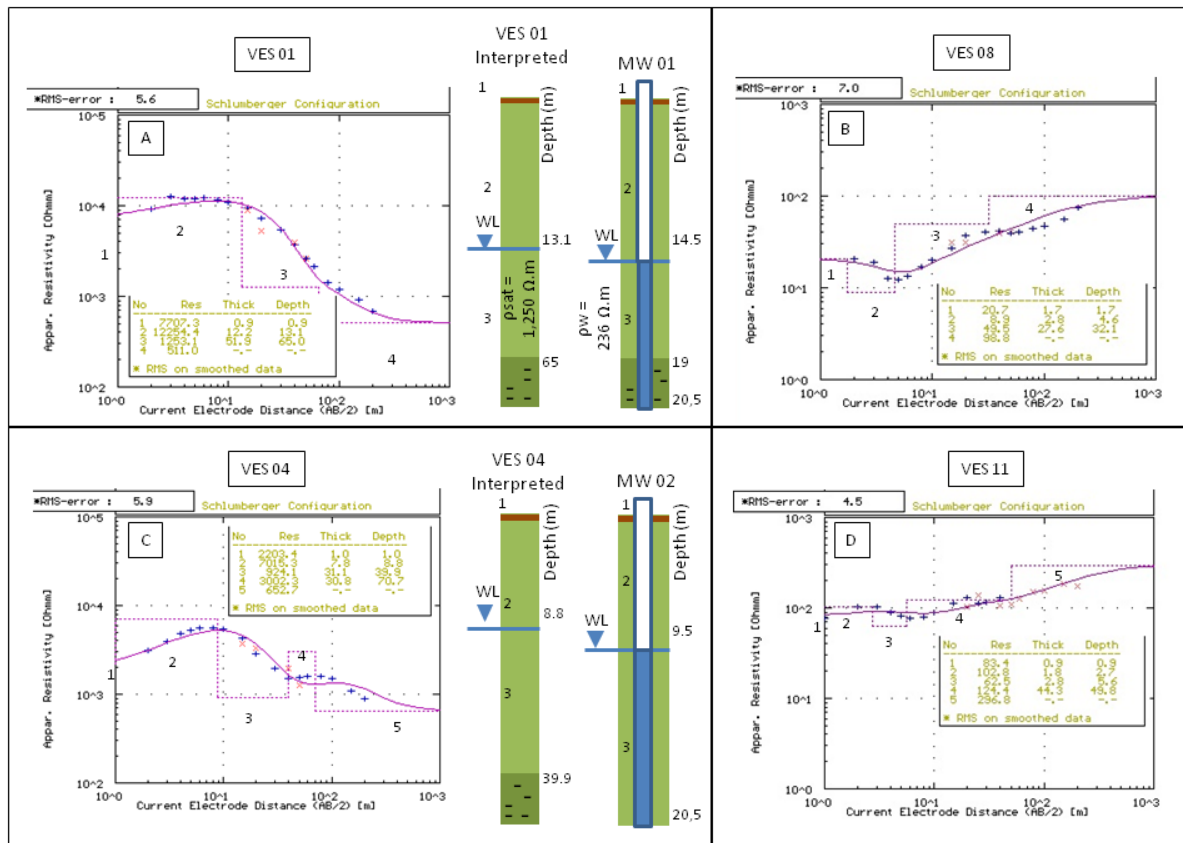


Figure 4 – One-dimensional inversion of VES 06.

Two-dimensional inversions

Two-dimensional inversions were conducted by integrating aligned VESs, which provided qualitative and quantitative information of the subsurface region. **Figure 5** presents two examples of two-dimensional inversion profiles (profiles 01 and 02), which showed an error below 2%.

Profile 01 is located northwards from the landfill, along the side of the Via Atlântica highway. It was built by integrating VESs 23, 19, 18, 17, 16, 22 and 15. This profile confirms the occurrence of a conductive anomaly close to VESs 18 and 19, between the 270 and 330-m positioning interval of the profile. The conductive anomaly to its right is possibly related to the occurrence of a layer/lens of clay/silt, identified from chargeability data results (induced polarization – IP) of VES 15. This anomaly was noted due to an increase in the contour at a depth of approximately 10 m, as clearly observed in the figure. Chargeability data, which were gathered along with electrical resistivity data, were not among the objectives of the present study and, therefore, have not been discussed herein.

Profile 02, located southwards from the landfill and built using VESs 13, 11, 12, and 21, also presented possible disseminated plumes, centered near VESs 11 and 12, between the 150 to 200-m and 300 to 350-m positioning intervals, respectively.

In general, the geoelectrical facies with the highest resistivity values (> 400 ohm.m) were attributed to the São Sebastião Formation. Facies with intermediate values (100 to 600 ohm.m), to the Marizal Formation. In turn, those with the lowest values (< 100 ohm.m), were attributed to contamination plumes and/or eventual occurrences of silt/clay.

