

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA NA REGIÃO COSTEIRA DE LAURO DE FREITAS UTILIZANDO O MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

RAFAEL DE BRITO OLIVEIRA

SALVADOR – BAHIA Setembro – 2017

### Caracterização Hidrogeológica na Região Costeira de Lauro de Freitas Utilizando o Método da Eletrorresistividade

por

Rafael de Brito Oliveira

Orientador: Profa. Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

#### GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Departamento de Geofísica

DO

Instituto de Geociências

DA

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora

Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho

Me. Diego Menezes Novais

Data da aprovação: 12/09/2017

Dedico aos meus pais, Plínio Duarte de Oliveira e

Maria das Graças de Brito Oliveira.

## Resumo

A área costeira de Vilas do Atlântico no município de Lauro de Freitas, no estado da Bahia, foi estudada através de três caminhamentos elétricos realizados nas ruas Praia de Marambaia, Praia Vermelha e na avenida Copacabana. Vale ressaltar que a área de estudo está próxima de dois importantes rios que cortam a cidade, os rios Joanes e Sapato, mostrados neste trabalho. Para auxiliar no estudo da subsuperfície da área foram utilizados os dados de duas SEV's (Sondagem Elétrica Vertical), uma SEV realizada na avenida Copacabana e outra na rua Carlos Conceição. Foi utilizado dados estratigráficos de poços de água disponibilizados pela CERB (Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia) para correlacionar com os dados dos caminhamentos elétricos e das SEV's. Através da inversão matemática dos caminhamentos elétricos realizados e do uso auxiliar na interpretação, das inversões unidimensionais, de duas sondagens, disponíveis na literatura, próximas à área de estudo, foi possível caracterizar geofísica e geologicamente a subsuperfície e mostrar a eficiência dos métodos de eletrorresistividade, destacando a importância da geofísica para investigações que possam caracterizar aquíferos, identificando parâmetros que tornam possível inferir sobre a qualidade da água (salinidade), ou até mesmo detectar poluição em aquífero. A investigação da subsuperfície dessa área é bastante relevante visto que, trata-se de um local de intensa urbanização e seus recursos hídricos são utilizados para consumo doméstico. Além disso, no presente trabalho, comparamos o desempenho de um software comercial (RES2DINV) já consagrado com um programa de código aberto (ELRIS2D). Observou-se que os resultados obtidos nesta comparação foram positivos, viabilizando a aplicação do programa de código aberto em trabalhos futuros.

## Abstract

The coastal area of Vilas do Atlântico in the municipality of Lauro de Freitas, in the state of Bahia, was studied through Electrical resistivity tomography (ERT) carried out in the streets of Marambaia, Praia Vermelha and Copacabana avenue. It is worth mentioning that the study area is Near two important rivers that cut the city, the rivers Joanes and Sapato, shown in this job. To assist in the study of the subsurface of the area, the data of two SEV's (Vertical Electrical Survey), an SEV held on Copacabana Avenue and another on Carlos Conceição Street. Stratigraphic data of water wells made available by CERB (Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia) to correlate with data from ERT's and SEV's. Through the mathematical inversion of electric and of the auxiliary use in the interpretation, of the one-dimensional inversions, of two surveys, available in the literature, close to the study area, it was possible to characterize geophysics and geologically subsurface and show the efficiency of the electrical methods, highlighting the importance of geophysics for investigations that may characterize aquifers, identifying parameters that make it possible to infer about water quality (salinity), or even detect pollution in aquifer. The investigation of the subsurface of this area is very relevant since it is a place of intense urbanization and its water resources are used for domestic consumption. Beyond in this paper, we compare the performance of commercial software (RES2DINV) already established with an open source program (ELRIS2D). It has been observed that the results obtained in this comparison were positive, making possible the application of the open source program in future work.

# Sumário

R	Resumo 3								
A	Abstract 4								
In	Introdução 10								
1	Car	cterização da Região de Estudo	11						
	1.1	Área de Estudo	11						
	1.2	Localização	11						
	1.3	Geologia	12						
	1.4	Formação Barreiras	14						
	1.5	Depósitos Quaternários	14						
		1.5.1 Terraços Arenosos	14						
		1.5.2 Dunas	15						
		1.5.3 Depósitos Flúvio Lagunares	15						
	1.6	Ciclo Hidrológico	15						
	1.7	Hidrologia	16						
		1.7.1 Hidrologia do Município	16						
	1.8	Propriedade Hidráulicas e Elétricas de Aquíferos	16						
		1.8.1 Intemperismo e Diagênese	16						
		1.8.2 Porosidade e Permeabilidade	17						
		1.8.3 Resistividade do Fluido Saturante	17						
		1.8.4 Resistividade Elétricas das Rochas	18						
		1.8.5 Hidrodinâmica do Meio Poroso	18						
	1.9	Águas Subterrâneas	20						
<b>2</b>	Met	odologia	<b>22</b>						
	2.1	Método Eletrorresistivo	22						
		2.1.1 Conservação da Carga Elétrica	23						

		2.1.2	Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	24						
		2.1.3	Caminhamento Elétrico	25						
		2.1.4	Resistividade Aparente	27						
	2.2	Invers	ăo de Dados de Eletrorresistividade	27						
		2.2.1	RES2DINV	29						
		2.2.2	ELRIS2D	29						
3	Aqu	iisição,	Tratamento e Interpretação dos dados geoelétricos	31						
	3.1	Aquisi	ção dos dados	31						
		3.1.1	Equipamento de medida	33						
		3.1.2	Local das linhas de caminhamento	34						
		3.1.3	Processamento dos Dados	34						
	3.2	Result	ados	40						
		3.2.1	Linha 1	40						
		3.2.2	Linha 2	41						
		3.2.3	Linha 3	42						
	3.3	Interp	retação de Dados	43						
4	Con	clusõe	S	46						
Agradecimentos										
Re	Referências									
Aı	iexo			53						
	4.1	Image	ns da aquisição dos dados	53						

# Lista de Tabelas

1.1	Schön pág180.				•		•		•			•			•						•							•								19
-----	---------------	--	--	--	---	--	---	--	---	--	--	---	--	--	---	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	----

# Lista de Figuras

1.1	Município de Lauro de Freitas, delimitação em linha vermelha (Fonte: Google	
	Maps)	12
1.2	Litotipos e poços localizados no município (CPRM., 2017)	13
1.3	Experimento de Darcy. Extraído de (Porciúncula e Lima, 2009)	19
1.4	Classificação das zonas de águas em subsuperfíci e $2(1)({\rm ABAS.},2017).$	21
2.1	Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (Braga, 2006)	24
2.2	Arranjo Schlumberger, $AB$ são os eletrodos de corrente e $MN$ os de potencial	
	(Novais, $2014$ )	25
2.3	Técnica de caminhamento elétrico utilizando arranjo dipolo-dipolo (Braga,	
	$1999).  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	26
3.1	Fotos do levantamento: em sentido horário a) disposição de uma linha de	
	caminhamento elétrico, b) equipamento utilizado (SYSCAL Pro), c) vista da	
	Praia Vermelha e d) Instalação de eletrodo nas margens do calçamento	32
3.2	Localização da área estudada, mostrando a localização dos poços de água	
	correlacionado e também as SEV'S (obtida no Google Earth e modificada) $% {\rm e} = 100000000000000000000000000000000000$	33
3.3	Perfil de resistividade da SEV 12: resistividade aparente medida (cruz azul)	
	e invertida (linha contínua roxa).	34
3.4	Perfil de resistividade da SEV 17: resistividade aparente medida (cruz azul)	
	e invertida (linha contínua roxa).	35
3.5	Perfis litologicos de poços vizinhos às linhas de levantamento, (CERB., 2017) $$	36
3.6	Dados de poços da CERB, obtidos no site do SIAGAS (2017). $\ldots$ $\ldots$	37
3.7	Equipamento SYSCAL PRO utilizado na aquisição dos dados	38
3.8	${\rm Localiza}$ ção da área da aquisição dos dados, imagem obtida através do software	
	Google Earth e modificada (2017)	39
3.9	Interface do ELRIS2D	39
3.10	Interface do RES2DINV	40
3.11	Linha 1 (RES2DINV)	41

3.12	Linha 1 (ELRIS2D)	42
3.13	Linha 2 (RES2DINV)	42
3.14	Linha 2 (ELRIS2D)	43
3.15	Linha 3 (RES2DINV)	43
3.16	Linha 3 (ELRIS2D)	44
4.1	a) calçada onde foi fixado os eletrodos; b) equipamento utilizado (SYSCAL PRO); c) eletrodos e marretas utilizados; d) fixação dos eletrodos no solo e) configurando o equipamento; f) rua praia vermelha; g) calçadão de Vilas do Atlântico, área próxima do mar; h) SYSCAL PRO e cabo condutor de energia	
	elétrica	54

# Introdução

A cidade de Lauro de Freitas está localizada no nordeste da Bahia, possui área de aproximadamente 60  $km^2$  e faz divisa com três municípios. Ao sul com Salvador, pela praia de Ipitanga e o Aeroporto Internacional de Salvador. Ao norte a cidade Camaçari, o rio Joanes que deságua na praia de Buraquinho delimita a divisa entre os municípios. A oeste está a cidade de Simões filho, a estrada CIA-Aeroporto estabelece a divisa entre os municípios. A leste está o Oceano Atlântico, onde situam-se as praia de Ipitanga, Buraquinho e Vilas do Atlântico, local onde foi feito o estudo geofísico. A bacia do Joanes-Ipitanga é parte do sistema de abastecimento humano de água potável da Região Metropolitana de Salvador (INEMA., 2017).

