



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UTILIZAÇÃO DE MEDIDAS ELÉTRICAS E ELETROMAGNÉTICAS PARA A
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM JACUNDÁ (PA)**

MARCELO FERNANDES MENDES

BELÉM

2014

MARCELO FERNANDES MENDES

**UTILIZAÇÃO DE MEDIDAS ELÉTRICAS E ELETROMAGNÉTICAS PARA A
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM JACUNDÁ (PA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Eletromagnéticos

Orientador: Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva

BELÉM

2014

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA

Mendes, Marcelo Fernandes, 1983-

Utilização de medidas elétricas e eletromagnéticas para a prospecção de água subterrânea em Jacundá (Pa) / Marcelo Fernandes Mendes. – 2014.

36 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcos Welby Correa Silva
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

1. Geofísica aplicada – Jacundá (PA). 2. Perfilagem geofísica de poços. 3. Formações (Geologia) – Jacundá (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 558.115

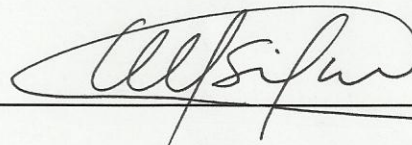
MARCELO FERNANDES MENDES

**UTILIZAÇÃO DE MEDIDAS ELÉTRICAS E ELETROMAGNÉTICAS PARA A
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM JACUNDÁ (PA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Geofísica

Data de aprovação: 27/10/2014

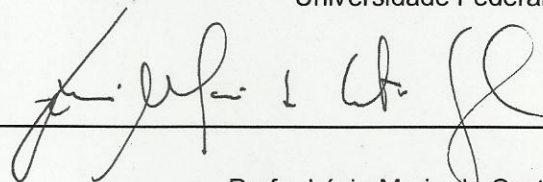
Banca Examinadora:



Prof. Marcos Welby Correa Silva – Orientador

Doutor em Geofísica

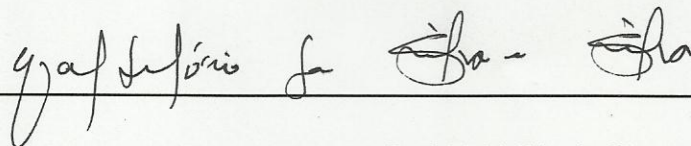
Universidade Federal do Pará



Profa. Lúcia Maria da Costa e Silva

Doutora em Geofísica

Universidade Federal do Pará



Prof. Valdelírio da Silva e Silva

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida.

A CAPES pelo fomento a minha pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcos Welby Correa Silva, pela compreensão e orientação.

Ao professor MSc. José Geraldo das Virgens Alves, por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À prefeitura de Jacundá pelo apoio logístico dado para a realização deste trabalho.

À CPRM - Serviço Geológico do Brasil, nas pessoas dos Geólogos Manfredo Ximenes Ponte e Manoel Imbiriba Júnior – pela concessão dos dados do poço de monitoramento do Projeto RIMAS construído em Jacundá, os quais foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

À banca examinadora nas pessoas do Prof. Dr. Valdelírio Silva e Profa. Dra. Lúcia Costa.

A minha família que sempre me apoiou nesta caminhada desde a infância, por isso faço questão de compartilhar com eles minha vitória.

“O que as vitórias têm de mau é que não são definitivas. O que as derrotas têm de bom é que também não são definitivas.”

José Saramago

APRESENTAÇÃO

A falta de água ainda é problema para muitas famílias brasileiras, mais precisamente, nas periferias de grandes cidades, municípios e vilas. No município de Jacundá, sudeste do Pará, este problema atinge 80% da população.

Para que a população supra suas necessidades com a falta de água, a forma mais barata e coerente seria o fornecimento a partir de fonte subterrânea.

A oportunidade de desenvolver este trabalho surgiu em uma excursão de campo do Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará que tinha por objetivo a prospecção de água subterrânea no município de Jacundá,

Este trabalho aprofunda o mapeamento hidrogeológico e indica locais promissores para a perfuração de poços para captação de água subterrânea.

RESUMO

A cidade de Jacundá tem um sistema de abastecimento público de água incipiente, a partir de fonte superficial não perene, de pequena vazão e que atende menos de 20% da população. Poços abertos e tubulares rasos são fontes de uso particular, restrito e sazonal. No entanto, a vazão relativamente elevada de dois poços tubulares profundos, construídos na cidade, aponta para uma alternativa de abastecimento por água subterrânea, como uma alternativa para o abastecimento local. Esse fato justificou um estudo geofísico para determinação das seções aquíferas mais profundas. Foram utilizadas 9 sondagens elétricas verticais, cuja interpretação considerada foi guiada pela perfilagem geofísica executada em um furo. Como resultado, os modelos das SEVs identificaram dois pacotes de estratos distintos em resistividade: i) pacote superior, resistivo, de espessura total menor que 30 m, associado à Formação Itapecuru, o qual, embora predominantemente arenoso, possui baixa potencialidade hidrogeológica na área estudada e ii) substrato de baixa resistividade, correspondente provável aos folhelhos da Formação Codó. Esse resultado é apoiado pelos resultados obtidos com o método Slingram. O potencial hidrogeológico do segundo pacote está nas intercalações de arenito no folhelho, que pode significar a solução para a gestão do abastecimento de água na cidade.

Palavras-Chave: Geofísica aplicada. SEV. Perfilagem geofísica. Jacundá (PA). Formação Itapecuru. Formação Codó.

ABSTRACT

The Jacundá city has a public water system supply in its infancy. From the source surface it is not perennial, small flow and serves less than 20% of the population. Open and shallow tube wells are sources of particular use, limited and seasonal. However, the flow of two deep wells, built in the city, gave evidence that alternative underground water could be a good solution for the local supply. This fact gave rise to a geophysical study to determine the deeper strata permeable. We used nine vertical electrical sounding, whose interpretation accepted was guided by the geophysical results obtained in a hole. As a result, the models of VES's packets identified two distinct layers resistivity: A package higher, more resistive a total thickness less than 30 meters, was associated with the Itapecuru formation which, is predominantly sandy hydrogeological and weak. And the other, a substrate of low resistivity, it was assumed corresponding to the Codó Formation shales. The interpretation of Slingram data support this result. The hydrogeological potential of this second package is in the shale interbedded sandstone, which may mean the solution for the management of water supply in the city.

Keywords: Applied geophysics. VES. Well Logging. Jacundá (PA). Itapecuru Formation. Codó Formation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ÁREA	13
2.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	13
2.2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	13
2.3	HIDROGEOLOGIA	17
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	PERFILAGEM GEOFÍSICA	19
3.2	SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL	19
3.2	SLINGRAM.....	20
4	INTERPRETAÇÃO.....	21
4.1	PERFILAGEM GEOFÍSICA	21
4.2	SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL	23
4.3	SLINGRAM.....	34
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Um dos fortes indicadores do subdesenvolvimento é a qualidade da água distribuída à população. No Brasil, o índice de saneamento e abastecimento público de água nas regiões urbanas limita-se a apenas partes das grandes cidades. A maioria das vilas e pequenas cidades não possuem sistema de captação, tratamento e distribuição de água ou, quando possuem, o sistema é incipiente e de atendimento parcial. Nessas localidades, geralmente, o abastecimento é feito direto da fonte para a rede de distribuição, mesmo sendo estas fontes de natureza superficial.

Na sede do município de Jacundá, no sudeste Estado do Pará, o sistema de distribuição de água é feito a partir de fonte superficial, sendo a água bombeada direto para a rede, e atende apenas a área central da cidade, cerca de 20% da área urbana. O fornecimento é intermitente, em razão de problemas com turbidez e materiais diversos em suspensão na água e problemas operacionais.

A área de Jacundá está assentada na borda da Bacia Sedimentar do Parnaíba, tem em sua cobertura depósitos recentes das drenagens e sedimentos e rochas da Formação Itapecuru, que se sobrepõem aos folhelhos da Formação Codó.

Em Jacundá, a formação Itapecuru corresponde à cobertura sedimentar que não ultrapassa 30 m de profundidade. Nesse pacote, somente poços cacimbas ou escavados por ferramentas manuais e tubulares rasos são usados para abastecimento restritos às residências. Esses poços promovem uma pequena oferta de água sazonal, pois secam durante o período de estiagem. Por isso, em termos hidrogeológicos, a formação Itapecuru em Jacundá não possui potencial hídrico para o abastecimento em grande escala.

Observou-se que dois poços tubulares perfurados na cidade tinham profundidade maior que 100 m. Um deles foi visitado durante o teste de bombeamento.

Com base em descrições litológicas das amostras de calha, pode-se afirmar que esses poços captam água de rochas da Formação Codó, provavelmente de sequência de arenitos fraturados intercalados em um grande pacote de folhelho. O teste comprovou que o poço era capaz de fornecer vazão de 10 m³/h, o suficiente para abastecer em média 100 famílias por dia para bombeamento de 10 h/dia. Segundo os perfuradores, o poço foi revestido nos primeiros 60 m e após esta profundidade

não foi necessário o revestimento, pois a camada de arenito é suficientemente resistente e fisicamente íntegra.

Considerando a oferta insuficiente, sazonal e de alto risco de poluição da água superficial, o baixo potencial hídrico da Formação Itapecuru e a vazão oferecida pelos poços que alcançaram a Formação Codó, deduziu-se que a interface Formação Itapecuru/Formação Codó seria um horizonte de grande importância hidrogeológica para a região, uma vez que seu conhecimento é fundamental para o planejamento de perfuração de poços visando a captação de água subterrânea para o abastecimento regular da população.

A definição dessa interface foi o principal objetivo deste trabalho e as metodologias utilizadas foram, além de Perfilagem Geofísica de Poço, Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com o Método da Eletrorresistividade, perfil com o Método Eletromagnético Slingram.

2 ÁREA

2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Jacundá, unidade autônoma desde 1961, pertence à mesorregião do sudeste paraense e à microrregião de Tucuruí. A sede municipal está localizada a latitude de 04°27'03" Sul e longitude 49°06'59" Oeste. Jacundá faz fronteira com os seguintes municípios: Goianésia do Pará (ao Norte), Rondon do Pará (a Leste), Nova Ipixuna (ao Sul) e Novo Repartimento (a Oeste), como pode ser visualizado na figura 1.