Hydrodynamic parameters

The results of VESs offered information about thickness and resistivity of aquifer. These informations can be used to calculate the transversal resistance ($R=\rho h$) and longitudinal conductance ($C=\sigma h$), knowed as Dar-Zarrouk parameters, that can be use to estimate the aquifer parameters, for example hydraulic contuctivity and transmissivity (NIWAS and SINGHAL, 1981 and 1985).

In the upper free portion of the local aquifer, the parameters of porosity, hydraulic conductivity and transmissivity could be estimated using VES 01, groundwater conductivity measurements of MW 01 and empirical relationship results.

Archie (1942) established an empirical relationship between the formation factor (F) and porosity (ϕ):

$$F = a\phi^{-m} = \frac{\rho_{sat}}{\rho_w} \quad (1)$$

Winsauer et al. (1952), based on several experiments using sandstones, determined with a better error adjustment

the value 0.62 for the formation constant (a). Several authors consider the cementation exponent value between 1.3 (more friable) and 2.5 (more cemented). Considering that the first few meters of the São Sebastião Formation in the local subsurface consists of a more friable material, the interval between 1.3 and 2.0 was chosen as the cementation exponent.

With this information and using Archie's law, the porosity (ϕ) of the aquifer could be estimated as ranging approximately between 19.2 and 34.2%, with a median value of 26.7%. Lima (1993) attributed the interval between 24.6 and 32.7%, and a mean value of 27.5% for the porosity of the Massacará Group (Tucano Basin), a correspondent of the São Sebastião Formation (Recôncavo Basin).

Hydraulic conductivity (k) can be calculated using the Kozeny-Carman equation (KOZENY 1953; DOMENICO and SCHWARZ, 1990):

$$k = \frac{\delta g}{\mu} \left(\frac{p^2}{180} \right) \left(\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \right) \quad (2)$$

Considering water density $\delta = 1000 \text{ kg/m}^3$, gravity $g = 10 \text{ m/s}^2$, water dynamic viscosity $\mu = 0.0014 \text{ kg/ms}$, porosity $\phi = 19.2$ and 34.2% , and adopting the range of mean values of grain diameter of the Massacará Group, varying between $p = 0.05$ and 0.28 mm , provided by Lima (1993), the hydraulic conductivity was estimated between 0.11 and $3.37 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, with a median value of 1.74×10^{-3}

cm/s , approximately. The same author considered mean permeability value as approximately $1.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ for the first 500 m. This value is very close to the median value found in the present study and is within the estimated order of magnitude. Transmissivity ($T=kh$) presented results ranging between 4.7 and $145.6 \text{ m}^2/\text{d}$, with a median value of $75.2 \text{ m}^2/\text{d}$, approximately.

Aquifer vulnerability

Local aquifer vulnerability was evaluated using the GOD method (FOSTER and HIRATA, 1988), which considers the degree of confinement of aquifers, characteristics of the unsaturated (vadose) zone or confining layer, and either depth of phreatic level or depth of the confining layer bottom. Based on the results obtained in the present study, the local aquifer was classified as unconfined (free), the unsaturated zone was sandy, and the phreatic level was located at a depth of approximately 10 m. The local aquifer in the study area was classified as presenting high vulnerability to contamination.

Hydrogeophysical model

A hydrostratigraphic section that was representative for the region was constructed using the integrations between 1D inversions of VESs 26, 18, 08, 11, 05 and 01 and the remaining information obtained in this study (Figure 6). The

hydrogeophysical schematic model consists of two aquifer units within the upper 100 m: (i) a free one, represented by the surface cover, a layer of the Marizal Formation, and by the upper portion of the São Sebastião Formation; and (ii) a semi-confined one, represented by the lower portion of the São Sebastião Formation, subjacent to the clay/silt layer/lens found at depths of 50 to 65 m, approximately. The static level occurs, on average, at a depth of 10 m and groundwater flows towards SSE. In the unsaturated zone, possible

contamination plumes occur disseminated in the surroundings of the waste mass. In the saturated zone, a possible contamination plume of at least 300 m in length and 40 m in depth was found below the landfill area. Porosity and hydraulic conductivity for the free aquifer component were estimated at 26.7% and 1.74×10^{-3} cm/s, respectively. Transmissivity, considering the thickness of the free aquifer (50 m) was approximately 75.2 m²/d. This zone presented high vulnerability to contamination.