A água é indispensável para a existência da vida, o uso racional deste recurso é fundamental para que o suprimento da geração atual e futura seja garantido. Na região Nordeste do Brasil, sua escassez é mais evidente devido aos longos períodos de estiagem em algumas cidades do sertão, sendo necessário a utilização de meio alternativos como caminhões "pipa"para o abastecimento das cidades. Apesar do drama hídrico ser latente nesta região, foi a recente veiculação midiática da crise hídrica em São Paulo, no sudeste do país, que chamou à atenção de autoridades e governos para a necessidade do mapeamento dos aquíferos subterrâneos em regiões que sofrem com a seca. Conhecer melhor os recursos da subsuperfície torna possível traçar metas e planos para seu uso e preservação.

Um estudo hidrogeológico da área utilizando método geofísico de eletrorresistividade para caracterização da área é uma fonte de conhecimento para descrever e caracterizar a geologia local. Sendo assim, foram realizados dois caminhamentos elétricos perpendiculares à linha da praia e um paralelo com o objetivo de inferir a topografia do embasamento cristalino, identificar o nível estático no aquífero e compartimentar feições geológicas, rochas básicas e ácidas.

# Capítulo 1

# Caracterização da Região de Estudo

Neste capítulo serão abordados aspectos geológicos e hidrológicos da região de estudo; a descrição da área e os tipos de aquíferos. A porção está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Joanes, na extremidade da foz está o Oceano Atlântico, sofrendo desta forma a influência do avanço de águas salobras sobre o aquífero subterrâneo. Trabalhos prévios (Santiago, 2002), (Pitombo, 98), dão conta de que o aquífero é do tipo cristalino fraturado e dados construtivos de poços (CERB., 2017) indicam que o embasamento é raso e alterado.

### 1.1 Área de Estudo

A região de estudo cobriu uma superfície de 14400 m<sup>2</sup>, compreendida entre as coordenadas UTM 577630.34 e 57781.83 E e 8575747.92 e 8575560.56 N na região costeira do município de Lauro de Freitas, que faz parte da Região Metropolitana de Salvador, fazendo divisa ao sul com Salvador e ao norte com o município de Camaçari, no Litoral Norte do Estado da Bahia.

A área estudada é marcada por urbanização e está próxima a foz do Rio Joanes e ao Rio Sapato, que deságua no Rio Joanes, o qual faz parte da área de proteção ambiental (APA) de Joanes –Ipitanga , decreto estadual nº 7.596 de 5 de junho de 1999. A bacia do Joanes-Ipitanga, é parte do sistema de abastecimento humano de água potável da Região Metropolitana de Salvador (INEMA., 2017).

### 1.2 Localização

Lauro de Freitas é um município da Região Metropolitana de Salvador, no Litoral Norte do estado da Bahia, no Brasil (Figura 1.1). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2016 sua população era estimada em 194 641 habitantes (IBGE., 2017), espalhados em 57  $\text{km}^2$ . O município é um dos que mais cresce no país e foi considerado o quarto município que mais gerou empregos no ano de 2009, fato que se repete ao longo dos últimos anos.



Figura 1.1: Município de Lauro de Freitas, delimitação em linha vermelha (Fonte: Google Maps).

### 1.3 Geologia

A geologia da região está relacionada à bacia sedimentar do recôncavo, formada por uma sequência de rochas sedimentares mesozóicas (cretáceas), terciárias e quaternárias pertencentes á Bacia do Recôncavo, formada a partir de um rifte abortado, cujo movimento de tração tectônica cessou, impedindo-as de se transformarem em bacias de margem continental. As rochas cristalinas fazem parte de um conjunto altamente metamorfizado do cráton do São Francisco, composto de gnaisses e granulitos, exibindo um solo residual avermelhado rico em óxido de ferro (Cruz, 2012).

Os sedimentos cretáceos são geralmente arenosos intercalados por folhelhos, siltitos, calcários e conglomerados representados pelas formações Aliança, Itaparica, Ilhas, São Se-

bastião e Marizal. Os depósitos terciários correspondem ao grupo Barreiras, caracterizado por um conjunto de camadas arenosas e argilosas de cores variadas e, os sedimentos quaternários são formados de aluviões, areias, argilas, materiais orgânicos e depósitos litorâneos (Santiago, 2002). A Figura 1.2 representa a litologia e os poços de água existentes na região.



Depósitos litorâneos: depósitos de areia e argila

Figura 1.2: Litotipos e poços localizados no município (CPRM., 2017).

### 1.4 Formação Barreiras

A Formação Barreiras compõe quase todo o terciário da Bahia, sendo que, sua cobertura é de origem sedimentar continental, forma tabuleiros de arenitos argilosos acima do nível do mar, apresenta sedimentos de granulometria variada formados por areia, silte e argila com concreções ferruginosas. Quase que todas as capitais da região do Nordeste localizam-se em cima da Formação Barreiras com sotoposição de calcáreos e arenitos, para alcançar o cristalino que aflora (Soares, 2002). A espessura dessa formação tem uma variação devido ao fato da erosão superficial. Geralmente os depósitos de argila relacionados à Formação Barreiras apresentam estratos horizontais compostos de argila caulinítica de colorações cinzaavermelhada, roxa, amarela e branca (Cruz, 2012).

### 1.5 Depósitos Quaternários

O período quaternário foi marcado por quatro eventos glaciais que geraram diversos efeitos nas taxas de deposição, na pedogênese e nos regimes fluviais. A área que foi desenvolvido esse trabalho apresenta em toda sua extensão depósitos quaternários, que são sistemas deposicionais recentes presentes próximo ao Rio Joanes. Geralmente esses tipos de depósitos apresentam sedimentos inconsolidados de origem fluvial, eólica e marinha. Oriundos de um período geológico com ocorrência de várias mudanças climáticas e do nível dos oceanos. Devido a esse processo, formaram-se depósitos marinhos associados a eventos transgressivos, e depósitos continentais, que são associados a eventos transgressivos (Bittencourt et al., 2010). Os depósitos quaternários são divididos em: terraços arenosos, dunas e flúvio lagunares.

#### 1.5.1 Terraços Arenosos

Os terraços arenosos são subdivididos em: i) terraços marinhos pleistocênicos: estão relacionados a um processo final de transgressão pleistocênica e de uma regressão posterior. Apresentam areias de coloração branca na superfície mudando depois para marrom a preta, secundária, geralmente dois metros abaixo; ii) terraços marinhos halocênicos: acontecem na parte externa dos terraços marinhos pleistocênicos, em níveis de topografias mais baixos. Eles tem relevância por terem granulometria mais finas e possuírem estruturas sedimentares completamente preservadas. Em ambos os terraços marinhos foi detectado a presença de tubos fósseis *Ophiomorpha* (Santos Filho, 2000).

#### 1.5.2 Dunas

Tipo de depósito presente em toda região costeira de salvador e chegando até o norte do estado. Esses depósitos são subdivididos em: i) dunas internas: caracterizada por predominância de grãos angulosos, diferenciando bastante dos terraços arenosos holocênicos e pleistocênicos (Santiago, 2002). ii) dunas externas: apresentam areias com grãos de grau de maior do que das dunas internas, é bastante semelhante com a textura dos terraços marinhos pleistocênicos (Santos Filho, 2000). iii) dunas litorâneas atuais: são pequenas dunas situadas atrás das praias, sendo estas as fontes responsáveis pela formação das pequenas dunas (Santos Filho, 2000).

#### 1.5.3 Depósitos Flúvio Lagunares

Esses tipos de depósitos são comuns em regiões costeiras em todo o mundo, devido as ações dos rios, variações da maré e o relevo da bacia de drenagem que modelam a formação desses depósitos. Geralmente seus topos estão localizados de 15 a 20 metros acima do nível do mar. Constituídos de areias branca, mal selecionadas, seixos arredondados a angulosos (Araújo, 2015).

### 1.6 Ciclo Hidrológico

A água distribuída no planeta, pode ser analisada através do ciclo hidrológico. Este ciclo é caracterizado pela constante mudança de estado físico e localização de toda água utilizável pelo homem. As águas dos oceanos, que cobrem cerca de três quartos do globo terrestre sofrem continuamente a ação da radiação solar provocando o aumento de energia das moléculas, as quais passam do estado líquido para o estado gasoso, este fenômeno é denominado de evaporação. Outro fenômeno que também muda o estado físico da água de líquido para gasoso é a transpiração, onde as plantas perdem água para a atmosfera. O vapor gerado é transportado pelo movimento das massas de ar, e pelo fato de ser menos denso, tende a subir afastando-se da crosta terrestre (Martins, 2010). Com o afastamento, o vapor encontra temperaturas mais baixas o que causa a condensação e a formação de gotículas. Estas gotículas se unem e geram a precipitação na forma de chuva, granizo ou neve. Depois que precipita sobre a terra, a água pode tomar vários caminhos, parte não chega a atingir o solo, ficando retida pela vegetação, o que é denominado de interceptação. Uma parte fica temporariamente retida no solo onde caiu podendo voltar á atmosfera por evaporação ou transpiração das plantas (Martins, 2010). Em muitos casos estes fenômenos são estudados em conjunto sob o nome de evapotranspiração. A evapotranspiração potencial representa um limite superior para a evapotranspiração real. Uma parte da água escoa sobre a superfície do solo (escoamento superficial), ou através do solo (escoamento sub-superficial), normalmente por canais naturais como vales e rios, que levam a água para pontos de reunião como lagos, mares e oceanos. A parte restante da água, penetra no solo, o que é chamado de infiltração. Grande parte da água que penetra no solo é retida na zona das raízes das plantas, podendo retornar á superfície pelas plantas ou pela capilaridade do solo . Outra parte, porém movimenta-se através dos vazios, por percolação até atingir uma zona saturada, formando o lençol subterrâneo. A água subterrânea poderá aparecer novamente na superfície em locais de nível inferior ao que penetrou, alimentando rios ou mesmo os próprios oceanos (Feitosa e Filho, 2000).