Partindo de Belém, por terra, percorrem-se os primeiros 10 km da BR 316 até a Alça Viária, depois mais 74 km até o município de Mojú e, por fim, 450 km pela PA-150 até a sede municipal de Jacundá.

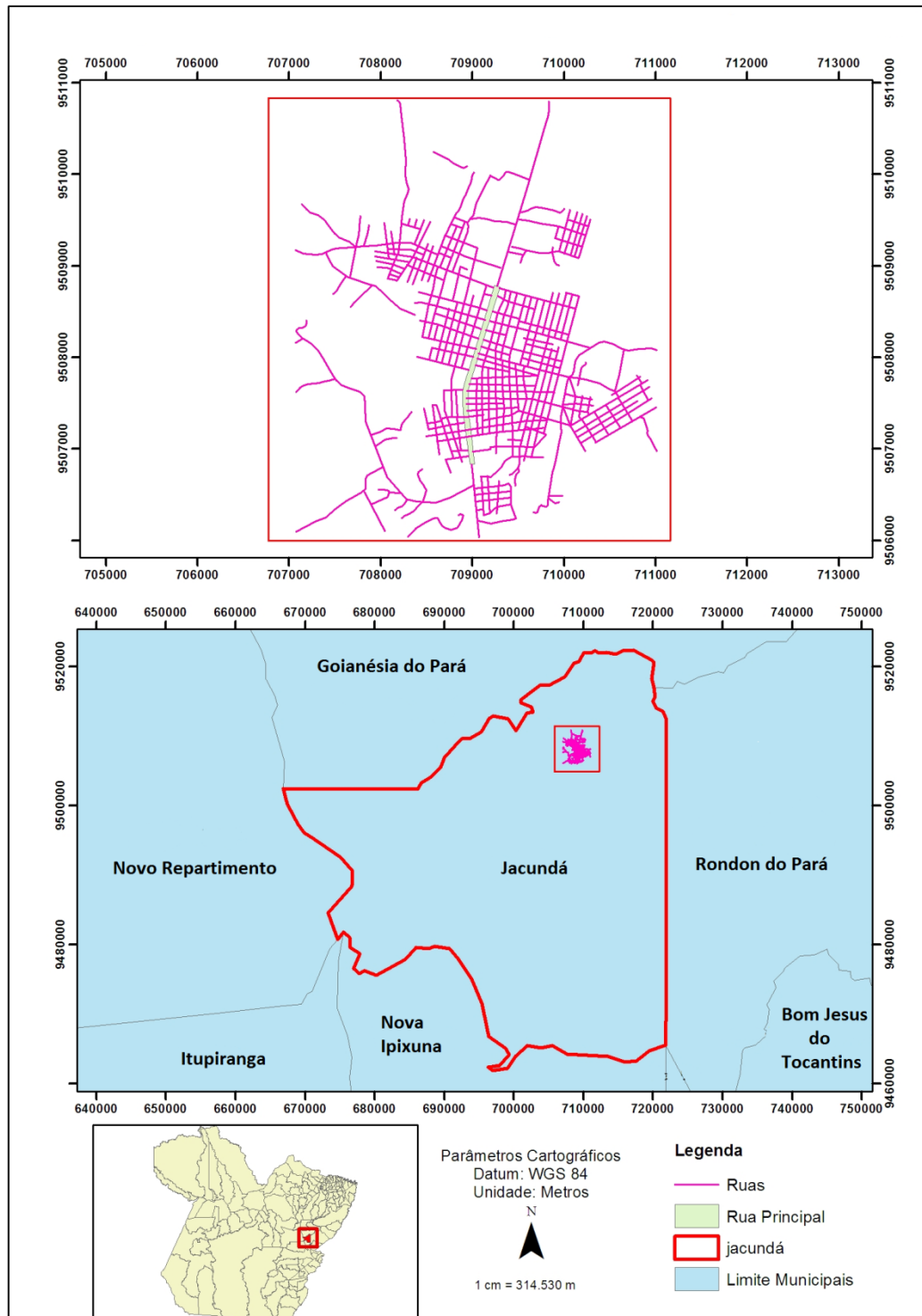
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Nos textos geológicos mais antigos, a Bacia do Parnaíba é identificada pelos nomes Bacia do Maranhão, do Piauí-Maranhão ou do Meio-Norte. A Bacia do Parnaíba ocupa uma área de cerca de 600.000 km², abrangendo partes dos estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Piauí, Ceará e Goiás, com origem relacionada aos eventos termotectônicos do ciclo Brasileiro-Panafricano, com uma espessura da coluna sedimentar total da ordem de 3.500 m (CAPUTO et al., 2005).

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se sobre um embasamento continental durante o estágio de estabilização da plataforma sul-americana (ALMEIDA; CARNEIRO, 2004). A origem ou subsidência inicial da Bacia do Parnaíba, segundo esses autores, provavelmente deve estar ligada às deformações e eventos térmicos fini- e pós-orogênicos do Ciclo Brasileiro ou ao estágio de transição da plataforma.

O embasamento originado no final do proterozóico constitui-se de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Segundo Oliveira e Mohriak (2003), estruturas grabeniformes são interpretadas (com base em dados de sísmica, gravimetria e magnetometria) no substrato da Bacia do Parnaíba.

Figura 1 - Mapa de localização do município de Jacundá/PA. Área estudada aparece dentro de retângulo (em detalhe na porção superior da figura).

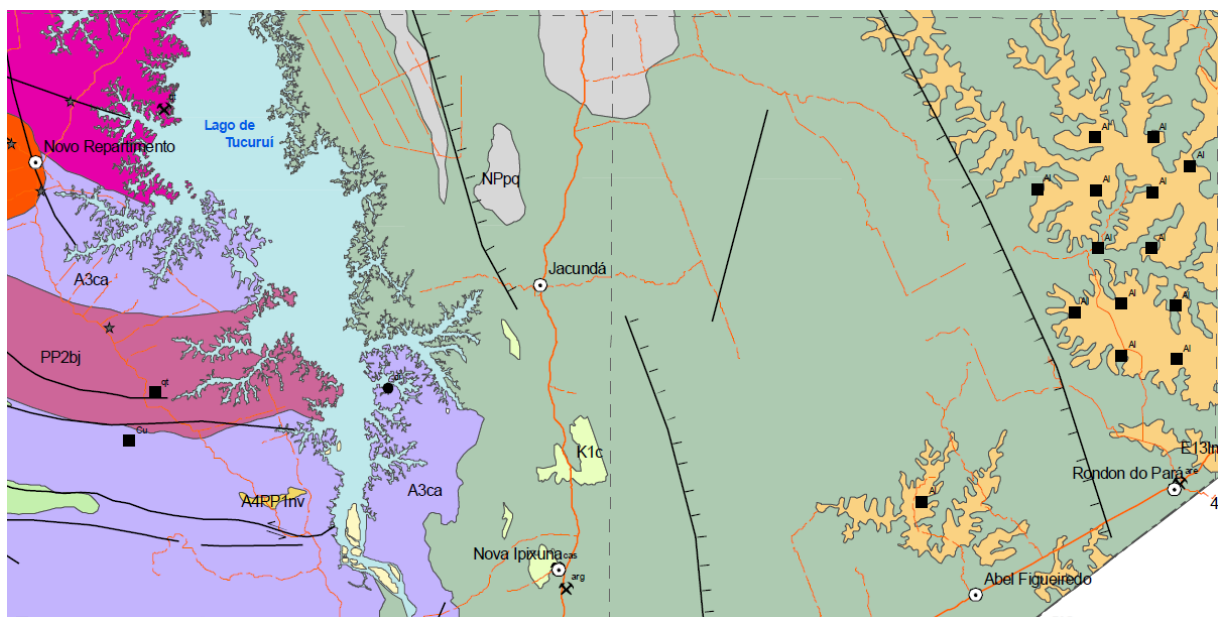


A sedimentação cretácea nesta bacia se processou em caráter restrito, quando o mar ingressou sobre a porção norte da Bacia do Parnaíba, possivelmente pela região da Bacia de Barreirinhas, a partir do Atlântico Equatorial, estendendo-se por uma grande área. Esta sedimentação limitou-se sobre a porção norte da Bacia do Parnaíba e a áreas adjacentes no nordeste do Brasil (ALMEIDA; CARNEIRO, op.cit.).

Na região que está localizada o município de Jacundá, local onde está inserida a pesquisa, ocorrem como principais unidades do cretáceo a Formação Itapecuru e a Formação Codó (figura 2).

A Formação Itapecuru é constituída por arenitos finos, avermelhados, róseos, cinza– argilosos, geralmente com estratificação horizontal e ocasionalmente cruzada, com abundante silicificação na parte superior. Intercalam-se leitões de siltitos e folhelhos cinza–esverdeados e avermelhados. Os estratos arenosos e pelíticos da Formação Itapecuru, de idade Mesoalbio-Neocretáceo, correspondem a seis ciclos deposicionais atribuídos a sistemas de vales estuarinos incisos (ROSSETTI et. al., 2001).

Figura 2: Mapa geológico da área.



Fonte: CPRM (2008).

Os depósitos pertencem a regime transgressivo, e o litotipo mais frequente é formado de arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas, como estratificações cruzadas *swaley*, *hummocky*, acanalada, tabular, *mud-couplets* e escorregamento de massa. Pelitos e arenitos conglomeráticos ocorrem, mas subordinadamente (ANAISSE JUNIOR et al., 2001).

Na Formação Codó, folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita e arenito são os principais litotipos e são frequentes níveis de sílex e estromatólito. Os sedimentos aptianos representativos deste período são folhelhos negros, evaporitos e calcários lacustres que se interdigitam aos arenitos flúvio-deltaicos da Formação Grajaú (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997).

De um modo geral, a Formação Codó pode ser dividida em três ciclos deposicionais, segundo interpretações de superfície e subsuperfície: o primeiro ciclo representa uma transgressão marinha culminando com ciclos evaporíticos, sugerindo uma posterior regressão ou estabelecimento de mar restrito; o segundo e terceiro ciclos evidenciam uma nova ingressão marinha culminando com estabelecimento de condições paludais em planície de maré (FERNANDES; PIAZZA, 1978; LIMA; LEITE, 1978; MESNER; WOOLDRIDGE, 1962, 1964a, 1964b; REZENDE; PAMPLONA, 1970).