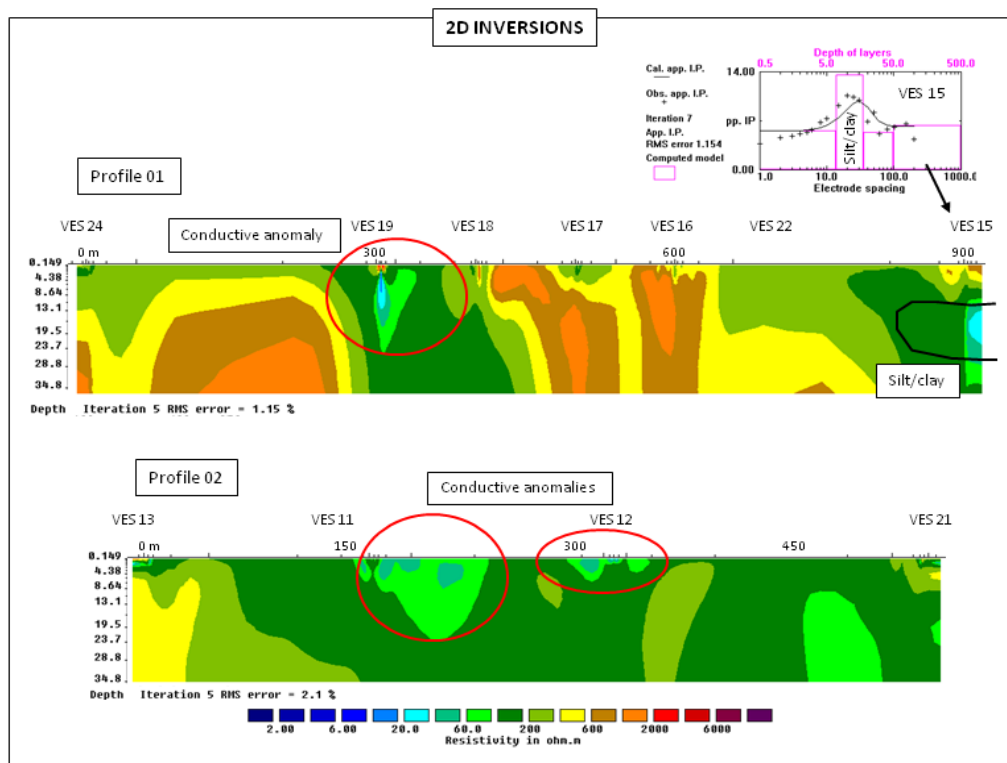


Figure 5 – Profiles 01 and 02 with two-dimensional inversion.

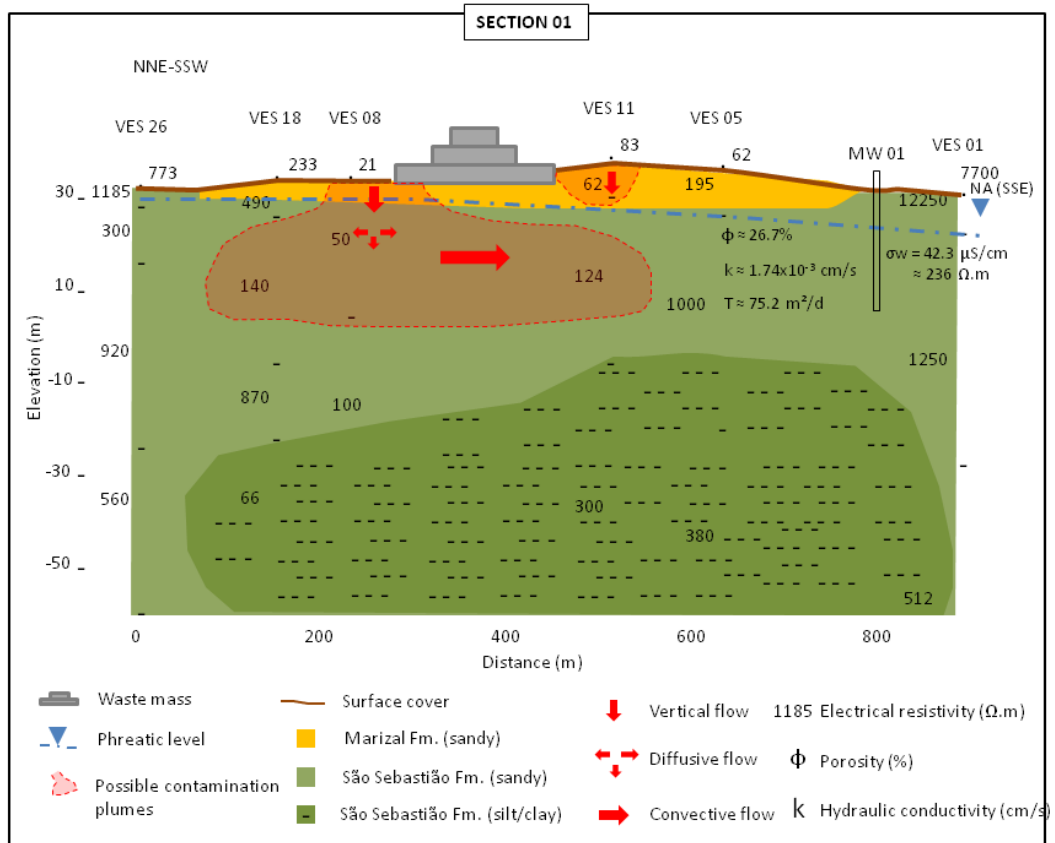


Figure 6 – Hydrostratigraphic section.