### 1.7 Hidrologia

A hidrologia realiza o estudo da água no nosso planeta e sua distribuição. Sabemos que as águas subterrâneas representam aproximadamente 30% da água doce do mundo e pode ser encontrada nos poros das rochas sedimentares ou através de falhas, fissuras e fraturas de rochas cristalinas (Braga, 2006).

#### 1.7.1 Hidrologia do Município

Os principais rios que cortam município de Lauro de Freitas são o Rio Joanes, que deságua no Oceano Atlântico e separa Lauro de Freitas e Camaçari, e o Rio Ipitanga, que deságua no Joanes. Existem alguns córregos na cidade e outros dois rios, Sapato e Goro, entretanto ambos estão em acelerado processo de deterioração pela ação humana.

### 1.8 Propriedade Hidráulicas e Elétricas de Aquíferos

Compreender como cada elemento constituinte da rocha reservatório saturada influe na propriedade elétrica da mesma, é preciso enumerar e correlacionar fisicamente parâmetros hidráulicos e elétricos de aquíferos. Além disso, o processo de formação da rocha é preponderante na definição dos aspectos hidráulicos da rocha reservatório.

#### 1.8.1 Intemperismo e Diagênese

A desagregação das rochas no topo da litosfera é ocasionada por processos físicos, químicos e biológicos. As reações químicas, as águas subterrâneas e as rochas desagregadas geram alterações físico-químicas (intemperismo e diagênese), que alteram a morfologia de seus espaços porosos (Moraes, 97). Podendo ser destacado a formação de argila, que modifica muito as propriedades físicas das rochas nos quais estão presentes. Outro processo que gera alterações nas estruturas porosas originais das rochas é o fraturamento, devido ao seu comportamento quebradiço que ocorre geralmente em regiões mais superiores da crosta. Em regiões tropicais, os minerais constituintes das rochas, exceto o quartzo, turmalina e zircão, são transformados em argilas, hidróxidos de ferro e alumínio e íons dissolvidos nas águas. Nessas situações, a camada intemperizada tem uma importante função hidráulica ao controlar a recarga e a produtividade dos aquíferos (Mota, 2004). O processo de diagênese se inicia logo após a deposição das rochas sedimentares e prossegue com as subsidências e soerguimentos. As mudanças ocorridas estão relacionadas a composição mineral da rocha e os fluidos presentes em seus espaços, além da influência da temperatura e pressão, que são muito importante. Pesquisas realizadas sobre a diagênese de sucessões de arenitos, folhelhos e de carbonatos, apontam que os solventes necessários para ocorrer a solubilidade de alumíniosilicatos, óxidos e carbonatos se originam em folhelhos ricos em matéria orgânica que são gerados devido a maturação geotérmica da matéria orgânica (Lima, 2014).

#### 1.8.2 Porosidade e Permeabilidade

A porosidade e a permeabilidade são duas propriedades essenciais para o estudo da qualidade de um reservatório. A porosidade ( $\phi$ ) é definida como a quantidade de espaços vazios normalmente ocupados por fluidos numa rocha. Podendo ser expressa pela razaõ matemática do volume de vazios ( $\Delta V_v$ ) pelo volume total da rocha ( $\Delta V_t$ ).

$$\phi = \frac{\Delta V_v}{\Delta V_t} \times 100. \tag{1.1}$$

A porosidade pode ser primária que ocorre durante o processo de formação da rocha (diagênese) e a secundária que ocorre após a formação da mesma através de esforços mecânicos que causem fissuras ou fraturas.

A permeabilidade é a habilidade ou a capacidade que a rocha tem de permitir o fluxo de um fluido no seu interior. Essas propriedades estão relacionadas diretamente com a distribuição, seleção e orientação dos grãos (Lima, 2014).

#### 1.8.3 Resistividade do Fluido Saturante

Um aquífero poroso constitui-se de matriz rochosa e do fluido que preenche esses espaços. Daí que a propriedade elétrica da rocha como um topo depende das características físicas individuais dos minerais que compõe a parte sólida e também das que compõe o fluido saturante. Em aquíferos costeiros, o aumento da condutividade elétrica do pacote pode estar relacionado a presença de água salina em maior concentração nos poros da rocha. A intrusão salina ocorre em regiões costeiras onde a água doce está em contato com a água do mar. Enquanto a água doce se escoa para o mar, a água salgada, mais densa, tende a penetrar no aquífero, formando uma cunha sob a água doce. Este fenômeno pode acentuarse e ser acelerado, com consequências graves, quando nas proximidades da linha de costa, a extração de grandes volumes de água doce subterrânea provoca o avanço da água salgada no interior do aquífero e em seguida ocorre salinização da água dos poços ou dos furos que nele captem (Gurgel, 2005).

#### 1.8.4 Resistividade Elétricas das Rochas

As rochas tem suas resistividades elétricas geralmente controladas pela condução eletrolítica em meio aquoso através dos poros das rochas, fraturas, falhas ou zonas de cisalhamento. Esse modelo foi sugerido para camadas mais superficiais da crosta, podendo chegar até quinze quilômetros de profundidade. Neste processo ocorre a condução eletrolítica através do transporte de cargas elétricas devido aos íons oriundos na dissociação dos sais. Quanto maior for a quantidade de íons dissolvidos, maior será a capacidade de conduzir corrente elétrica (maior condutividade), isto justifica a baixa resistividade de regiões cuja a salinidade da água é elevada. Os argilominerais diminuem a resistividade das rochas pelo fato de possuírem cargas negativas distribuídas em sua superfície, fazendo com que se tenha um caminho adicional superficial para a condução da corrente elétrica (Andrade, 2013).

Na tabela 2.1 são mostrados os valores de resistividade de algumas rochas. A lei de Archie (1942) relaciona o efeito da porosidade das rochas com a resistividade vide equação 1.2.

$$\rho_r = a\rho_w \phi^{-m} S_w^{-n}, \tag{1.2}$$

onde:  $\rho_r$  é a resistividade da rocha,  $\rho_w$  a resistividade da água interporosa,  $\phi$  a porosidade, m o índice de cimentação, n o índice de saturação,  $S_w$  a saturação da água e a o coeficiente litológico.

#### 1.8.5 Hidrodinâmica do Meio Poroso

Em um meio poroso saturado total ou parcialmente por um fluido, existe um gradiente de pressão. Esse fluido tenderá a se deslocar na direção oposta ao gradiente, fato que pode ser observado experimentalmente. A lei de Darcy descreve o comportamento dinâmico da água em um aquífero (Figura 1.3).

Darcy concluiu que o fluxo (Q) é diretamente proporcional a diferença de potencial hidráulico  $(h_1 - h_2)$ , a constante de permeabilidade (K) e a área filtrante (A) e inversamente proporcional ao tamanho do filtro (L). Como descrito pelas equações.

Rocha	Resistividade $(\Omega.m)$
Ígnea	$10^2 - 10^6$
Metamórfica	$50 - 10^{6}$
Argila	$0,8 - 10^2$
Areia mole	0,5 - 10
Areia dura	$9 - 10^2$
Areia	$50 - 10^3$
Arenito	$50 - 10^3$
Calcáreo poroso	$90 - 10^4$
Calcáreo denso	$10^3 - 10^6$

Tabela 1.1: Schön pág180.



Figura 1.3: Experimento de Darcy. Extraído de (Porciúncula e Lima, 2009).

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \tag{1.3}$$

Quando a água é contida por um meio poroso em subsuperfície, denominamos este sistema de aquífero e este volume de fluido, de água subterrânea. A velocidade do fluxo neste ambiente costume ser muito lenta dependendo da porosidade efetiva, ou seja a interconexão entre poros não garante o escoamento do fluxo, pois gargantas de poro muito estreitas tendem a aprisionar fluido, surgindo gradiente de pressão muito maior para o movimento do volume líquido (Lima, 2014).

## 1.9 Águas Subterrâneas

As águas subterrñeas são classificadas verticalmente em duas zonas segundo Feitosa e Filho (2000):

- Zona Saturada: Localizada abaixo do nível freático, é a zona em que todos espaços vazios estão preenchidos com água.
- Zona não Saturada ou Zona de Aeração: Lozalizada entre a superfície freática e a superfície do terreno, sendo que nesta zonas os poros estão parcialmente preenchidos por ar e vapor d'água. Essa zona é subdividida em três zonas diferentes:
  - Zona Capilar: Começa na superfície freática e termina na ascensão capilar da água.
  - Zona Intermediária: Começa no limite capilar da água e termina no alcance das raízes das plantas. Essa zona também recebe o nome de zona de evapotranspiração.
  - Zona de Água no Solo: Localizada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno.