Análise estratigráfica e faciológica na região de Codó, Estado do Maranhão, dividiu a Formação Codó em duas sucessões sedimentares: inferior, composta de folhelhos negros betuminosos gradando para calcários e evaporitos; superior, consistindo de intercalações de pelito e arenito de colorações vermelho chocolate e esverdeado, calcário esbranquiçado e acinzentado. Aos estudos faciológicos da primeira sucessão foram interpretados três associações de fácies: (1) lago central; (2) lago transicional; (3) lago marginal. Na sequência superior foram interpretados ambientes deposicionais correspondentes a *shoreface* superior, laguna/baía interdistributária, lobos de suspensão e canal distributário (PAZ; ROSSETTI, 2001).

2.3 HIDROGEOLOGIA

Na Bacia do Parnaíba podem ser considerados os seguintes aquíferos: Corda-Motuca (Jc, PTRm), Codó (Kco), parcialmente, e Itapecuru (Ki). Os poços perfurados nestes aquíferos apresentam profundidades variando de 100 a 400 m, produzindo vazões de algumas até muitas dezenas de m³/h (média em torno de 20 m³/h). As águas são geralmente de boa qualidade e sem restrições de uso, com exceção das do aquífero Codó, que se apresentam, muitas vezes, com altos índices de dureza. (PEDROSA; CAETANO, 2002).

O sistema aquífero Itapecuru ocupa o topo da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Aflora nos estados do Maranhão e Pará, apresentando grande área de recarga, com 204.979 km². É utilizado na pecuária e no abastecimento público no interior do Estado do Maranhão e na cidade de São Luís. Nesta cidade, o aquífero Itapecuru apresenta predominantemente águas carbonatadas-cloretadas com predominância do tipo sódica (SOUSA, 2000).

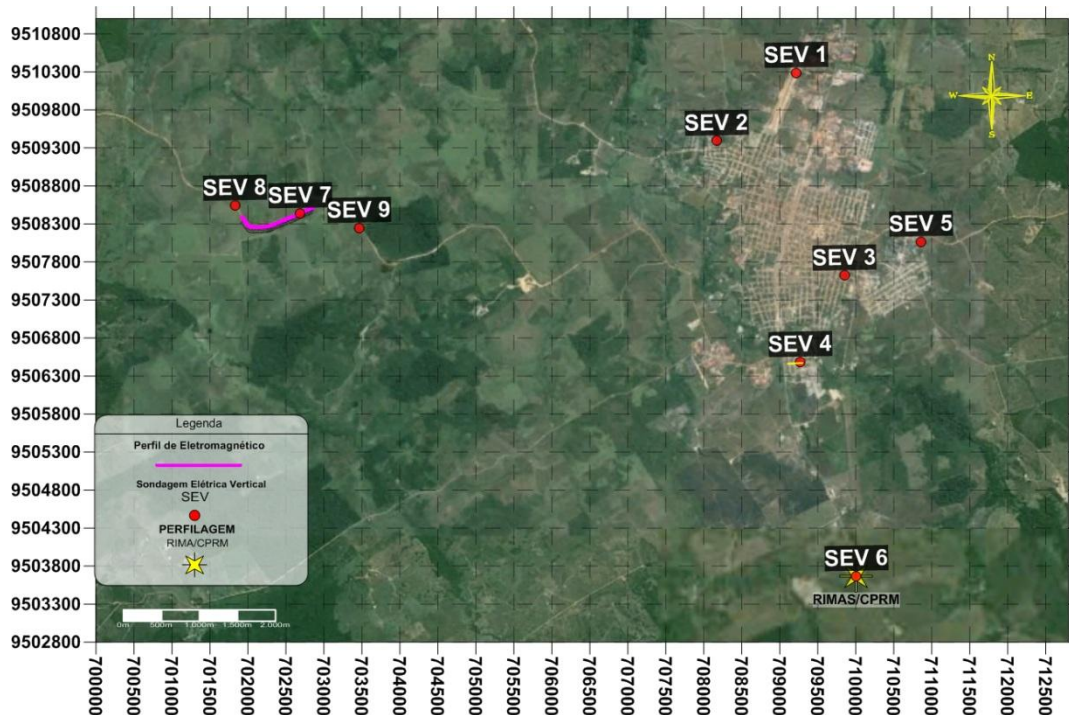
No entanto, na cidade de Jacundá, a Formação Itapecuru constitui apenas uma cobertura, com espessura de até 30 m, portanto, não representa um aquífero em potencial, embora seus sedimentos sejam predominantemente arenosos.

3 METODOLOGIA

O levantamento geofísico foi realizado em quatro campanhas nas posições indicadas pela Figura 3.

Entre 18 e 22 de abril de 2009 foi realizada a primeira campanha, em que foram realizadas cinco Sondagens Elétricas Verticais (SEVs). Na segunda campanha, em 26 de agosto de 2011, foi feita a perfilagem de furo próximo à SEV 6 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Na terceira oportunidade, foi realizada a SEV 6 ao lado do poço perfilado, no dia 5 de novembro de 2011. Finalmente, na quarta campanha de campo foram realizadas mais três SEVs e um perfil eletromagnético de Slingram, de 17 a 19 de julho de 2013.

Figura 3 – Mapa base do levantamento geofísico.



3.1 PERFILAGEM GEOFÍSICA

A CPRM construiu, com recursos do projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), um poço de monitoramento em Jacundá, de nominado neste trabalho de RIMAS/CPRM.

A perfilagem do poço foi realizada uma perfilagem, com o equipamento da *Robertson Geologging Limited*, para definição dos aquíferos, bem como análise química da água encontrada.

O poço teve 176,5 m perfilados, porém, a perfilagem só teve início aos 12,5 m de profundidade devido a características do equipamento. Para este trabalho foram utilizados apenas os primeiros 75 m da perfilagem com registros de Raio gama (RG), Potencial espontâneo (SP), Resistência (SPR), Resistividade curta (Rshn) e Resistividade longa (Rlon).

3.2 SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL

Todas as Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) utilizadas neste trabalho foram executadas com o arranjo Schlumberger, tendo abertura de eletrodos de corrente AB variando de 110 a 640 m. O equipamento utilizado no levantamento de campo foi o resistímetro da *Geotest*.

A profundidade de penetração da corrente é influenciada por diversos fatores entre os quais a separação entre os dois pontos de injeção corrente. Quanto maior a separação, maior a profundidade alcançada.

Para uma determinada separação de AB, a corrente distribui-se de modo não uniforme até determinada profundidade, que é tanto maior quanto maior for essa separação. Por outro lado, as contribuições dos diferentes níveis de profundidades para as medidas realizadas não são iguais. Segundo Roy e Apparao (1971), a profundidade de investigação é a profundidade que mais contribui para a medida. Essa profundidade não deve ser confundida com a profundidade da corrente. Para um semi-espaço homogêneo, esses autores mostraram que essa profundidade é de 0,125 AB. Na prática, é comum utilizar-se como profundidade de investigação a distância de 0,1 a 0,3 de AB (GOUVÊA; SILVA, 1983).

3.2 SLINGRAM

O perfil de Slingram foi adquirido com o arranjo Horizontal Loop Eletromagnético (HLEM) de bobinas, em que as bobinas foram dispostas coplanarmente com a superfície do terreno.

Neste levantamento, o equipamento utilizado foi o MAX MIN I, da *Apex Parametrics Ltda*, que opera em múltiplas frequências, sendo elas 110 Hz, 220 Hz, 440 Hz, 880 Hz, 1.760 Hz, 3.520 Hz, 7.040 Hz e 14.080 Hz.

A distância entre a bobina transmissora (Tx) e a receptora (Rx) foi de 50 m, com leituras a cada 25 m. No total foram levantados 1.050 m de perfil.

4 INTERPRETAÇÃO

4.1 PERFILAGEM GEOFÍSICA

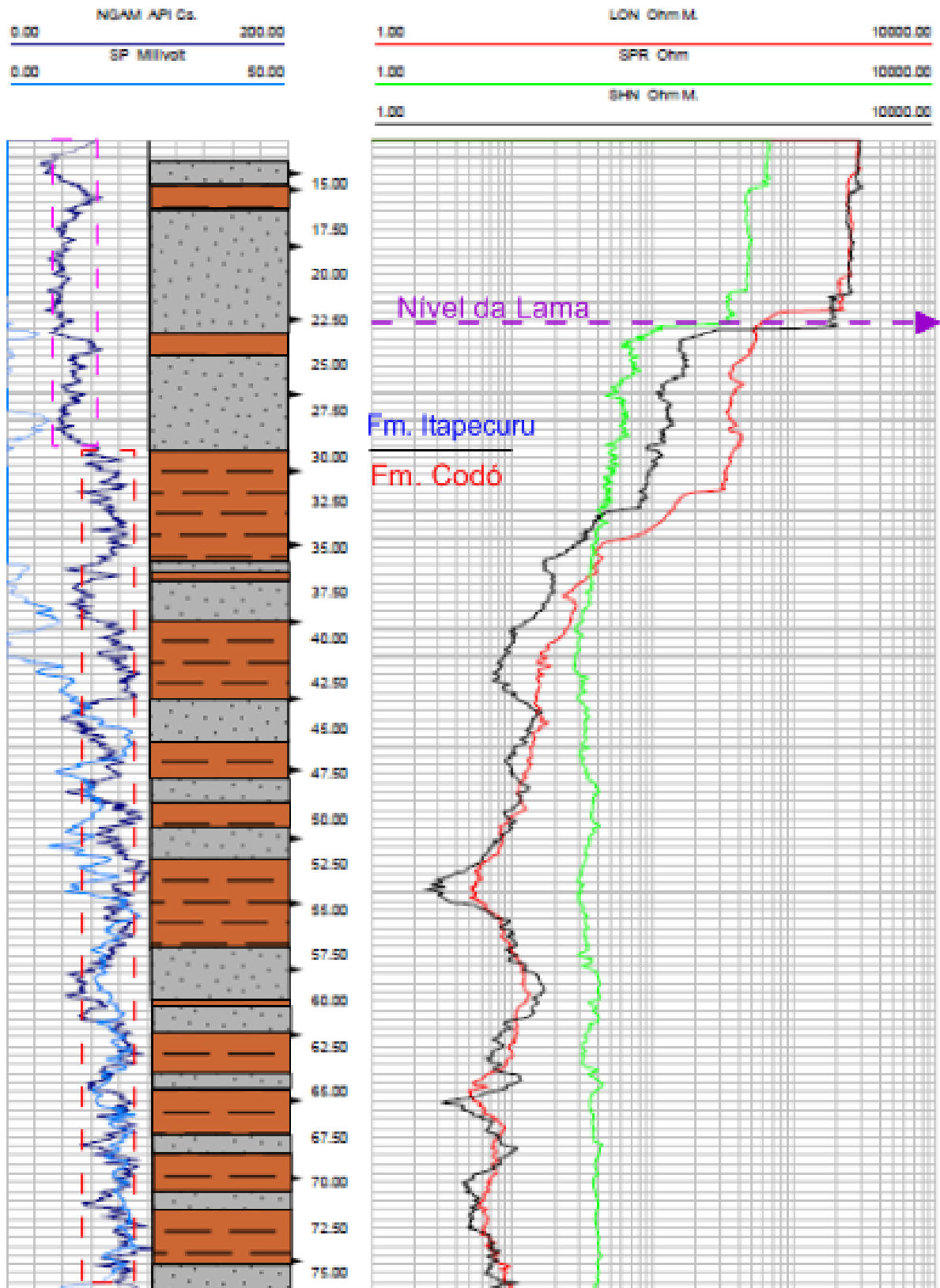
A figura 4 mostra os primeiros 75 m da perfilagem. Ela não fornece informação para os primeiros 12,5 m.