CONCLUSIONS

Results of the hydrogeophysical study, using the resistivity method with Schlumberger array, yielded information on the configuration, quality and potentiality of the Marizal-São Sebastião aquifer system, in the surroundings of the LIMPEC sanitary landfill, municipality of Camaçari, state of Bahia, namely: (i) apparent iso-resistivity map for the depth of approximately 40 m, which allowed the identification of a possible contamination plume with low-electrical resistivity and elliptical form, elongated towards SSE, the same direction of local underground water flow; (ii) one-dimensional inversions contributed to obtain the depth of the static level, layer

stratigraphy, and the direction of the underground water flow; (iii) contamination plumes and their subsurface behavior and distribution were identified using two-dimensional inversions; (iv) the parameters of porosity, hydraulic conductivity, and transmissivity were estimated using empirical relationships; and (v) aquifer vulnerability was classified as high, according to the evaluation using the GOD method. In general, the present study contributes to the increase in knowledge on the configuration and state of the Marizal-São Sebastião aquifer system. It exemplifies a potential application of hydrogeophysics to estimate hydrodynamic parameters, conduct geoenvironmental characterizations and evaluations of areas

that receive urban solid waste, which can help to elaborate decision-making strategies related to local land and groundwater resource management.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank NEHMA/UFBA, CPGG/UFBA and CCAAB/UFRB for infrastructure; CNPq for financed research scholarship; the Professors Olivar Lima, Sandro Machado and Cristovaldo Santos for their contributions and suggestions; and Caio Leão, Michel and José Mota for field assistance.

REFERENCES

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1992. NBR 8419 – **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**, Rio de Janeiro
- AMARANTE, EMS.; LIMA, OAL.; CAVALCANTI, SS. 2015. **Electrical resistivity method applied to study groundwater contamination around the Alagoinhas cemetery, Bahia, Brazil**. Brazilian Journal of Geophysics, 33(3): 489-501.
- ANOMOHANRAN, O. 2015. **Hydrogeophysical investigation of aquifer properties and lithological strata in Abraka, Nigeria**. Journal of African Earth Sciences, 102, 247–253.
- ARCHIE, GE. 1942. **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. PETROLEUM TECHNOLOGY, Shell Oil Co., Houston, Texas. 54 – 62.
- ARULPRAKASAM, V; SIVAKUMAR, R; GOWTHAM, B. 2013. **Determination of Hydraulic Characteristics Using Electrical Resistivity Methods – A Case Study from Vanur Watershed, Villupuram District, Tamil Nadu**. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics. 1 (4), 10-14.
- BORTOLIN, JRM; FILHO, WM. 2012. **Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade**. Revista do Instituto de Geociências USP. 12(3): 99 – 113.
- BRAGA, ACO. 2016. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. Oficina de Textos. São Paulo. 160 pp.
- BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- CARDARELLI, E; BERNABINI, M. 1997. **Two case studies of the determination of parameters waste dumps**. Journal of Applied Geophysics 36. 167- 174.

- CAVALCANTI, SS.; SATO, HK.; LIMA, OAL. 2001. **Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia.** Revista Brasileira de Geofísica. 19(2).
- CAVALCANTI, SS. 1999. **Hidrologia subterrânea na área do aterro sanitário de Salvador usando métodos geofísicos elétricos.** Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado, Salvador, 71p.
- DOMENICO, PA.; SCHWARZ, FW. (1990) **Physical and chemical hydrogeology.** Wiley, Hoboken, NJ, 324 pp
- ELIS, VR.; ZUQUETTE, LV. 2002. **Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos.** Revista Brasileira de Geociências. 32(1): 119 – 134.
- FARHANA, SS; WEEKES, JS; MELIKECHI, N; HOSSAIN, S; FLUMAN, DA; RANA, MM. 2016. **In-situ moisture content measurement of fresh municipal solid waste by wenner resistivity method.** Journal of Solid Waste Technology and Management. 42(3): 184 – 189.
- FOSTER, S; HIRATA, R. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p.
- GHIGNONE, JI. 1979. **Geologia dos Sedimentos Fanerozóicos do Estado da Bahia.** In: Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos. SME/CPM: 23–117, Salvador.
- GRELLIER, S; REDDY, KR; GANGATHULASI, J; ADIB, R; PETERS, CC. 2007. **Correlation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste in bioreactor landfill.** Geoenvironmental Engineering.
- IJEH, I; ONU, N. 2012. **Appraisal of the Aquifer Hydraulic Characteristics from Electrical Sounding Data in Imo River Basin, South Eastern Nigeria: the Case of Imo shale and Ameki Formations.** Journal of Environment and Earth Science. Vol. 2 (3) 61 – 77.
- KOEFOED O. 1979. **Geosounding principles: Resistivity sounding measurements.** Elsevier, Amsterdam. 276 pp.
- KOZENY, J. 1953. **Hydraulics.** Springer, Vienna.
- Lima, OAL. 1993. Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the Recôncavo-Tucano Basin, Bahia, Brazil. Geophysics. 55:1347-1356.
- LIMA, OAL. 1999. **Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari-Dias D'Ávila.** Tese Prof. Titular, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador. 123 pp.