A percolação de água subterrânea nas rochas, depende das estruturas geológicas, sendo dividido da seguinte maneira (Feitosa e Filho, 2000):

- Aquífero: Unidade capaz de armazenar e transmitir água subterrânea, tem boa porosidade e permeabilidade.
- Aquiclude: Formado por material poroso, ocorre armazenamento de água, porém com baixa capacidade de transmissão de fluido.
- Aquifugo: Não tem conectividade entre os poros, não sendo possível o armazenamento ou transmissão de água.
- Aquitardo: Formado por material poroso, porém tem baixo armazenamento e circulação de água.

De acordo com a porosidade os aquíferos são classificados da seguinte forma (Feitosa e Filho, 2000):



Figura 1.4: Classificação das zonas de águas em subsuperfície (ABAS., 2017).

- Cárstico: Composto por rochas carbonáticas. A água percorres os espaços gerados através da dissolução de calcário.
- Poroso ou Granular: Composto por rochas sedimentares. A água circula através dos poros.
- Fraturado ou Fissural: Composto por rochas cristalinas que sofreram fraturas e fissuras, criando cavidades permitindo a transmissão da água.

De acordo com a pressão os aquíferos são classificados da seguinte forma (Feitosa e Filho, 2000):

- Livre: Possui uma camada permeável no topo e outra impermeável na base, sendo que esse aquífero sofre apenas a pressão atmosférica.
- **Confinado**: Possui uma camada impermeável na base e outra no topo, sendo que a pressão dentro deste aquífero é maior que a pressão atmosférica.

Definidos os diferentes aspectos que constituem um aquífero e como parâmetros hidráulicos e elétricos podem ser usados para caracterizá-los, apresentamos a seguir os princípios físicos das técnicas geofísica dos métodos elétricos, que usa medidas elétricas na superfície do terreno que são aplicáveis ao delineamento de aquíferos subterrâneo.

# Capítulo 2

## Metodologia

A investigação geofísica do aquífero litorâneo, desenvolveu-se a partir das etapas de levantamento de dados na literatura, levantamento de campo, inversão matemática e interpretação. Dados adquiridos de levantamentos já realizados através de SEV's (Sondagem Elétrica Vertical), provenientes de uma pesquisa prévia na área. Dados de poços de água, disponibilizadas pelo SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e arquivos de informação geológica disponíveis no site da CPRM (Companhia de de Pesquisa de Recursos Minerais). Os dados dos caminhamentos elétricos realizados nesta pesquisa foram processados através de inversão matemática. Nas inversões de resistividade aparente utilizamos os softwares RES2DINV (Geotomo, 2017) e ELRIS2D (Akca, 2016). As SEV's utilizadas foram invertidas com o programa RESIST (Santiago, 2002). Depois de obter os resultados das inversões das resistividades aparente, utilizamos os dados de poços de água correlacionando-os com os resultados das inversões e a partir daí sugerir um modelo geológico para a região.

### 2.1 Método Eletrorresistivo

O método eletrorresistivo é baseado na medida da diferença de potencial entre dois pontos devido a excitação sobre um substrato rochoso de campo elétrico artificial criado pela injeção no solo de uma corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa. O primeiro a introduzir fontes de corrente elétrica na terra, para estudar a subsuperfíe a partir de medidas de potencial na superfície de um terreno, foi Conrad Schlumbeger (Machado, 2008). Esta ideia consistia em comparar a distribuição de potencial produzida por uma corrente aplicada na terra real, com a distribuição que existiria se a terra fosse homogênea (Johansen e Sorensen, 1979). Com base nestes estudos surgiu o método de eletrorresistividade que foi aplicado pela primeira vez em 1920 para a prospecção de ferro na Normandia. Portanto, mapeando-se a distribuição do potencial elétrico por meio de dois eletrodos, obtém-se a resistividade elétrica aparente das rochas que depende de fatores como seu conteúdo em fluido, a constituição mineral, a textura e a estrutura do material.

A densidade de corrente  $\mathbf{J}$  e a intensidade do campo elétrico  $\mathbf{E}$  estão relacionadas pela lei de Ohm (Telford et al., 1976):

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{2.1}$$

O fluxo de corrente em um cilindro de comprimento l e considerando que o campo elétrico é paralelo ao seu eixo (z), longitudinal e homogêneo na seção transversal é dado por (Sato, 1998):

$$i = \int_{area} j_z da = \sigma A E_z \tag{2.2}$$

Sendo que, a diferença de potencial nas extremidades do cilindro é

$$\Delta \mathbf{v} = -\int_{z_0}^{z_1} e_z dz = le_z \tag{2.3}$$

eliminando  $e_z$ , tem-se

$$\Delta \mathbf{v} = Il/(\sigma A) = I(\rho l/A) \tag{2.4}$$

Sendo  $(\rho l/A)$  a resistência elétrica, então teremos a resistividade aparente ou equivalente

$$\rho = \frac{\Delta \mathbf{v}A}{Il} \tag{2.5}$$

#### 2.1.1 Conservação da Carga Elétrica

Sendo s uma superfície fechada e supondo que não existem fontes de cargas elétricas no volume contido pela superfície, a corrente elétrica total que flui para fora desta superfície deve ser igual a taxa de decaimento da carga elétrica Q contida no volume interior dessa superfície, então:

$$\oint_{S} \mathbf{J}.d\mathbf{s} = -\frac{\partial Q}{\partial t}; \tag{2.6}$$

sendo, 
$$Q = \int_{\vartheta} q d\vartheta.$$
 (2.7)

Sabendo que  $\vartheta$  é o volume limitado pela superfície s, que q representa apenas as cargas livres, ou seja,  $\vec{J}$  não inclui efeito de polarização. A integral de superfície pode ser expressa com uso do teorema da divergência, e a derivada em relação ao tempo pode ser transferida para o integrando desde que o volume  $\vartheta$  encontre-se fixo. Assim, teremos que

$$\oint_{S} \mathbf{J}.d\mathbf{s} = \int_{\vartheta} \nabla.\mathbf{J}d\vartheta = -\int \frac{\partial q}{\partial t} d\vartheta, \qquad (2.8)$$

sendo verdadeiro para qualquer volume  $\vartheta$ , o que permite escrever a "equação da continuidade" na forma,

$$\nabla .\mathbf{J} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0, \qquad (2.9)$$

que é a expressão do princípio da conservação da carga elétrica (Sato, 1998).

#### 2.1.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Sondagem elétrica vertical é utilizada para investigações verticais das variações de um parâmetro físico com a profundidade, efetuadas na superfície do terreno a partir de um ponto fixo. Os eletrodos que são fixados no terreno tem que estar alinhados e de forma simétrica. Durante o processo de aquisição dos dados, a direção do arranjo e o centro do dipolo de potencial continuam fixos, Figura 2.1 (Braga, 2006).

Aumentando as distâncias entre os eletrodos de corrente  $A \in B$ , consequentemente aumentará a área de medição da subsuperfície investigada, alcançando camadas cada vez mais profundas. Permitindo assim, obter resultados que mostrem variações do parâmetro físico escolhido. Para obter um bom resultado da SEV, é preciso que os estudos sejam feitos, de preferência em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas em relação ao parâmetro físico estudado e limitado por planos paralelos à superfície do terreno, ou seja, área com estratificação. Geralmente em levantamento de dados usando SEV's, o arranjo de eletrodos mais utilizado é o Schumberger, fato explicado pela qualidade das curvas de campo, facilidade e menor tempo de execução do levantamento, menor sensibilidade das variações laterais de resistividade e ruídos provocado por correntes naturais no solo (Luz, 2016).



Figura 2.1: Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (Braga, 2006).

#### Arranjo de Eletrodos da SEV: Schlumberger

O arranjo escolhido foi o Schlumbeger (Figura 2.2), que consiste no aumentando da distânciamento entre os eletrodos de corrente, mantendo fixos os eletrodos de potencial, até ser atingido o limite de precisão instrumental do sistema utilizado (Novais, 2014).



Figura 2.2: Arranjo Schlumberger, AB são os eletrodos de corrente e MN os de potencial (Novais, 2014).

As vantagens desta configuração está condicionado ao fato dos eletrodos de potencial serem fixos, ou seja, não há deslocamento durante a sondagem, gerando economia de material e esforço físico. Esta configuração também possibilita a remoção de ruídos causados pelos eletrodos de potencial nas curvas de resistividade. Na prática é quase impossível realizar uma sondagem completa sem alterar a posição do eletrodo M e N. Geralmente usa-se valores de intervalo MN igual a 1/4 ou 1/3 do intervalo AB e que o mesmo seja de 20 a 50 vezes maior do que o intervalo MN (Mota, 2004).

#### 2.1.3 Caminhamento Elétrico

O método do caminhamento elétrico (CE), Figura 2.3, tem aplicabilidade em pesquisas que tem como objetivo determinar descontinuidades laterais na distribuição de resistividade elétrica em subsuperfície (Braga, 1999). Tais descontinuidades podem ser dadas por diques, sills, contatos geológicos, fraturas ou corpos mineralizados. O CE também é bastante utilizado em estudos ambientais para identificar plumas de contaminação e aquíferos.

Este tipo de levantamento onde se busca a variação bidimensional de resistividade, não há apenas um ponto associado em superfície, mas sim, uma série de pontos que formam uma região. Entre os arranjos de eletrodos mais utilizados em levantamentos com caminhamentos elétricos estão os Dipolo-Dipolo e o Polo-Dipolo (Bortolozo, 2016). Neste trabalho foi utilizado o arranjo Dipolo-Dipolo, devido a sua robustez e sua fácil execução em campo.



Figura 2.3: Técnica de caminhamento elétrico utilizando arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1999).