No registro de raio gama, desde o início até 29 m de profundidade, a amplitude (API) varia suavemente entre 25 e 35, correspondendo a um trecho arenoso, com duas passagens em argila que elevam a amplitude para até 62. Após 29 m, a amplitude de RG varia entre 50 e 87 API, comportando-se como uma zona de alta argiloidade, com pequenas oscilações que atingem menor amplitude. Considerando a descrição das amostras de calha, tais registros são compatíveis um pacote de folhelho, com intercalações de arenitos e siltitos.

Os dois registros de resistividade elétrica mostram valores caindo de 100 ou pouco mais ohm.m para valores entre 20 e 40 ohm.m, até os 33 m de profundidade. A queda acentua-se ao ser atingido o nível da lama, com a conseqüente redução dos espaços preenchidos por ar. Até essa profundidade, portanto, observa-se um único pacote que, contudo, sofre um deslocamento em seus valores associados à ausência da lama no início da perfilagem. Finalmente, as resistividades continuam diminuindo até ficarem oscilando em torno de 10 ohm.m, abaixo de 40 m.

Os perfis de SP e SPR não mereceram maior atenção porque o primeiro saiu fora da escala definida e o SPR apresentou um comportamento relativamente monótono.

Figura 4 – Resultado da Perfilagem Geofísica no poço RIMAS-CPRM.. Esquerda: RG (perfil azul escuro) e SP (azul-claro); tracejado rosa e vermelho faixas de API. Direita: Rlon (vermelho), (SPR : verde) e Rshn (preto).

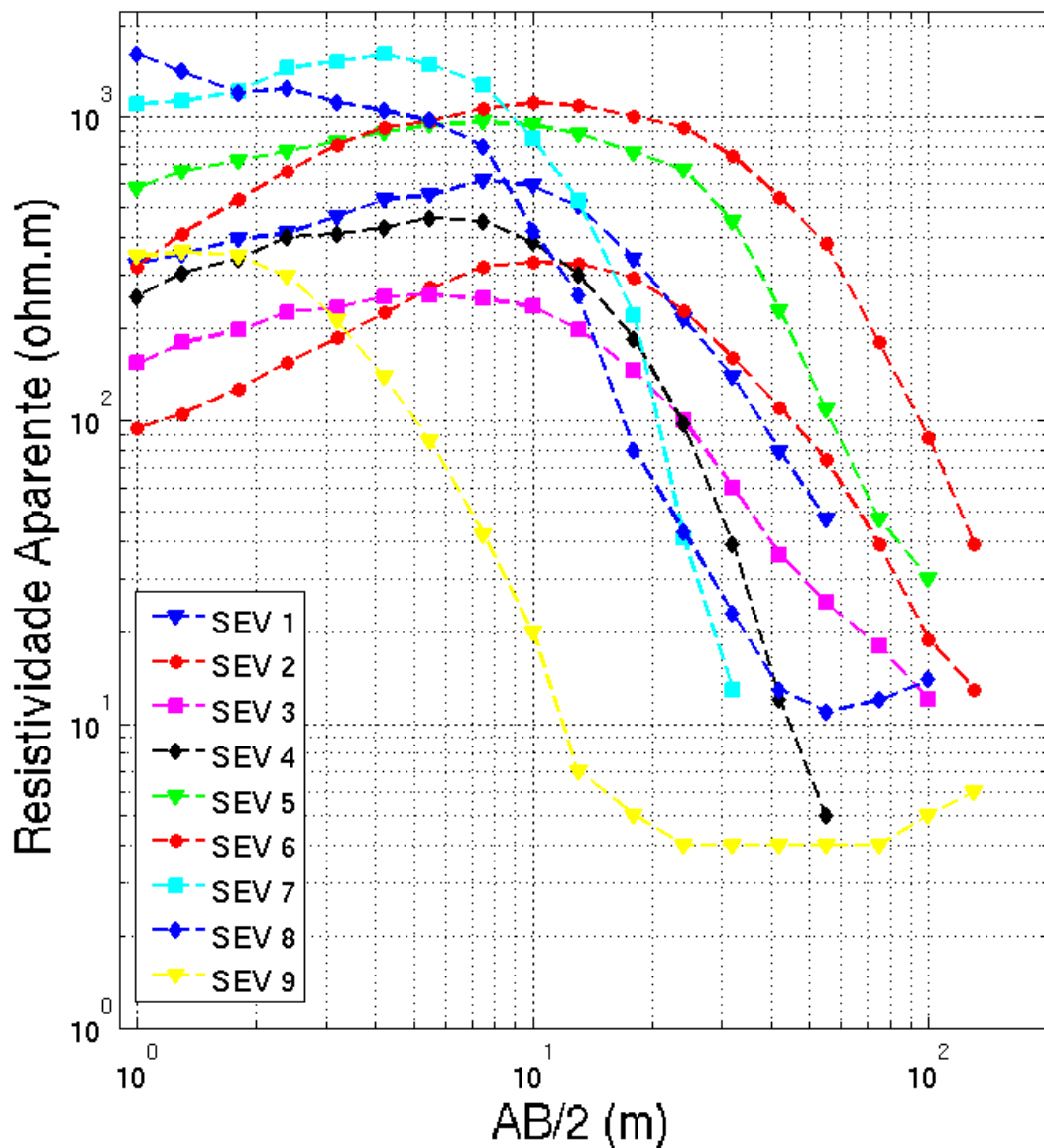


4.2 SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL

As nove SEVs foram reunidas na Figura 5. Elas não possuem um mesmo padrão. São curvas do tipo K e H.

As curvas K possuem a seguinte relação entre a resistividade de cada uma de suas camadas: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$. As sondagens 1 a 7 são do tipo K.

Figura 5 - Gráfico contendo todas SEVs.



A interpretação foi realizada com programa de inversão baseado em Johansen (1977). Para meios horizontalmente estratificados, a inversão por meio desse programa tem como base a técnica da inversa generalizada.

A figura 7 mostra o ajuste das medidas aos dados gerados. A convergência entre medidas e dados gerados é no máximo 0,143, ou seja, excelente, como mostra a Tabela 1. Os modelos físicos obtidos com a interpretação e outros dados são também apresentados nesta tabela.

A profundidade de investigação como em Roy e Apparao (1971) é a profundidade que mais contribui para a medida e, para um semi-espaço homogêneo, é de 0,125 AB. A profundidade empírica, por sua vez, varia de 0,1 a 0,3 de AB (GOUVÊA; SILVA, 1983). Nenhuma dessas profundidades deve ser confundida com a profundidade da corrente. Ainda assim, a Tabela 1 mostra, para as aberturas máximas de eletrodos de corrente AB usadas, que o topo da penúltima camada é sempre muito inferior ao menor valor para a profundidade de investigação empírica e à profundidade de Roy e Apparao (op. cit.).

A Tabela mostra também que, segundo os modelos físicos obtidos, o limite entre a Formação Itapecuru e a Formação Codó, por volta de 29 m na zona onde foi executada a SEV 6, não teria sido atingido. É a localização desse limite o principal objetivo da interpretação, devido ao maior potencial hidrológico da Formação Codó. Por outro lado, todas as camadas basais das SEVs têm resistividade muito baixa, efeito provável do limite supracitado.

A figura 8 mostra os modelos obtidos lançados nos perfis aproximadamente N-S e E-W. A diferença de nível entre as posições das SEVs foi considerada.

As SEVs que compõem o perfil N-S permitem identificar cinco camadas, descritas na Figura 8. É impossível fazer uma correlação geoeétrica satisfatória entre essas camadas. Ainda que se remova do perfil as SEVs 2 e 5, por terem tido suas posições rebatidas no perfil a partir de maiores distâncias do que as demais SEVs, a correlação permanece insatisfatória.

As três SEVs usadas no perfil E-W, por sua vez, permitiram identificar a presença de 5 camadas no perfil descritas na base da Figura 8 bem como revelam que a SEV 9 reflete uma subsuperfície diferente daquela investigada pelas SEVs 7 e 8.

Figura 7 – Ajuste das medidas (pontos) aos dados gerados (linha cheia) na interpretação pelo número mínimo de camadas.