- MASSOUD, U; SANTOS, F; KHALIL, MA; TAHA, A; ABBAS, AM. 2010. **Estimation of aquifer hydraulic parameters from surface geophysical measurements: a case study of the Upper Cretaceous aquifer, central Sinai, Egypt.** Hydrogeology Journal, 18: 699–710.
- MAZAC, O; KELLY, WE; LANDA, I. 1985. **A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers.** Journal of hydrology. 79: 1 – 19.
- MEJU, MA. 2000. **Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach.** Journal of Applied Geophysics 44. 115–150
- MOREIRA, CA; BRAGA, ACO e HANSEN, MAF. 2011. **Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica.** Revista Brasileira de Geociências. 41(3): 549 – 557.
- NIWAS, S; SINGHAL, DC. 1981. **Estimation of aquifer transmissivity from dar-zarrouk parameters in porous media.** Journal of Hydrology, 50: 393—399.
- NIWAS, S; SINGHAL, DC. 1985. **Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data.** Journal of Hydrology, 82 143—153.
- NIWAS, S; TEZKAN, BE; ISRAIL, M. 2011. **Aquifer hydraulic conductivity estimation from surface geoelectrical measurements for Krauthausen test site, Germany.** Hydrogeology Journal. 19: 307–315.
- OKIONGBO, KS; AKPOFURE, E. 2012. **Determination of Aquifer Properties and Groundwater Vulnerability Mapping Using Geoelectric Method in Yenagoa City and Its Environs in Bayelsa State, South South Nigeria.** Journal of Water Resource and Protection. 4, 354-362.
- PEREIRA, PA; LIMA, OAL. 2007. **Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtume no município de Alagoinhas, Bahia.** Revista Brasileira de Geofísica. vol.25, n.1, pp.5-19.
- PORCIÚNCULA, RJ. 2007. **Aplicação do método eletrorresistivo avaliação geoambiental da região de Alagoinhas, Bahia.** Trabalho Final de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Salvador. 34p.
- PORCIÚNCULA, RJ; LIMA, OAL. 2012. **Geoelectric evaluation of subsurface contamination at a gas and service station, Alagoinhas, BA, Brazil.** Brazilian Journal of Geophysics. 30(2): 201-212.
- PORCIÚNCULA, RJ; LEAL, LRB. 2019. **Geoelectric characterization for implantation a landfill in Simões Filho,**

Bahia, Brazil. Brazilian Journal of Geophysics. 37(4): 481 - 487.

SILVA, OB; CAIXETA, JM; MILHOMEM, PS; KOSIN, MD. **Bacia do Recôncavo.** Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro. 15(2): 423 – 431.

SOUPIOS, PM; KOULI, M; VALLIANATOS, F; VAFIDIS, A; STAVROULAKIS, G. 2007. **Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece).** Journal of Hydrology (2007) 338, 122– 131.

TELFORD, WM; GELDART, LP; SHERIFF, RE. 1990. **Applied Geophysics.** Cambridge University Press, Cambridge. 770 pp.

UTOM, AU; ODOH, BI; OKORO, AU. 2012. **Estimation of Aquifer Transmissivity Using Dar Zarrouk Parameters Derived from Surface Resistivity Measurements: A Case History from Parts of Enugu Town (Nigeria).** Journal of Water Resource and Protection, 4, 993-1000.

WINSAUER,WO; SHEARIN, HM; MASSON, PH; WILLIAMS, M. 1952. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. **BULLETIN OF THE AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS VOL. 36. NO. 2. 253-277.**

YADAV, GS. 1995. **Relating hydraulic and geoelectric parameters of the**

Jayant aquifer, India. Journal of Hydrology. 167. 23-38.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

A Hidrogeofísica pode desempenhar papel importante para mitigação de alguns problemas ambientais relacionados a questões dos resíduos sólidos urbanos, mais especificamente em estudos em aterros sanitários, tanto na fase de implantação, podendo contribuir na caracterização e avaliação geológico-geotécnica, quanto na fase de operação, no diagnóstico e monitoramento geoambiental. Face aos resultados alcançados nos estudos apresentados, algumas informações foram providas, a saber:

- (i) Pôde-se caracterizar o modelo geométrico-estrutural e hidroestratigráfico do sistema aquífero São Sebastião. Na área de estudo no município de Simões Filho, a cobertura local é predominantemente argilosa a siltosa e o grau de compactação é médio a rijo nos primeiros 10 m de profundidade, o aquífero local é do tipo semi-confinado a confinado, apresentando intercalações subhorizontais de camadas arenosas/siltosas e argilosas, com ocorrência de água (quando em camadas arenosas) à cota de aproximadamente 50 m. Já na área de estudo no município de Camaçari, a cobertura local é predominantemente arenosa, o aquífero é do tipo livre em sua porção superior e semiconfinado na inferior, o nível estático é raso e ocorre a aproximadamente 10 m de profundidade e o sentido do fluxo hídrico subterrâneo é SSE;
- (ii) A área planejada para a instalação de células de destinação final de resíduos no município de Simões Filho é favorecida devido à sua configuração hidroestratigráfica e à ocorrência de camadas argilosas na superfície do terreno que conferem um grau de impermeabilidade para a base das células e podem servir de insumo para o aterramento dos resíduos;
- (iii) A área onde está situado o aterro sanitário no município de Camaçari aparenta possuir passividade ambiental promovida por vazamentos de chorume ao subsolo e às águas subterrâneas locais. A fonte de possíveis contaminações está centrada sob o maciço de resíduos; as anomalias sugestivas de plumas de contaminação ocorrem de forma dispersa na zona vadosa e contínua e alongada em formato elipsoidal no sentido SSE, na zona saturada. A pluma alcança profundidades de 40 m ou superior e seu eixo de maior alongação é de aproximadamente 300 m de comprimento;

- (iv) A vulnerabilidade do aquífero a contaminações pôde ser avaliada utilizando o método GOD a partir das informações da litologia e profundidade do nível estático interpretados dos resultados. No município de Camaçari, o aquífero superior livre possui vulnerabilidade alta. Já considerando os resultados da área de estudo em Simões Filho, a vulnerabilidade à poluição do aquífero é baixa, uma vez que a superfície é predominantemente argilosa e o aquífero é do tipo semi-confinado a confinado;
- (v) Parâmetros de aquífero como a porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade puderam ser estimados utilizando relações empíricas como a de Archie e Cozeny-Carman. Para a área de estudo no município de Camaçari a porosidade foi estimada entre 19,2 e 34,2%, a condutividade hidráulica entre 0,11 a 3,37 cm/s e a transmissividade em 4,7 a 145,6 m²/d, para o componente aquífero superior livre. Já para a região de estudo em Simões Filho tais parâmetros não foram estimados devido à composição predominantemente argilosa;
- (vi) Correlacionando os resultados das áreas de estudo, pressupõe-se que a região de estudo em Simões Filho é predominantemente mais argilosa, composta por sucessivas intercalações de camadas arenosas e argilosas se comparada à região de estudo no município de Camaçari. Isso leva a suspeitar que os depósitos sedimentares da primeira região são relativamente de menor energia se comparados aos depósitos da última.

O sucesso dos resultados hidrogeofísicos depende do conhecimento integrado da Hidrogeologia e Geofísica e de associações a informações e dados diretos. As vantagens são a natureza não invasiva, a versatilidade de aplicação, a redução de custos operacionais, o aumento de volume de obtenção de dados e informações em tempo e espaço.

Este trabalho contribui para o fomento do uso de metodologias alternativas aplicadas à Hidrogeologia e aos resíduos sólidos urbanos. Configura-se como exemplo prático da potencialidade da Hidrogeofísica em apoio a tomadas de decisões, trazendo informações qualitativas e quantitativas sobre o sistema aquífero São Sebastião na Região Metropolitana de Salvador, estado da Bahia.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DE PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES

A participação do primeiro autor justifica-se em cumprimento aos requisitos para conclusão do seu curso de doutorado, no Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal da Bahia. A formação básica em Geofísica compete a este autor o desenvolvimento de projetos de pesquisa relacionados ao tema abordado em sua tese, cujo objetivo principal foi a aplicação de métodos geofísicos em estudos geoambientais e hidrogeológicos.

Já a participação do segundo autor, justifica-se pela orientação acadêmica cedida ao primeiro no Programa supracitado, além da sua vasta experiência na execução de projetos nas áreas da Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

Brazilian Journal of Geophysics

RBGf

Brazilian Journal of Geophysics
© Sociedade Brasileira de Geofísica
ISSN 0102-261X