#### Arranjo de Eletrodos do Caminhamento: Dipolo-Dipolo

O arranjo dipolo-dipolo, é usado tanto no caminhamento elétrico, quanto em sondagens elétricas verticais. Nesta configuração os eletrodos de injeção de corrente AB e de potencial MN são dispostos em uma linha e o arranjo é definido pelos espaçamentos entre os eletrodos. A profundidade de investigação cresce com o distanciamento entre os eletrodos de potencial e os de corrente e, teoricamente, corresponde a R/2, , sendo R a máxima distância entre os pontos centrais de AB e MN. As medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação (n), n = 1, 2, 3, 4, 5... e posicionadas no ponto de intersecção entre uma linha que parte do centro do arranjo de eletrodos AB e outra que parte de centro do arranjo MN, com ângulos de 45° (Figura 2.3).

Como neste trabalho o objetivo era fazer o estudo para saber as variações laterais da resistividade, foi utilizado esta técnica e os eletrodos foram expandidos simetricamente, a partir de um centro que permanece fixo e cujas profundidades de investigação crescem com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente ( $A \in B$ ). A cada medida, os dipolos são deslocados de uma distância igual a X e os dados são novamente obtidos nas profundidades n = 1, 2, 3, 4, 5..., gerando seções de distribuição de pontos de resistividade aparente, mostrados capítulo 3.

#### 2.1.4 Resistividade Aparente

A resistividade aparente pode ser definida como a resistividade elétrica de um meio homogêneo que, substituindo um meio heterogêneo, provocaria as mesmas reações elétricas observadas nas mesmas condições geométricas dos eletrodos. Vamos supor um experimento elétrico na superfície da Terra, desprezando-se a sua curvatura. Neste experimento, os bornes de uma fonte de corrente elétrica são conectados à terra em dois pontos  $A \in B$  (eletrodos de corrente), provocando a circulação de uma corrente elétrica de intensidade I, que consideraremos positiva no ponto A (entrando na Terra) e negativa no ponto B. Enquanto isso, estaríamos determinando a diferença de potencial  $\Delta V$  entre dois outros pontos ( $M \in N$ ) (eletrodos de potencial). Se a Terra em estudo for heterogênea, não teremos, evidentemente, condições de estimar, a priori, a diferença de potencial  $\Delta V$ . Contudo, se ela for homogênea, podemos utilizar a expressão do potencial elétrico associado a uma fonte de corrente na superfície de um semiespaço homogêneo e isotrópico, sobrepondo os potenciais devido às injeções de correntes sendo feitas em  $A \in B$ . Em outros termos, podemos escrever que nos pontos  $M \in N$ , os potenciais elétricos são dados por:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right), \qquad (2.10)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right), \qquad (2.11)$$

sendo  $\rho$  a resistividade elétrica do semi-espaço homogêneo, I, a corrente elétrica, AM, AN, BM e BN, as distâncias entre os pontos A e B para os pontos M e N. Então a diferença de potencial  $\Delta V$  pode ser é expressa por:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right).$$
(2.12)

A partir daí, podemos chegar ao valor da resistividade do semi-espaço, com conhecimento dos valores de  $\Delta V$ , I e as distâncias AM, BM, AN e BN. Para isso, é necessário fazer o uso da expressão anterior invertida para  $\rho$ , ou seja (Sato, 1998),

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left\{ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right\}$$
(2.13)

### 2.2 Inversão de Dados de Eletrorresistividade

A modelagem de dados de eletrorresistividade é baseada na solução de equações diferenciais. A relação entre a fonte I  $(Am^{-3})$ , e o potencial elétrico,  $\phi$  (V), é dada pela equação de Poisson

$$\nabla(\sigma\nabla\phi) = -I(\delta(r - r_s^+) - \delta(r - r_s^-))$$
(2.14)

Sendo  $\sigma$  a condutividade elétrica do meio  $(Sm^{-1})$ ,  $r_s^+$  e  $r_s^-$  as coordenadas dos pontos de correntes e  $\delta(r - r_s^+)$  a função delta de Dirac, que descreve o caráter pontual da fonte de corrente. Por diferenças finitas tem a relação matricial:

$$A_{\sigma}\mathbf{u} = \mathbf{q},\tag{2.15}$$

 $\operatorname{sendo}$ 

$$A_{\sigma} = \mathbf{D}\mathbf{S}_{\sigma}\mathbf{G},\tag{2.16}$$

**D** e **G** são expressões na forma matricial dos operadores divergentes e gradiente, respectivamente,  $\mathbf{S}_{\sigma}$  uma matriz diagonal contendo os valores de condutividade, **u** o vetor com os valores de potencial nos nós da malha,  $A_{\sigma}$  a matriz de condutância associada ao problema e **q** o vetor com os termos de corrente. O potencial elétrico é obtido através da equação:

$$\mathbf{u} = A_{\sigma}^{-1} \mathbf{q} \tag{2.17}$$

O objetivo da inversão de dados de eletrorresistividade consiste em obter um modelo de resistividade/condutividade elétrica para o substrato, que seja similar com a base de dados medida. O processo de inversão é dado por (Abreu, 2012):

$$\Phi = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\mathbf{obs}}\|^2 + \frac{\beta}{2} \|W(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\mathbf{ref}})\|^2, \qquad (2.18)$$

sendo  $\mathbf{d_{obs}}$  o vetor de dados medidos,  $\mathbf{d(m)}$  o vetor contendo os valores calculados a partir do modelo de condutividade  $\mathbf{m}$ , e o modelo inicial é dado por  $\mathbf{m_{ref}}$ .

A determinação do problema, tem como finalidade definir o modelo interpretativo, que pode mostrar as principais feições do substrato. Adotando uma determinada propriedade física que será estudada e seu poder de investigação para solucionar o problema, a inversão dos dados ocorre geralmente através de um software que utiliza um conjunto de parâmetros para fazer ajustes dos dados e gerar um melhor modelo geológico para posterior interpretação. A interpretação ocorre através da análise da solução da inversão associado a dados geológicos da área, fazendo com que ambos os dados se completem. Geralmente em inversão 1D são conhecidos os números de camadas, resistividade elétrica das camadas e a espessura das camadas. Quando se trata de inversão 2D pode-se obter o conhecimento da distribuição de resistividade laterais das camadas rochosas (Bortolozo, 2016). Os dois software utilizados para efetuar as inversões das medidas elétricas realizadas por esta pesquisa foram o RES2DINV e o ELRIS2D.

#### 2.2.1 RES2DINV

O RES2DINV é um programa de inversão bidimensional (2D) projetado para inverter grandes conjuntos de dados de 200 a 21000 pontos coletados com um sistema de 25 a 16000 eletrodos (Fadele et al., 2013). Nele o modelo 2D consiste de blocos retangulares. A disposição dos blocos é ligeiramente ligada à distribuição dos pontos de dados na distribuição e o tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa usando a distribuição dos pontos de dados como um guia aproximado. A profundidade da linha inferior dos blocos é configurada para ser aproximadamente igual à profundidade equivalente de investigação dos pontos de dados com o maior espaçamento de eletrodo (Gallas et al., 2005).

Uma rotina de modelagem direta é usada para calcular a resistividade aparente, e o processo inverso se dá por otimização de mínimos quadrados não linear (Loke, 2000). O programa suporta tanto diferença finita como elemento finito, e pode ser usado para caminhamentos elétrico com arranjo Wenner, polo-polo, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner-Schlumberger e Matrizes dipolo-dipolo equatoriais (retangulares). Além dos levantamentos normais realizados com os eletrodos na superfície do solo, o programa também suporta levantamentos subaquáticos (Benevides, 2014).

#### 2.2.2 ELRIS2D

ELRIS2D é um programa escrito em MATLAB para a inversão bidimensional de dados de resistividade elétrica aparente de corrente contínua e de polarização induzida no domínio do tempo. Todas as definições disponíveis do programa podem ser alcançadas a partir da janela principal. A subsuperfície é discretizada utilizando uma malha híbrida gerada pela combinação de malhas não estruturadas e a rotina de inversão baseia-se na suavização com o método dos mínimos quadrados.

A grande parte dos parâmetros utilizados no algoritmo são otimizados para levantamentos de superfície próxima, existem opções limitadas para inversão de dados no programa. O algoritmo geralmente converge após 5 a 8 iterações, e o modelo é parametrizado usando blocos retangulares. Cada bloco retangular é tratado como um modelo de parâmetro a ser estimado. O usuário tem a opção de selecionar o tipo de malha do modelo. Existem duas opções:

- Um bloco retangular é colocado entre cada par de eletrodos adjacentes.
- O modelo de malha é refinado de modo que dois blocos retangulares sejam colocados entre eletrodos subsequentes.

Esta última opção duplica o número de parâmetros. Sendo assim, o processo de inversão acontecerá mais lento em comparação com a malha normal. Por outro lado, a velocidade de convergência também diminuirá para que o número de iterações aumente (Akca, 2016).

# Capítulo 3

# Aquisição, Tratamento e Interpretação dos dados geoelétricos

Neste capítulo será descrito como ocorreu a aquisição dos dados no município de Lauro de Freitas, como foram feitas as inversões das pseudoseções através dos *sofwtare* RES2DINV, ELRIS2D e RESIST, a interpretação geológico-geofísica da região através dos resultados gerados das inversões de resistividade aparente medidas, correlacionados com SEV's retiradas da literatura e dados de poços de água disponibilizados pela CERB (SIAGAS, 2017).