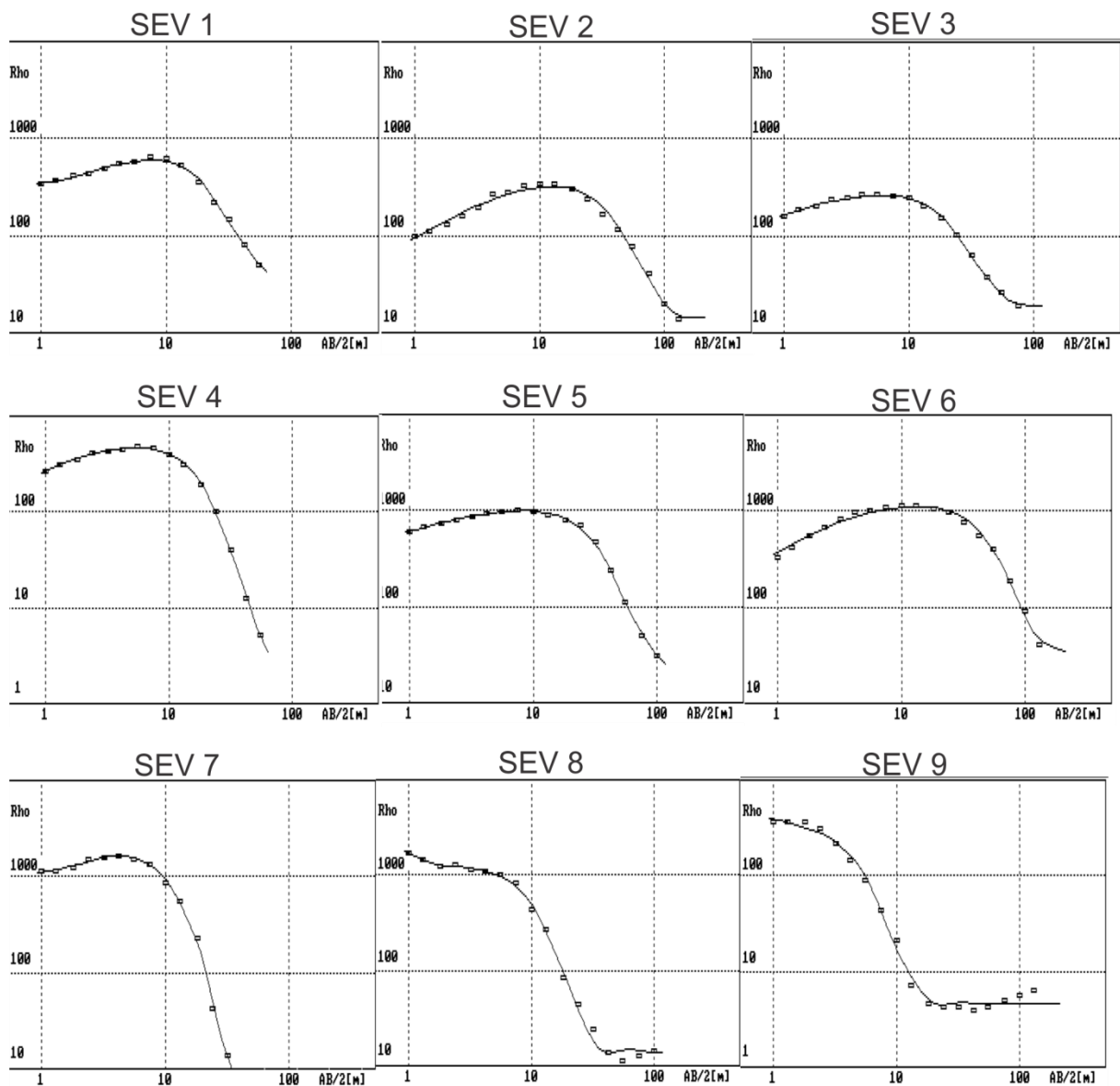
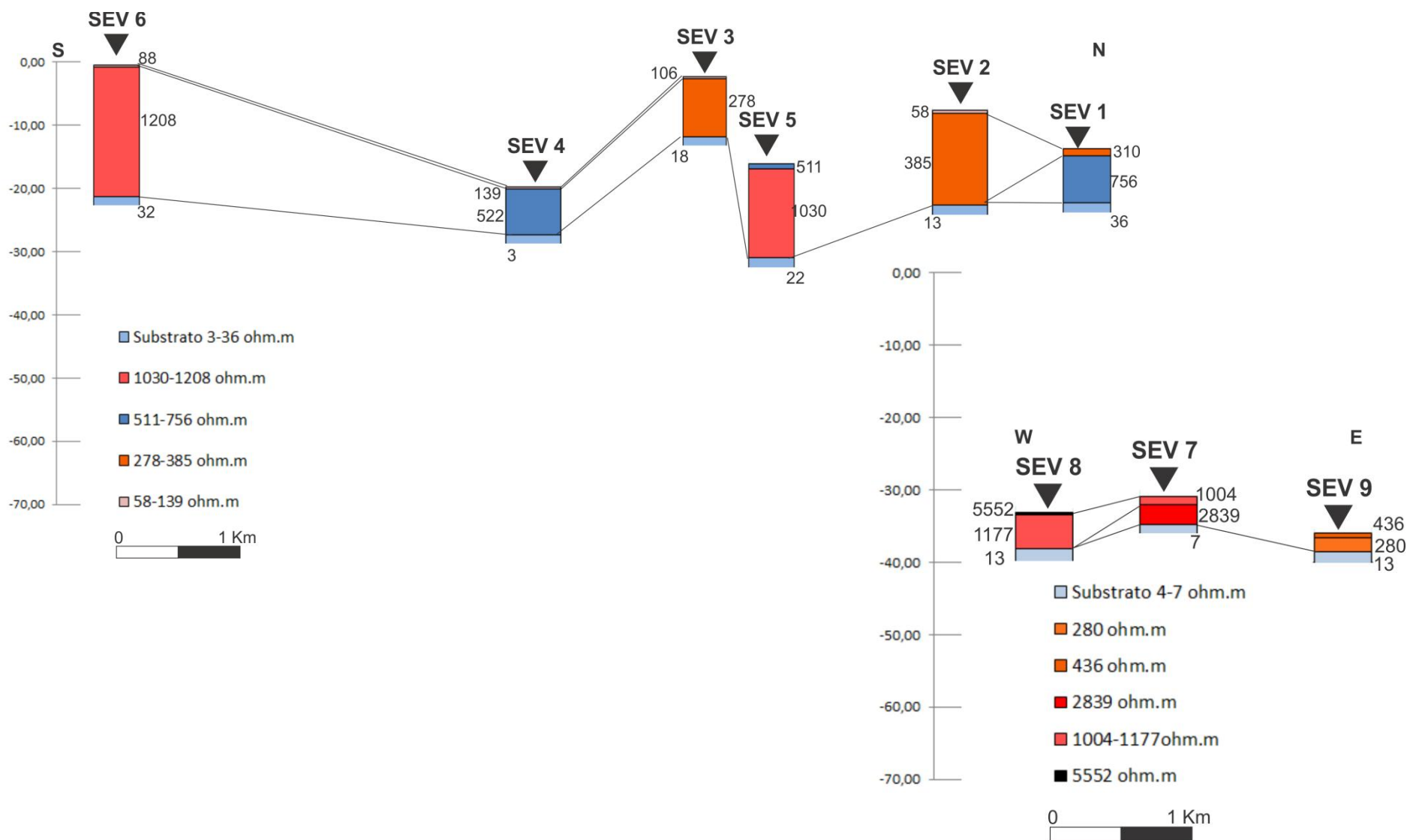


Tabela 1 – Modelos físicos para a interpretação pelo número mínimo de camadas.

SEV	SEV 1	SEV 2	SEV 3	SEV 4	SEV 5	SEV 6	SEV 7	SEV 8	SEV 9
UTM E	709218	708170	709851	709271	710860	710009	702689	701830	703465
UTM N	9510288	9509394	9507622	9506484	9508067	9503668	9508441	9508541	9508248
COTA (m)	107	114	119	101	105	121	90	88	85
	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)	ρ h (m)
CAMADA 1	310 1,1	58 0,5	106 0,4	139 0,3	511 0,7	88 0,2	1004 1,1	5552 0,2	436 0,6
CAMADA 2	756 7,5	385 14,6	278 9,2	522 7,3	1030 14,1	1208 20,5	2839 2,7	1177 4,7	280 2
CAMADA 3	36	13	18	3	22	32	7	13	4
Prof.Topo Camada 2 (m)	8,6	15,1	9,6	7,6	14,8	20,7	3,8	4,9	2,6
AB (m)	110	260	150	110	480	260	64	200	360
Prof.de Inv. Emp. (m)	11 a 33	26 a 78	15 a 45	11 a 33	48 a 144	26 a 78	6,4 a 19,2	20 a 60	36 a 108
CONVERGÊNCIA	0,046	0,093	0,032	0,047	0,033	0,081	0,075	0,119	0,143

Figura 8 – Correlação geelétrica usando-se o número mínimo de camadas.
 Perfil N-S: topo. Perfil E-W: base.



A interpretação obtida para cada ponto (1D) fornece modelos que, posicionadas em um perfil, frequentemente permitem a interpretação aproximada da subsuperfície 2D, se for o caso, atravessada pelo perfil. No entanto, como os modelos nas zonas de transição entre subsuperfícies 1D e 2D diferem consideravelmente, a interpretação realizada pelo número mínimo de camadas, como não permite correlação satisfatória (Figura 8), pode refletir a presença dessas zonas de transição geológica.

Deve ser destacado que o ajuste entre as medidas e os dados calculados garante apenas que o modelo físico obtido é uma possível solução, mas não garante que ela seja verdadeira. O uso de informação a priori na interpretação também não garante que a solução (o modelo físico) encontrada seja verdadeira, mas aumenta a probabilidade que isto ocorra.

Em seguida, portanto, foi realizada a interpretação com um outro procedimento, que consistiu na utilização de informações a priori fornecidas pela perfilagem (item 4.1), em especial a espessura das camadas atravessadas, para a interpretação da SEV 6, locada na posição da perfilagem geofísica. As resistividades obtidas para as camadas cujas espessuras foram fornecidas pela perfilagem para a interpretação da SEV 6 bem como estas últimas foram, então, utilizadas como informação a priori para a sondagem mais próxima, e assim por diante.

A interpretação foi realizada por meio do programa IPI2Win de Bobachev (2001), que usa ridge regression (INMAN, 1975).