PREPARAÇÃO DO MANUSCRITO

1. Todo manuscrito submetido para apreciação pelo Corpo Editorial da *Brazilian Journal of Geophysics (RBGf)* deverá ser enviado eletronicamente a partir do *site* da revista (www.rbgf.org.br), no *link* Submissão. Para iniciar o processo de submissão o autor responsável deverá estar cadastrado no sistema como “autor”. O sistema é autoexplicativo e, ao concluir o processo, o autor responsável receberá uma mensagem no e-mail cadastrado, confirmando a submissão e o número de identificação do artigo.
2. Antes de iniciar o processo de submissão, os autores devem verificar se o manuscrito atende integralmente às regras descritas no presente documento. O corpo do manuscrito deverá ser redigido em duas colunas (com exceção do *Abstract* e Resumo) com no máximo 10 páginas, incluindo figuras, texto e referências bibliográficas com espaçamento 1,5, usando a fonte Arial tamanho 11, justificado e com margens superior, inferior e esquerda de 2 cm e margem direita de 1,5 cm. Os autores devem submeter uma versão do artigo no formato doc ou PDF para avaliação.
3. O texto deverá ser escrito em inglês e conter um resumo em inglês (*abstract*) e outro em português; cada um com aproximadamente 200 palavras e não devem incluir referências bibliográficas. Os respectivos títulos do artigo devem ser apresentados nas duas línguas, além de uma versão abreviada em inglês (*running title*). **Para assegurar o anonimato da autoria do manuscrito no processo de revisão pelos pares, este documento não deve conter qualquer elemento que permita a identificação da sua autoria.** Todos os dados relacionados à identificação dos autores devem ser registrados no formulário *online* de submissão, podendo ainda ser enviados separadamente como “documento suplementar”.
4. Apresentar palavras-chave, após o *Abstract* e o Resumo, em inglês e português respectivamente, em número de três a cinco separadas por vírgula e não devem repetir palavras do título. Usar letra maiúscula apenas quando a ortografia exigir.
5. Adicionalmente ao trabalho submetido, deve-se enviar um “documento suplementar” que deverá conter o título do artigo em inglês e português, nome completo de cada autor, suas instituições de origem, endereço postal das mesmas e endereço completo para correspondência, incluindo telefone e correio eletrônico.

6. É obrigatória no texto do artigo, antes do *Abstract*, a indicação da área correspondente ao conteúdo do artigo (de acordo com as áreas descritas de 1-9 acima).
7. No ato da submissão é obrigatória a sugestão de pelo menos quatro nomes de possíveis revisores, que tenham condições de avaliar, criteriosamente, o manuscrito submetido à *RBGF*.
8. Os autores deverão explicitar qualquer potencial conflito de interesse relacionado ao artigo submetido. O conflito pode ser de natureza pessoal, comercial, política, acadêmica ou financeira. Caso necessário, os autores poderão solicitar o não envio do manuscrito a ser avaliado a determinadas instituições ou revisores, com o intuito de evitar possíveis conflitos de interesse científico.
9. As tabelas e figuras deverão ser inseridas ao longo do texto, conforme forem citadas, e acompanhadas das respectivas legendas. Não colocar legendas nas próprias figuras. As figuras e tabelas acompanhadas de suas respectivas legendas deverão ser apresentadas na língua inglesa. No texto, as citações das figuras e tabelas, quando estiverem entre parênteses, deverão ser referidas como (Fig. 1), (Figs. 2 and 3), (Table 1) e (Tables 2 and 3), por exemplo.
10. As imagens devem ser coloridas quando o emprego das cores for essencial para entendimento das figuras ou consideradas estritamente necessárias no contexto do manuscrito. A produção das imagens deve levar em consideração o entendimento destas até mesmo quando impressas em escala de cinza.
11. Anexar os arquivos originais das figuras (tiff ou jpg) somente quando for solicitado. As figuras serão publicadas com dimensões máximas de 16,2 cm × 22 cm, portanto, as imagens deverão ser criadas considerando possível redução, de modo que os detalhes, símbolos e letras fiquem nítidos após a redução. O autor deverá levar em conta que o tamanho dos caracteres, após a redução final, não poderá ser inferior a 1 mm.
12. As tabelas deverão ser autoexplicativas e não muito extensas. A densidade de informações nas tabelas deverá levar em conta possíveis reduções.
13. Notas de rodapé deverão ser indicadas por algarismo arábico, sobrescrito no texto e descritas no final da própria página.
14. Os autores deverão fornecer instruções claras sobre a composição dos símbolos em fórmulas ou equações. As equações deverão ser numeradas por algarismo arábico em sequência e entre parênteses ao lado direito da folha. No texto, deverão ser referidas como Eq. (1), (2) and (3), por exemplo.
15. Sempre, que for possível, devem ser utilizadas as unidades de acordo com o Sistema Internacional.

16. Os subtítulos posicionam-se à margem esquerda e deve ser observada, sempre que possível, a estrutura convencional dos artigos científicos na seguinte ordem:

INTRODUCTION

METHODOLOGY

Theoretical Revision

Laboratory Measurements

RESULTS

DISCUSSION

CONCLUSION

APPENDIX

ACKNOWLEDGMENTS

REFERENCES

17. Quando necessários, os agradecimentos e créditos às instituições de fomento deverão aparecer na seção *Acknowledgments*.
18. As referências bibliográficas serão relacionadas em ordem alfabética de sobrenome do primeiro autor. Quando existirem várias referências do mesmo primeiro autor, as mesmas deverão ser ordenadas primeiramente pela data da publicação em ordem crescente e em seguida prevalecerá o número de autores. Exemplos:

BOTT MHP. 1982. Stress based tectonic mechanisms at passive continental margins. In: SCRUTTON RA (Ed.). Dynamics of Passive Margins. Geodynamics Series, vol. 6, AGU, 147-153.