### 3.1 Aquisição dos dados

Os dados que constam neste trabalho foram adquiridos pela técnica de caminhamento elétrico, usando o arranjo dipolo-dipolo. O equipamento utilizado foi o resistivímetro modelo SYSCAL PRO, fabricado pela *Iris Instruments*, de propriedade do CPGG/UFBA. Este aparelho é composto por uma unidade transmissora e outra receptora, sendo que, elas tem configurações para realizarem leituras simultâneas da resistividade e cargabilidade aparentes, após inserir corrente elétrica, através de eletrodos inseridos no solo (Figura 3.1).

Primeiro foi realizado o caminhamento elétrico na rua Praia de Marambaia que foi chamado de linha 1, depois foi realizado o caminhamento elétrico na rua Praia Vermelha que foi chamada de linha 2 e por último foi realizado o caminhamento elétrico em parte da avenida Copacabana que é perpendicular as outras duas ruas citadas e paralela a linha da praia, sendo que, essa última foi chamada de linha 3. Os três caminhamento elétricos foram realizados durante o dia 29 de maio de 2017, sendo escolhido o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 em 5 metros entre os eletrodos. A linha 1 teve 100 metros de extensão e as linhas 2 e 3 tiveram 120 metros de extensão.

Como dados complementares na interpretação, utilizamos duas SEV's e seus resultados



Figura 3.1: Fotos do levantamento: em sentido horário a) disposição de uma linha de caminhamento elétrico, b) equipamento utilizado (SYSCAL Pro), c) vista da Praia Vermelha e d) Instalação de eletrodo nas margens do calçamento.

invertidos (Figura 3.3 e Figura 3.4) de um trabalho, prévio feito na vizinhança (Santiago, 2002), realizadas com arranjo Schlumberger e distâncias de afastamentos máximos entre os eletrodos de corrente elétrica e o centro da SEV, AB/2 máximas, variando entre 100 e 500 metros. A intensa urbanização da área impossibilitou afastamentos maiores, produzindo a identificação de topo de camada até 20 e 24 m para as SEV12 e SEV17 respectivamente (como denominadas pelo autor do trabalho). As SEV's estão próximas da área de estudo (Figura 3.2) e fornecem uma base informativa sobre quantidade de camadas, espessura e resisitividade elétrica de cada horizonte geológico.

Outra fonte de dados para embasar a interpretação, são um conjunto de 3 perfis estratigráficos (Figura 3.5), que mostram que o aquífero local é do tipo cristalino de topo entre 7-10m de profundidade. As fichas informativas dos poços são apresentadas na (Figura 3.6), evidenciam uma cobertura arenosa sobre rocha cristalina alterada de topo em aproximadamente 7-9 m.

Para a SEV 12, o resultado da inversão indicou 3 camadas de resistividade crescente com a profundidade, respectivamente 87.1, 177.8 e 3437.0 ohm.m e espessuras 1.1 e 20.0 m. Já para a SEV 17 o número de camadas se repetiu porém a camada de cobertura foi



Figura 3.2: Localização da área estudada, mostrando a localização dos poços de água correlacionado e também as SEV'S (obtida no Google Earth e modificada)

mais resistiva 2879.0 ohm.m, seguida de uma camada mais condutiva 36.8 ohm.m e de 146.4 ohm.m, com espessuras de 1.0 e 24.0 m. É interessante notar que para um alcance de 20 m são identificáveis 3 estratos, com uma cobertura de aproximadamente 1 m.

Dados de poços de água da CERB, podendo ser obtido através do sistema SIAGAS (2017). (Figura 3.5,3.6)

#### 3.1.1 Equipamento de medida

O equipamento usado nas medidas foi o SYSCAL PRO, fabricado pela empresa francesa IRIS Instruments, ele é composto de uma unidade controladora, 4 rolos de cabo, 72 eletrodos (hastes metálicas), 72 conectores (ligam os eletrodos ao cabo), e possui bateria interna, mas permite que seja utilizada bateria externa 12 V automotiva (Figura 3.7).



Figura 3.3: Perfil de resistividade da SEV 12: resistividade aparente medida (cruz azul) e invertida (linha contínua roxa).

#### 3.1.2 Local das linhas de caminhamento

Os dados apresentados neste trabalho foram adquiridos nas seguintes ruas: Praia de Marambaia, Praia de Copacabana e Praia Vermelha, todas localizadas no bairro de Vilas do Atlântico, no município de Lauro de Freitas, no estado da Bahia (Figura 3.8).

#### 3.1.3 Processamento dos Dados

Como parte do procedimento padrão, os dados da aquisição foram retirados do equipamento através do software Prosys 2, fornecido juntamente com o equipamento, e posterioemente organizados como .*dat* de acordo com a configuração de leitura dos programas de inversão RES2DINV e ELRIS2D no qual é feita a plotagem dos dados medidos e também a modelagem inversa. As medidas de resistividade geralmente são mostradas e interpoladas (contornos de isovalores) sob a forma de pseudoseções (Hallof, 1957). Como um dos objetivos do trabalho era testar e comparar os resultados de modelagem entre o RES2DINV, já muito utilizado na geofísica, e o ELRIS2D, um programa escrito na linguagem *matlab*, uma adaptação ao formato de leitura do mesmo se fez necessária. Um pré-processamento necessário foi a remoção de medidas de resistividade aparente negativas e medidas que se



Figura 3.4: Perfil de resistividade da SEV 17: resistividade aparente medida (cruz azul) e invertida (linha contínua roxa).

repetiam, essas medidas poderiam gerar erros na inversão ou aumento desproporcional do erro de ajuste.

Para o processamento dos dados das SEV's, segundo (Santiago, 2002), houve também um pré-processamento, que consistiu da retirada de pontos anômalos isolados identificados por visualização, depois foram utilizados métodos que atualmente estão em desuso, como: método do ponto auxiliar, que através de curvas auxiliares pré-calculadas, obtém as espessuras das camadas e as resistividades do meio (Moraes, 97). Após obter o modelo inicial através do método do ponto auxiliar, o processamento melhorou, fornecendo maiores informações sobre as resistividades. Na modelagem foi usado o software RESIST 1.0, que executa a inversão automática dos perfis por um processo iterativo de otimização por mínimos quadrados que geram os parâmetros finais resultantes, otimizando o processamento, com resultados de melhor ajuste, possibilitante confiabilidade na interpretação dos dados adquiridos.

As etapas realizadas no programa ELRIS2D foram as seguintes:

- 1. Abrir o MATLAB;
- 2. Abrir o código do ELRIS2D escrito no MATLAB;
- 3. Executei o programa que gerou uma nova interface;



Figura 3.5: Perfis litologicos de poços vizinhos às linhas de levantamento,(CERB., 2017)

- 4. Após gerar a interface, foi selecionado cada caminhamento elétrico individualmente;
- 5. Number of iterations  $\rightarrow$  para escolher o número de iterações, que foi escolhido 15;

#### POÇO 1\_817 - COND. VILAS DO ATLÂNTICO I

Feição Geomorfológica:								
Descrição:								
Formação Geológica:								
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:						
0.00	1.00	Eluviao						
1.00	9.80	Terciario-quaternario						
9.80	60.00	Complexo granulitico						
Dados Litológicos:								
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:					
0	1	Solo arenoso	SOLO ARENOSO ACINZENTADO					
1	9.8	Areia média	AREIA ESBRANQUICADA, GRANULACAO FINA A MEDIA.					
9.8	16	Rocha Cristalina não identificada	ROCHA METAMOR. CINZA ESVERD.C/ QUARTZO,MICA,FELD. E MIN. FE/MG, FRAGMEN. FINA					
16	60	Rocha Cristalina não identificada	RX.METAMOR.CINZA,C/QUARTZO,FELD. MICA,E MINER.FE/MG,FRAGMEN. FINA.COMP.GRANUL.					

#### POÇO 1\_821 - COND. VILAS DO ATLÂNTICO III

Feição Geomorfológica:							
Descrição:							
Formação Geológica:							
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:					
0.00	1.00	Eluviao					
1.00	9.00	Terciario-quaternario					
9.00	60.00	Complexo granulitico					
Dados Litológicos:							
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:				
0	1	Solo arenoso	SOLO ARENOSO ACINZENTADO				
1	3	Argila	ARGILA ESBRANQUICADA ARENOSA				
3	9	Areia argilosa	AREIA ARGILOSA, AMARELADA, GRANULACAO FINA.				
9	11	Rocha Cristalina não identificada	ROCHA ALTERADA CINZA, FRAGMENTACAO FINA.				
11	60	Rocha Cristalina não identificada	RX.METAMOR.CINZA C/QUARTZO,MICA,FELD. E MIN.FE/MG,FRAG.MED.A GROS.COMP.GRANULI				
POÇO 1_848 – SÍTIO	MARINGÁ						

Feição Geomorfológica:			
Descrição:			
Formação Geológica:			
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:	
0.00	7.00	Eluviao	
7.00	21.50	Complexo granulitico	
Dados Litológicos:			
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:
0	3	Areia argilosa	AREIA AMARELADA, ARGILOSA
3	4	Argila	ARGILA UM POUCO ARENOSA, ACINZENTADA
4	7	Areia média	AREIA AMARELADA, GRANULACAO FINA
7	8.5	Rocha Cristalina não identificada	ROCHA ALTERADA, ACINZENTADA, FRAGMENTACAO FINA
8.5	21.5	Rocha Cristalina não identificada	RX. METAMORF. ACINZENT. C/QUARTZO,FELDSPATO E MICA, FRAGMENT. MEDIA,GRANULITO.

Figura 3.6: Dados de poços da CERB, obtidos no site do SIAGAS (2017).