A interpretação com informação a priori deparou-se com vários obstáculos. A perfilagem não fornece informação para os primeiros 12,5 m (vide Figura 4). A distância entre as SEVs é com frequência demasiadamente grande em relação à escala do trabalho. A quantidade das SEVs é inadequada para a cobertura da área sob estudo. Além disso, há desnível topográfico. Os três últimos obstáculos comuns também à interpretação pelo menor número de camadas.

A figura 9 mostra o ajuste das medidas aos dados gerados. A Tabela 2 mostra que a convergência entre medidas e dados gerados atinge valores maiores do que na interpretação anterior (5,84 contra 0,14)³. Os modelos físicos obtidos com a interpretação e outros dados são também apresentados nesta tabela.

Figura 9 – Ajuste das medidas (linha preta) aos dados gerados (linha vermelha) na interpretação com informação a priori a partir da perfilagem geofísica na posição da SEV 6. A linha azul representa o modelo físico obtido.

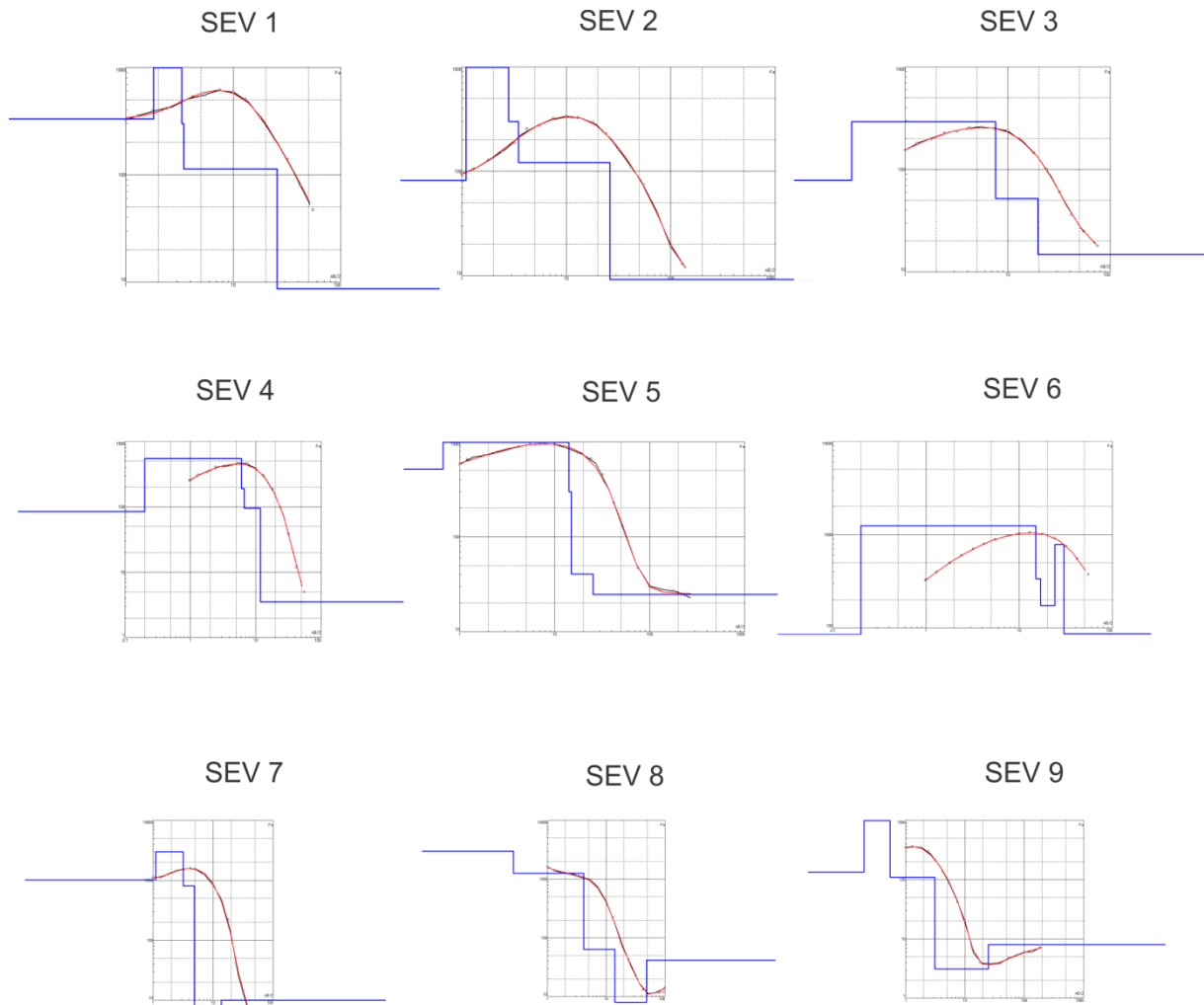


Tabela 2 – Modelos físicos para a interpretação com informação a priori a partir da perfilagem geofísica na posição da SEV 6.

SEV	SEV 1		SEV 2		SEV 3		SEV 4		SEV 5		SEV 6		SEV 7		SEV 8		SEV 9	
UTM E	709218		708170		709851		709271		710860		710009		702689		701830		703465	
UTM N	9510288		9509394		9507622		9506484		9508067		9503668		9508441		9508541		9508248	
COTA (m)	107		114		119		101		105		121		90		88		85	
	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)	ρ	h (m)
CAMADA 1	331	1,81	82	1,1	78	0,29	85	0,2	516	0,66	85	0,2	1016	1,1	3000	0,26	134	0,2
CAMADA 2	2776	1,5	1703	1,69	292	7,27	545	5,87	1035	13,4	1240	14,85	2994	2,08	1258	3,9	1201	0,3
CAMADA 3	300	0,12	300	0,68	52	12,08	190	0,58	300	0,9	337	1,84	809	1,69	64	9,9	109	2,56
CAMADA 4	113	22,2	121	22,8	15		96	5,19	41	10,3	173	7,14	3	8,77	7	34,6	3	21,7
CAMADA 5	5		9				4		25		783	6,28	10		41		8	
CAMADA 6											40	7,97						
CAMADA 7											13							
Prof. De investigação (m)	25,63		26,27		19,64		11,84		25,26		38,28		13,64		48,66		24,76	
AB (m)	110		260		150		110		480		260		64		200		360	
Prof.de Inv. Emp. (m)	11 a 33		26 a 78		15 a 45		11 a 33		48 a 144		26 a 78		6,4 a 19,2		20 a 60		36 a 108	
CONVERGÊNCIA (%)	3,25		2,24		1,15		2,15		4,11		0,07		5,84		3,91		4,16	

A figura 10 mostra os modelos obtidos lançados nos perfis aproximadamente N-S e E-W. A diferença de nível entre as posições das SEVs foi considerada.

As SEVs mostram a intercalação de camadas de resistividade relativamente alta e relativamente moderada até que, a partir da interface que corresponde ao limite entre a Formação Itapecuru e a Codó na SEV 6, as camadas passam a ser condutivas.

Esse limite foi encontrado em todas as SEVs, com correlação aparentemente muito boa, em especial entre as SEVs 6, 4 e 5. Como já levantado, as SEVs 7 e 8 refletem uma subsuperfície diferente daquela investigada pela SEV 9. A resistividade superficial elevada pode ter relação com evento tectônico localizado. Finalmente, é possível que o limite entre as duas formações ocorra mais próximo da superfície nas SEVs 1 e 2 do que denota a figura 10; neste caso, pode-se pressupor que teria havido um contato mais gradual entre as duas formações, pela presença de uma camada de resistividade relativamente baixa, mas ainda assim mais elevada do que a encontrada por outras sondagens para caracterizar a Formação Codó.

A camada condutiva é a porção do pacote de folhelho da Formação Codó que contém as intercalações de arenito, onde a água está acumulada. Com espessura variando de 30 a 65 m, é justamente esta a camada que se pode considerar como o aquífero da área.

O mapa de contornos mostrado na figura 11 representa a profundidade interpretada para o topo da Formação Codó. A região de menor profundidade, mínimo de 3 m, em azul, seria onde o topo da Formação Codó estaria mais próximo da superfície. E é ao sul e ao norte da cidade que o topo da Formação Codó está mais profundo, em vermelho, com cerca de 30 m.

Na figura 12 é mostrado o mapa da resistência transversal considerando-se toda a espessura dos modelos geológicos obtidos e na figura 13, o mesmo mapa considerando-se apenas a espessura dos modelos relacionável a aquífero. Este parâmetro é obtido a partir do produto da resistividade de cada camada por sua espessura (MAILLET, 1947) e é relacionado com a transmissividade do aquífero.

Figura 10 – Seção geolétrica correlacionada à perfilagem geofísica.
 Perfil N-S: topo. Perfil E-W: base.