CHAPMAN DS & POLLACK HN. 1975. Global heat flow: a new look. Earth Planet. Sci. Lett., 28: 23-32.

MILANI EJ, BRANDÃO JASL, ZALÁN PV & GAMBOA LAP. 2000. Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas. Brazilian Journal of Geophysics, 18(3): 351-396.

OLIVEIRA VF. 1986. Análise de Dados Sísmicos registrados com Grandes Afastamentos entre a fonte e os receptores. Master Dissertation on Geophysics – Programa de Pós-graduação em Geofísica, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Universidade Federal da Bahia, Brazil, 1986. 109 pp.

SILVA EFF, PORTUGAL RS & VICENTINI A. 2007. Model rays for depth-to-time conversion. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 11., 2009, Salvador. Proceedings... Salvador, Brazil: SBGf, 2009. CD-ROM.

VENING MEINESZ FA. 1964. The Earth's Crust and Mantle. Developments in Solid Earth Geophysics (1), Elsevier, N.Y., 435 pp.

As abreviações dos nomes das revistas podem ser encontradas na base de dados na qual a revista é indexada ou no *World List of Scientific Periodicals*. No texto, as citações bibliográficas devem ser compatíveis com aquelas na lista de referências e vice-versa. As referências serão citadas como: Bott (1982), Chapman & Pollack (1975), Chandler et al. (1981), ou (Bott, 1982; Chapman & Pollack, 1975; Chandler et al., 1981), por exemplo. Deve-se distinguir, com uma letra minúscula (a, b, c...) após o ano, os artigos dos mesmos autores e datas idênticas.

19. Após o artigo ter sido aceito para publicação, os autores receberão instruções específicas para a preparação da versão final, que deverá ser submetida também via sistema. Neste momento, não será aceito o envio do artigo no formato PDF. Sugerimos que os autores submetam a versão final em MS-Word ou no sistema LaTeX, utilizando o formato padrão *article* ou algum outro formato semelhante. Para publicação, as figuras deverão ser enviadas com uma resolução de 300 dpi. As figuras e tabelas que não atenderem ao padrão da revista serão devolvidas ao autor para nova apresentação.
20. Caso as correções sugeridas pelos revisores não sejam atendidas pelos autores em 30 dias, o artigo poderá ter o seu processo suspenso devendo passar por um novo processo de submissão e avaliação.
21. Após a publicação, o autor correspondente receberá, gratuitamente, 1 exemplar impresso da edição na qual o artigo foi divulgado. A íntegra do manuscrito ficará disponível no *site* da *RBGF* (www.rbgf.org.br).
22. Entende-se que cabe ao autor que encaminha o manuscrito o compromisso de submissão de um trabalho original e inédito e a responsabilidade pela autorização de sua publicação por todos os coautores do trabalho e pela instituição na qual o trabalho foi desenvolvido. A reprodução no manuscrito de material já publicado em revistas e livros, fica sob a inteira responsabilidade dos autores, pelas implicações que possam envolver direitos de *copyright*.

ANEXO B – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 1

Decision Letter (GeoPhys-2019-0049.R1)

From: editor@sbgf.org.br
To: editor@sbgf.org.br
CC:

Subject: Brazilian Journal of Geophysics - Decision on Manuscript ID GeoPhys-2019-0049.R1
Body: 27-Feb-2020

Dear Prof. Porciúncula:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "GEOELECTRIC CHARACTERIZATION FOR IMPLANTATION A LANDFILL, IN SIMÕES FILHO, BAHIA, BRAZIL" in the current form for publication in the Brazilian Journal of Geophysics.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the Brazilian Journal of Geophysics, we look forward to your continued contribution to the Journal.

Sincerely,
Dr. Adriana Xavier
Editor-in-Chief, Brazilian Journal of Geophysics
editor@sbgf.org.br

Date Sent: 27-Feb-2019

ANEXO C – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2

Decision Letter (GeoPhys-2020-0023.R1)

From: editor@sbgf.org.br
To: editor@sbgf.org.br
CC:

Subject: Brazilian Journal of Geophysics - Decision on Manuscript ID GeoPhys-2020-0023.R1
Body: 23-Nov-2020

Dear Prof. Porciúncula:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "HIDROGEOFÍSICA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE AQUÍFERO EM ENTORNO DO LÍMPEC SANITÁRIO, MUNICÍPIO DE CAMAÇARI, BAHIA, BRASIL" in the current form for publication in the Brazilian Journal of Geophysics.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the Brazilian Journal of Geophysics, we look forward to your continued contributions to the Journal.

Sincerely,
Dr. Sílvia Rolim
Editor-in-Chief, Brazilian Journal of Geophysics
editor@sbgf.org.br

Date Sent: 23-Nov-2020