6. Mesh type  $\rightarrow$  para selecionar o tipo de malha, nessa etapa foi escolhida a malha fina;

7.  $Invert \rightarrow comando para iniciar a inversão dos dados.$ 

A interface de carregamento e inversão do dado no ELRIS2D é apresentadas na (Figura 3.9). A direita na vertical estão as opções de escolha de arquivo, informações gerais dos dado lido, parâmetros de inverão referentes a iterações e a malha (de cima para baixo).



Figura 3.7: Equipamento SYSCAL PRO utilizado na aquisição dos dados.

A esquerda estão informações para produzir o gráfico como tipo de escala e padrão de cores, seguido pelo modo de salvamento da imagem; na janela central vê-se acima a pseudoseção, dados ajustados a baixo e por fim a seção invertida.

As etapas realizadas no programa RES2DINV são as seguintes:

- 1. File  $\rightarrow$  read data (abre o dado bruto);
- 2. Inversion  $\rightarrow$  reduce effect of side blocks (reduz o effect dos blocos laterais);
- 3. Inversion  $\rightarrow$  select robust inversion  $\rightarrow$  sendo configurada da seguinte forma: robust constrain com fator de corte de 0,05 para o dado invertido e 0,005 para o modelo invertido;
- 4. Inversion  $\rightarrow$  carry out inversion  $\rightarrow$  comando para o programa começar a realizar a inversão.

A interface de carregamento e inversão do dado no RES2DINV é apresentada na Figura 3.10. A disposição é semelhante à janela central do ELRIS2D, dado medido, calculado e modelo de resistividade dispostos de cima para baixo. A escala do gráfico é logarítima e a barra de cores é horizontal (no ELRIS2D é vertical).



Figura 3.8: Localização da área da aquisição dos dados, imagem obtida através do software Google Earth e modificada (2017).



Figura 3.9: Interface do ELRIS2D.



Figura 3.10: Interface do RES2DINV.

### 3.2 Resultados

Para facilitar a comparação entre os Softwares RES2DINV e ELRIS2D, optamos por apresentar os resultados para cada linha de caminhamento por vez. Agrupou-se as inversões dos dois programas, primeiro foi mostrado os resultados do RES2DINV e depois o do ELRIS2D. De modo geral, chegamos ao consenso de que a interpolação do ELRIS é menos suave, atribuindo a uma cor um range maior de variação de resistividade, desta forma optamos por identificar as feições geológicas baseados nos resultados do RES2DINV que mostra maior contraste de cores e facilita delimitar feições menores.

#### 3.2.1 Linha 1

O resultado da inversão, no software RES2DINV, da linha 1 de caminhamento é apresentado na Figura 3.11. O modelo reproduziu distribuições de resistividade até 14 m de profundidade, o nível estático do aquífero está em 3 m (linha pontilhada preta), de modo geral observamos anomalias mais condutivas em profundidade e um horizonte mais resistivo de baixa espessura na superfície (delimitado pelo pontilhado branco mais largo), alcançando espessuras máximas de aproximadamente 1,5-2 m. Essa camada superficial coincide com os resultados de inversão das duas SEV's já apresentadas anteriormente nas figuras 3.3 e 3.4. Em profundidade identificamos outra anomalia resistiva por volta de 12 m que indicamos ser o topo da rocha sã. Na parte central sugerimos tratar-se de uma rocha alterada que sofreu metamorfismo resultando em um efeito de bandamento de rochas ácidas e básicas intercaladas (numerações de 1-4 que indicam volumes de resistividades elétricas contrastates).

No resultado da inversão do ELRIS2D mostrado na figura 3.12 é possível identificar as estruturas principais, tais como a cobertura resistiva, e a camada subsequente com as alternâncias de rochas mais resistentes e mais frágeis a alterações quimicamente e intempéries, relacionadas aos altos e baixos resistivos.



Figura 3.11: Linha 1 (RES2DINV)

#### 3.2.2 Linha 2

A linha dois é paralela à linha 1 e tal qual, a apresentação da interpretação geológica sobre a modelagem do RES2DINV, Figura 3.13, apresenta uma superfície de erosão da rocha alterada bastante ondulada, com maior profundidade indicando zonas mais frágeis sobre zonas menos resistivas, que estariam associadas ao menor conteúdo em sílica. Por outro lado, associamos a maior condutividade nas porções mais silicosas embasados no fato de que rochas de maior dureza são mais fraturáveis que rochas mais plásticas. Desta forma, configurando as zonas fraturadas do aquífero cristalino. O topo da rocha sã está a 14 m na posição entre 70 e 90 m de distância horizontal do início do perfil.

A seção invertida pelo ELRIS2D, mostrada na figura (Figura 3.14) identifica apenas as maiores feições como, a rocha cristalina alterada mais condutiva que a cobertura. A característica mais condutiva da cobertura pode ser atribuída a um composição de solo desagregado que perde água por evaporação. Essa possibilidade é muito clara dada a proximidade da área de praia e a característica de clima quente no litoral bahiano.



#### 3.2.3 Linha 3

A linha 3 é posicionada perpendicularmente às linhas 1 e 2, ou seja, paralela à linha da praia, e está próxima à extremidade de origem das mesmas. Nas figuras 3.15 e 3.16 o NE está a 3m de profundidade e a intercalação de resistividade altas e baixas apresenta um volume mais expressivo resitivo (abaixo de 1), na proximidade da linha 1. O topo do embasamento está a 14m de profundidade (Figura 3.15).



Figura 3.15: Linha 3 (RES2DINV)

### 3.3 Interpretação de Dados

Através dos dados adquiridos nos três caminhamentos elétricos realizados e informações das SEV'S 12 e 17 (Santiago, 2002) foi possível obter os modelos de inversão dos dados de resistividade aparente 1D e 2D, mostrando as variações laterais e verticais da resistividade na subsuperfície. Sendo possível sugerir um modelo geológico para a área estudada da seguinte maneira.



- i camadas superficiais não saturadas, delimitada na parte superior, indicada nas imagens com o número 1;
- ii camadas arenosas com presença de argila, próximo ao nível estacionário, indicado nas figuras com número 2;
- iii Embasamento alterado e/ ou fraturado, indicado nas imagens com número 3, podendo ocorrer através de processos físicos ou químicos, como dissolução de minerais menos estáveis, como: feldspato, piroxênios e anfibólios;
- iv Embasamento sem fraturas, indicado nas imagens com o número 4, sendo essa região impermeável.

Para o aquífero estudado, os resultados da modelagem da linha 01 (Figura 3.11), apresenta horizontes geológicos irregulares, as camadas superfíciais não saturadas correspondem a sedimentos arenosos não consolidados característicos de área litorânea (praias) que perdem água facilmente por evaporação, sendo registrado altos valores de resistividade elétrica. Logo a baixo desta, identificamos a zona saturada e nível estático do aquífero marcado por redução da resistividade elétrica em relação a camada sobrejacente. O embasamento alterado, que se extende aproximadamente da profundidade de 4 a 12 m de superfície irregular é destacado logo abaixo com menores valores de resistividade distribuídos de forma bandeada indicando zonas mais ácidas (numeração 3), por conseguinte mais resistentes a alterações quimicas e dissolução sendo quimicamente inerte. As intercalações com rochas mais instáveis indicam rochas menos silicosas, possivelmente composta de feldspatos e micas que são facilmente alterados sofrendo lixiviação de íons de sódio e potássio. A fragilidade desta porção enfatizada pela maior erosão na superfíe destas porções que nas vizinhanças silicosas, resultam em uma sinuosidade da superfície erosional com altos e baixos topográficos. Os parâmetro escolhidos para o levantamento, tais como arranjo e espaçamento, proporcionaram um mapemento de até 16m de profundidade, tornando possível identificar apenas o topo do que seria oa rocha sã (indicado pelo numero 4). Perfis construtivos de poços da CERB (Figura 3.5) indicam que uma rocha cristalina estaria em profundidade aproximada de 16, 8, e 11 m de profundidade (perfis dispostos da esquerda para direita).

Considerando que as interpretações foram feitas também com auxílio de dados de poços de água do SIAGAS/ CPRM.

# Capítulo 4

# Conclusões

A utilização das técnicas de caminhamento elétrico, sondagem elétrica vertical e a correlação com dados de poços, apresentaram uma investigação satisfatória da área, possibilitando a criação de um modelo geológico pertinente. A análise dos resultados obtidos mostraram baixos valores de resistividades para a água subterrânea do local de estudo, o que permite concluir que esta apresenta alto teor de salinidade, o que a inviabiliza para consumo humano. Este resultado está de acordo com o que foi relatado pelos moradores dessa região que informaram que tal água apresenta alta salinidade.

Os programas de inversão utilizados RES2DINV e ELRIS2D, apresentaram resultados satisfatórios. Comparou-se os resultados de ambos os programas afim de testar o ELRIS2D, que é um programa de inversão de eletrorresistividade novo, criado na Turquia no ano de 2014 e que ainda não tinha sido utilizado para trabalhos acadêmicos no Brasil. O RES2DINV apresentou resultados mais detalhados pelo fato de possuir uma maior escala de resistividade do que o ELRIS2D, por essa razão recomenda-se que em trabalhos futuros seja realizada mudanças no ELRIS2D para que sua escala de resistividade seja ampliada possibilitando resultados com maior detalhamento.