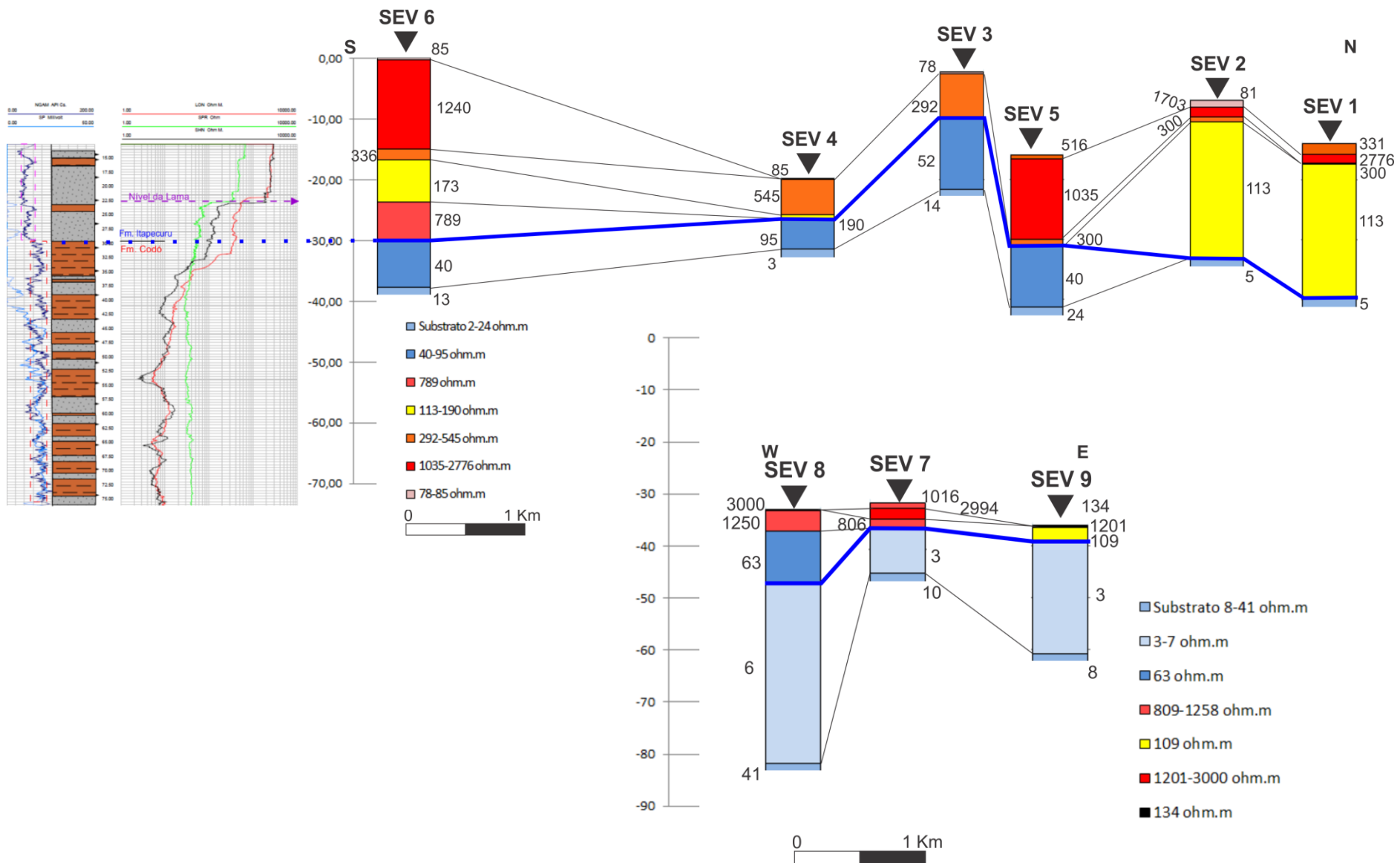


Figura 11 – Mapa do topo interpretado para a Formação Codó.

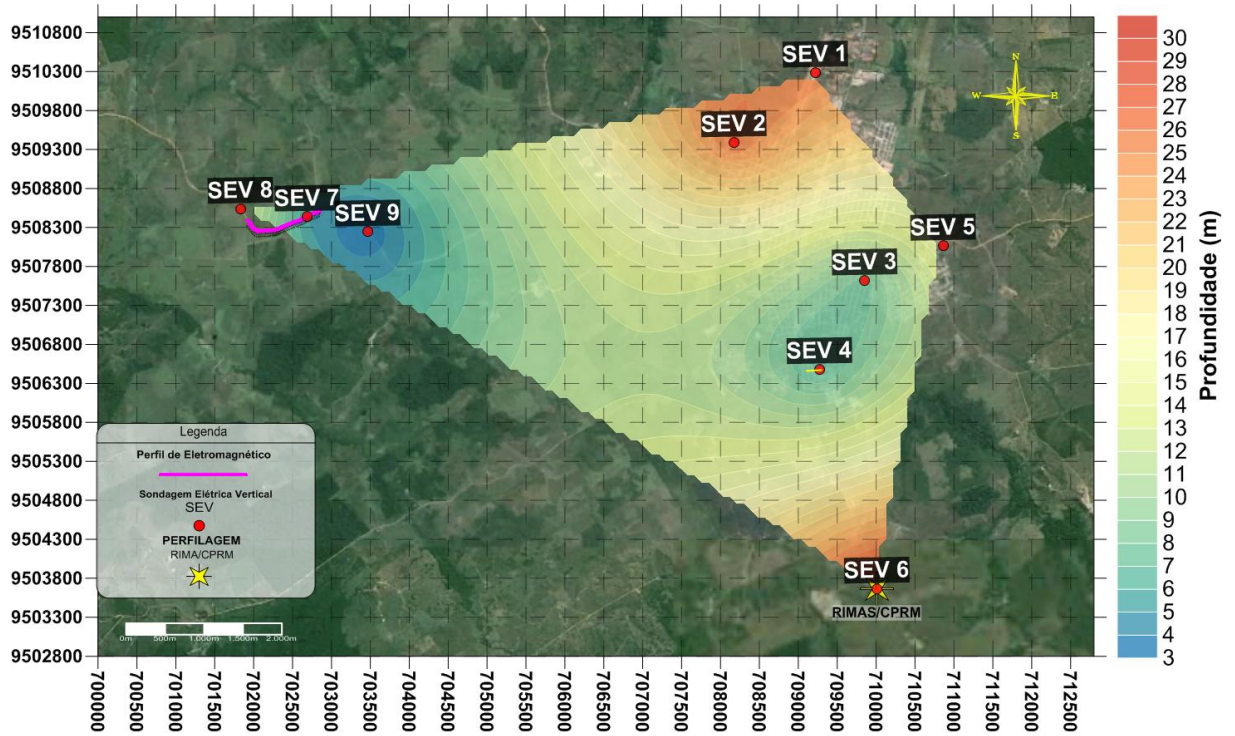


Figura 12 – Mapa da resistência transversal.

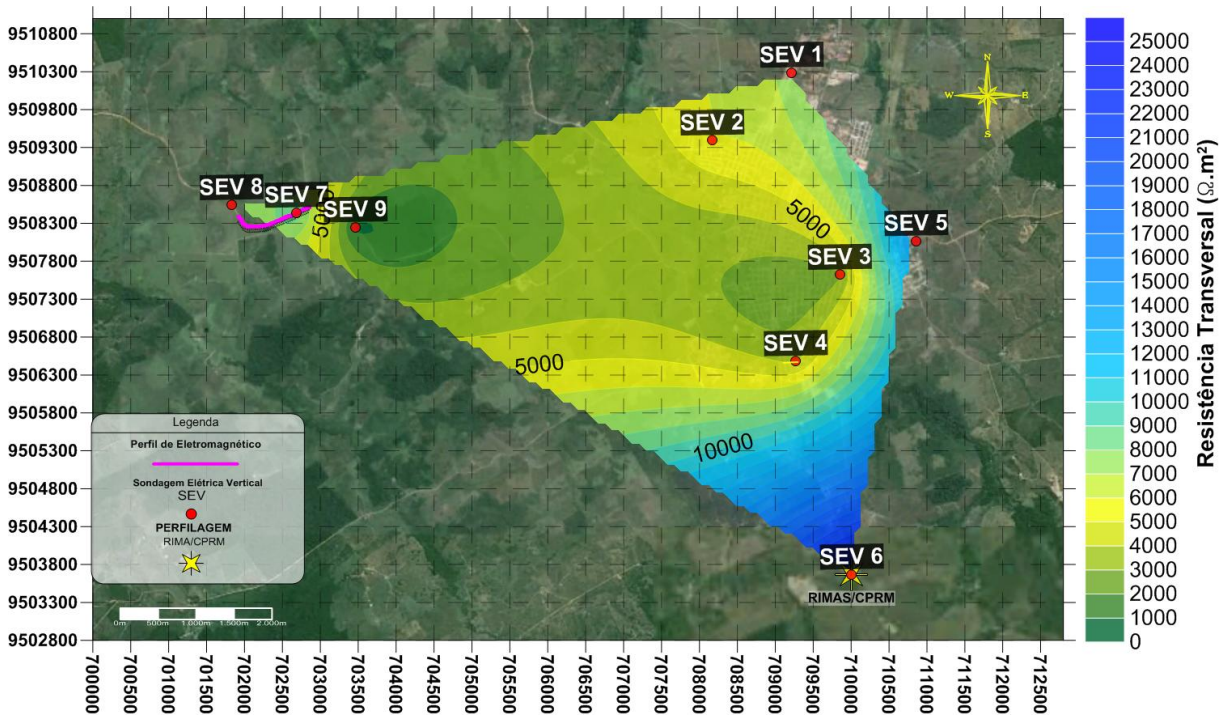
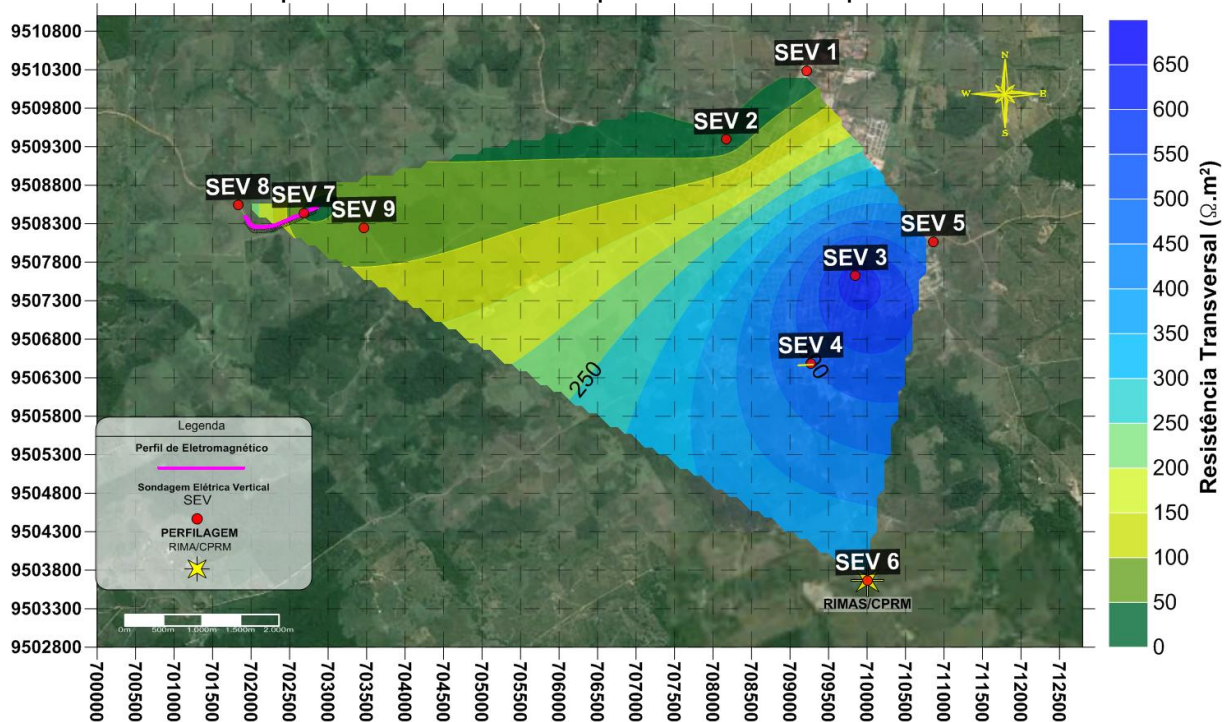


Figura 13 – Mapa da resistência transversal para as camadas interpretadas como aquífero.