As técnicas de eletrorresistividades utilizadas, caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical, são muito importantes para esse tipo de investigação pelo fato de possuir baixos custos comparados com outros métodos geofísicos. Outro ponto positivo é o fato de não necessitar de perfuração de poços para avaliar a qualidade da água, dispensando a investigação destrutiva, reduzindo assim, os custos para quem planeja a exploração hídrica de uma determinada área.

E recomendável que posteriormente seja utilizado o método magnético ou eletromagnético na área de investigação deste trabalho para que se tenha maior detalhamento geológico, e que se aumente o grau de confiança do modelo geológico sugerido.

# Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus e a minha família, em especial aos meus pais que sempre me acompanharam em todas as etapas de minha vida.

À professora Suzan Vasconcelos, que me orientou e se dedicou bastante para que este trabalho fosse realizado, sua participação foi de extrema importância.

Aos professores do curso de Geofísica pelo ensinamento passado.

Ao professor Marco Botelho pela sua boa vontade em disponibilizar seus equipamentos e acompanhar a aquisição dos dados.

Ao Alexsandro Guerra pela sua boa vontade em auxiliar na aquisição dos dados e sua disponibilidade em sempre está tirando algum tipo de dúvida em relação ao trabalho.

À CERB, Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia, pelo fornecimento de informações de todos os poços de Lauro de Freitas disponíveis.

Aos Professores Olivar Lima e Roberto Rosa pelas contribuições na interpretação geológica da área de estudo.

Agradeço a minha melhor equipe de trabalho na prefeitura, Ronaldo CBD e Anderson Cardoso, pelo companheirismo e divertidas histórias que faziam com que as madrugadas de trabalho fossem menos desgastantes.

Ao Leonardo Moreira (Léo Barril), pela sua boa vontade de está sempre tirando algum tipo de dúvida em relação ao tex.

Agradeço amizade de todas as pessoas que participaram de alguma forma da minha gra-

duação; Ian Lapa, Pedrosa, Lucas Campos, Marcos de Lauro de Freitas, Ênio, Catarina, Helen, Rodrigo (pirão), Salatiel, Sidão, Daniel Montenegro, Daniel Luã, Adilson, Carol, Dimitri, Elisandra, Fernanda, Isis, Maia, Lara Maria, Mariana Miranda, Lucas Bittencourt, Rodrigo (Manteiga), Daniel Walter, Paula Ribeiro, Sâmara, Priscila, Rafael Rigaud, Everaldo, Laila, Tainã, Paloma, Patrícia, Ederson.

Um agradecimento especial a amizade das pessoas que estiveram mais próximas de mim durante o curso e na fase final, que foram Adevilson, Artur, Odett, Diego Caribé, Jeferson, Rená, Rodrigo Santana, Laian e Ítalo Cley.

Um abraço pra todo sindicato, que sempre pensava no povo nas datas das provas rs

# Referências

- ABAS. (2017) Associação brasileira de Águas subterrâneas. Disponível em: http://http://www.abas.org/educacao.php/, acesso em: 11 de agosto de 2017.
- Abreu, E. L. (2012) Imageamento de resistividade elétrica de áreas contaminadas utilizando arranjos poço-superfície, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Akca, I. (2016) Elris2d: A Matlab package for the 2d inversion of dc resistivity/IP data, Acta Geophysica, 64(2):443–462.
- Andrade, J. J. C. d. (2013) Processamento 1d, 2d e interpretação de dados geofísicos elétricos no semi-árido da Bahia, município de Capim Grossso, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Araújo, W. S. (2015) Caracterização morfométrica do sistema flúvio-lagunar lagamar de Porto do Mangue (RN), Trabalho de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Batista, J. C. (2007) Comportamento elétrico de arenitos da formação Maracangalha observado em testemunhos e afloramentos da Ilha dos Frades, Bahia, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Benevides, C. M. R. (2014) Verificação da aplicabilidade da geofísica elétrica na engenharia geotécnica, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Bittencourt, A. C. S. P.; Livramento, F. C.; Dominguez, J. M. L. e Silva, I. R. (2010) Tendência de longo prazo à erosão costeira num cenário perspectivo de ocupação humana: litoral norte do estado da Bahia, Revista Brasileira de Geociências, 40(1):125–137.
- Bortolozo, C. A. (2016) Inversão conjunta 1d e 2d de dados de eletrorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na bacia do Paraná, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Braga, A. C. O. (1999) Curso básico de geofísica aplicada, módulo 1: Métodos geoelétricos aplicados a hidrogeologia, Notas de Aula, Universidade Estadual Paulista.

- Braga, A. C. O. (2006) Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática, Tese para obtenção do título livre-docente na disciplina: Métodos Geoelétricos aplicados a hidrogeologia, Universidade Estadual Paulista.
- Cabral, F. C. F. (1978) O uso dos isótopos do carbono no estudo das águas subterrâneas do calcário Bambuí - região central da Bahia, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- CERB. (2017) Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa-complexa.php, acesso em: 10 de Junho de 2017.
- CPRM. (2017) CPRM, dados, informações e produtos do serviço geológico do brasil. Disponível em: http://geosgb.cprm.gov.br/, acesso em: 8 de março de 2017.
- Cruz, C. A. S. P. J. (2012) Características geológica e hidrogeológica de uma área de conformação dômica, em rochas sedimentares da porção oriental da bacia do Recôncavo Norte, Dias D'ávila, BA, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Fadele, S.; Adamu, J.; Patrick, N. e Sule, P. (2013) Relevance of 2d electrical imaging in subsurface mapping: Case study of national animal production research institute (NAPRI), Zaria, The Pacific Journal of Science and Technology, 14:498–504.
- Feitosa e Filho, F. A. e. J. M. (2000) Hidrogeologia; Conceito e Aplicações, 2<sup>a</sup> Edição, pp. 15-25, CPRM.
- Gallas, J. D. F.; Taioli, F.; Silva, S. M. C. P.; Coelho, O. G. W. e Paim, P. S. G. (2005) Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade, Revista Brasileira de Geofísica, 23(1):51–59.
- Geotomo, S. (2017) Geotomo software. Disponível em: http://www.geotomosoft.com/down-loads.php, acesso em: 5 de junho de 2017.
- Gurgel, G. J. B. (2005) Modelagem numérica aplicada à análise da intrusão marinha na região sul da planície do Recife (PE), Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Hallof, P. G. (1957) On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements, Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology.
- IBGE. (2017) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: http://www .cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=codmun=291920search=bahia|lauro-defreitas, acesso em: 15 de março de 2017.

- INEMA. (2017) APA Joanes Ipitanga, Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/unidades-de-conservacao/apa/apajoanes-ipitanga/, acesso em: 29 de julho de 2017.
- Johansen, H. e Sorensen, K. (1979) Fast hankel transforms, Geophysical Prospecting, **27**(4):876–901.
- Lima, O. A. L. (2014) Propriedades Físicas das Rochas, Bases da Geofísica Aplicada, pp. 31-34, SBGF/INCT-GP.
- Loke, M. (2000) Topographic modelling in electrical imaging inversion, In: EAGE 62nd Conference and Technical Ehibition, Glasgow (Ecosse), vol. 29.
- Luz, A. P. O. (2016) Métodos Geofísicos Aplicados à Obras de Engenharia, Trabalho de Graduação, Universidade Federal Fluminense.
- Machado, R. (2008) Aplicação do método eletrorrestivo em ambiente aquático para o mapeamento do subfundo do Rio São Francisco, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Martins, A. S. (2010) Aproveitamento de Água pluvial para fabricação de concreto, Trabalho de Graduação, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- Moraes, J. W. O. (97) Avaliação geofísica do sistema aquífero na área do parque das lagoas e dunas do Abaeté, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Mota, S. U. S. (2004) Caracterização Hidrogeológica do Setor Oriental do Pólo Industrial de Camaçari Utilizando Geofísica Elétrica, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Novais, D. M. (2014) Vulnerabilidade aquífera com parâmetros geoelétricos na região do pólo industrial de Camaçari, Bahia, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Pitombo, J. S. (98) Avaliação geofísica do sistema aquíferos costeiros da costa atlântica de Salvador-Bahia, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Porciúncula, R. J. e Lima, O. A. L. (2009) Aplicação do método eletrorresistivo na avaliação geoambiental da região de Alagoinhas, Bahia, In: 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2009, Salvador, Bahia, Brazil, 24-28 August 2009, pp. 812–816.
- Santiago, R. C. (2002) Avaliação dos aquíferos costeiros da área de Ipitanga-Rio Joanes, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Santos Filho, L. A. R. (2000) Avaliacao dos aquiferos costeiros da área rio Joanes-Jauá, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.

- Sato, H. (1998) Métodos elétricos, notas de aula, CPGG/UFBa. Univ. Federal da Bahia.
- Soares, F. L. (2002) Análise de provas de carga dinâmica em tubulões a céu aberto no campo experimental de fundações da EESC/USP, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Telford, T.; Motley, C. B. e Feibleman, J. K. (1976) Três interpretações de justiça, Forense-Universitária.

# Anexo

### 4.1 Imagens da aquisição dos dados

Participaram da aquisição dos dados, os professores Marco Botelho, Suzan Vasconcelos, Alexsandro Guerra ( doutorando em geofísica) e o aluno de graduação Rafael Brito.



Figura 4.1: a) calçada onde foi fixado os eletrodos; b) equipamento utilizado (SYSCAL PRO); c) eletrodos e marretas utilizados; d) fixação dos eletrodos no solo e) configurando o equipamento; f) rua praia vermelha; g) calçadão de Vilas do Atlântico, área próxima do mar; h) SYSCAL PRO e cabo condutor de energia elétrica