As duas últimas figuras permitem extrair informações do potencial hidrogeológico da área, para melhor indicar a posição para locar perfuração. Sendo assim, os maiores valores de resistência transversal podem ser considerados como um bom local para tal indicação, pois se trata de uma zona com aquífero em potencial. Analisando-se os mapas identifica-se a porção leste, em azul, com a maior quantidade de água disponível para a profundidade estudada.

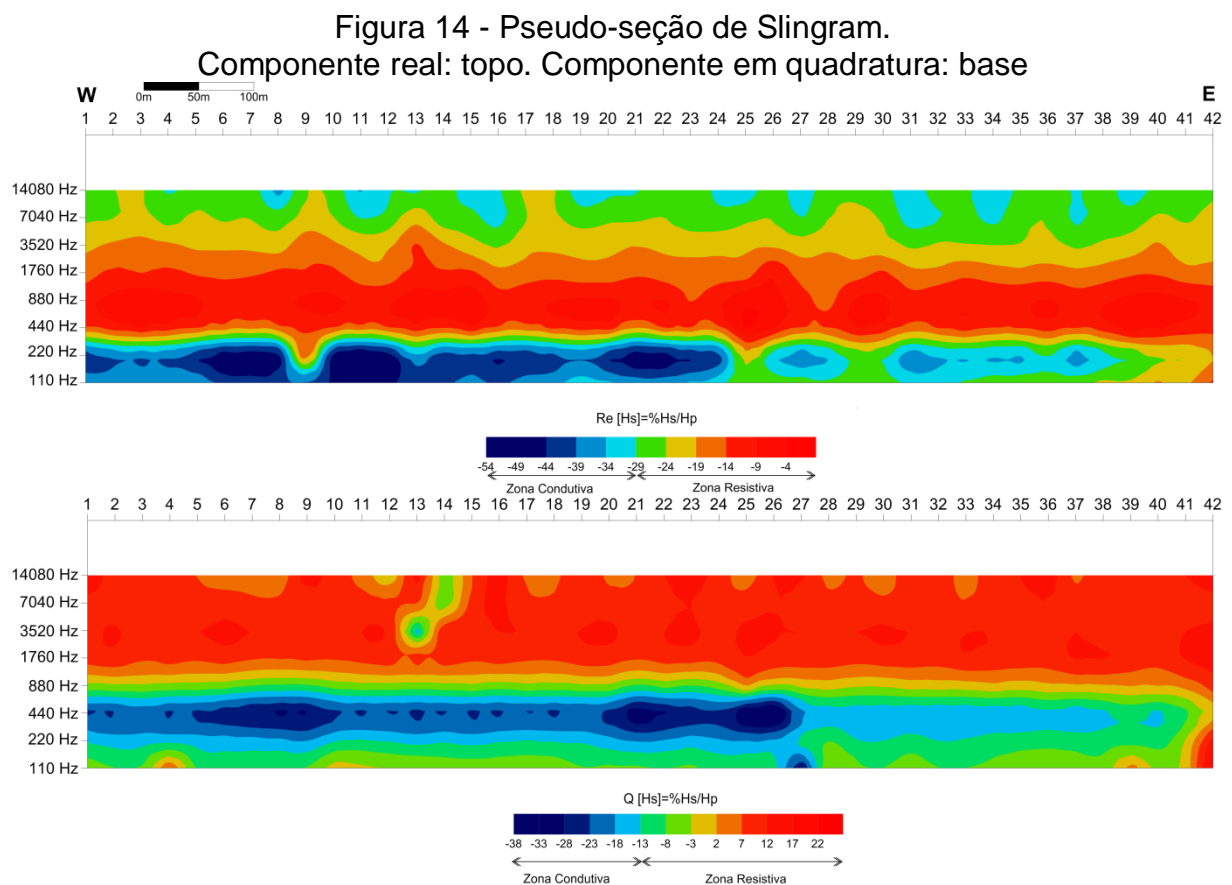
4.3 SLINGRAM

As respostas em fase e em quadratura obtidas com as oito frequências do Singram foram reunidas na pseudo-seção construída com o software Surfer 11 da Golden apresentada na Figura 14.

A pseudo-seção construída com a em fase mostra que a resistividade aumenta com a profundidade, até que a partir da profundidade alcançada pelas frequências 220 e 110 Hz, o meio comporta-se lateralmente como condutivo, em especial da estação 1 até a estação 24. Após a estação 24, a condutividade tende a diminuir gradualmente na lateral, até comportar-se como um meio resistivo.

Na pseudo-seção com a quadratura ocorre o mesmo, mas já na frequência de 440 Hz e até um pouco mais para leste observa-se a faixa condutiva.

Esta variação lateral na propriedade física pode estar relacionada a uma falha extensional na área e apontar a separação entre as formações Itapecuru e Codó.



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A interpretação de perfilagem de poço de sondagem CPRM/RIMAS, pelo registro RG, mostrou o topo do folhelho da Formação Codó ocorrendo aos 29 m de profundidade, é possível visualizar as várias intercalações de arenitos nesse pacote de folhelho. São essas intercalações de arenitos que tornam interessante esta formação para o abastecimento de água, devido a sua maior capacidade de armazenamento de água. Embora o folhelho seja carbonático, segundo a análise de água feita no poço, a dureza da água está dentro dos padrões exigidos pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

As SEVs realizadas foram interpretadas considerando-se o menor número de camadas indicado pelas assíntotas para efeito de comparação com a interpretação realizada com base na informação a priori fornecida pela perfilagem geofísica de um furo de sondagem na posição da SEV 6.

A discrepância entre os resultados obtidos com os dois tipos de procedimento é grande.

Ainda que o primeiro procedimento de interpretação permita verificar que em profundidade se faz sentir o efeito da passagem entre as Formações Itapecuru e Codó, devido a menor resistividade desta última, ele fornece espessura, profundidade para as camadas inferiores ao esperado considerando-se as aberturas de eletrodos de corrente utilizadas bem como a profundidade da interface entre as duas Formações encontradas pelo furo de sondagem.

A interpretação das sondagens incorporando a informação a priori obtida do furo revelou dois pacotes distintos; um mais raso, correspondente ao ramo de resistividade crescente e outro abaixo, correspondente ao ramo descendente, indo para um substrato pouco resistivo. Esse resultado é amplamente apoiado pela interpretação dos dados obtidos com o método Slingram.

O topo da Formação Codó, segundo as SEVs, aparece entre 7 e 30 m de profundidade, e a porção leste da área estudada seria a mais indicada para a perfuração de poços.

A oeste da cidade, onde foi realizada a SEV 7, a resistividade elevada e falta de continuidade das camadas denota processo tectônico.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p.43-58.
- ANAISSE JÚNIOR, J.; TRUCKENBRODT, W.; ROSSETTI, D. F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, Área de Açailândia – MA, Bacia do Grajaú. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p.119-150.
- BOBACHEV, A. A. **IPI2Win(MT) v.2.0 - User's Guide**. Geoscan-M. Ltd., Moscow State University, Geological Faculty, Dept. of Geophysics, Moscow, Russia, 2001.
- BRASIL, Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 12 dez, 2011. Disponível <<http://www.in.gov.br>>, Acesso em: 19 mar, 2014.
- CAPUTO, M.V.; IANNUZZI, R.; FONSECA, V.M.M. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Parnaíba. **Fundação Paleontológica Phoenix**, v.7, n. 81, p. 1–6. 2005. Disponível: <<http://www.phenix.org.br>>. Acesso em 02/12/2011
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico do Pará**. Disponível:<<http://www.cprm.gov.br/publique/media/para.pdf>>. Acesso em: 08 fev., 2014.
- FERNANDES, G.; PIAZZA, H.D. O Potencial oleogenítico da Formação Codó. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v.21, n.1, p. 3–16. 1978.
- INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, v. 40, n. 5, p. 798–817, 1975.
- JOHANSEN, H. K. A man / computer interpretation system for resistivity sounding over a horizontally stratified earth. **Geophysical Prospecting**. V.25, p. 667-691. 1977.
- LIMA, E.A.A.; LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba**. Recife: Integração Geológica-Metalogenética, DNPM/CPRM, 1978. 437p. (Relatório).
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. da C. **Curso de Prospecção Geofísica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1983.
- MAILLET, R. The fundamental equations of electrical prospecting. **Geophysics**. V. 12, n. 4, p. 529-556, 1947.

MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. **Maranhão basin study revision**. Belem: Petrobras, 1962. (Relatorio, 205).

MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. Estratigrafia das bacias paleozoica e cretacea do Maranhao. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v.7, n.2, p. 137–164. 1964a.

MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. Maranhão paleozoic basin and cretaceous coastal basins, north Brazil. **Bulletin American Association Petroleum Geologists**, Tulsa, n. 48, p1475–1512. 1964b.

OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W. U. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag Basin, Northeastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, p. 351-383. 2003.

PAZ, J.D.S.; ROSSETTI, D.F. Reconstrução paleoambiental da Formação Códó(Aptiano), borda leste da Bacia do Grajau, MA. In: ROSSETTI, D.F.; GOES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Eds.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém, Museu Paraense Emilio Goeldi, Colecao Friedrich Katzer, 2001. p. 77–100.

PEDROSA, C. A.; CAETANO, F. A. **Águas subterrâneas**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas, 2002. 50p. (Relatório)

RESENDE, W.M. de; PAMPLONA, H.R.P. Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano Santos. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1/2, p. 5–14. 1970.

ROSSETTI D.F.; TRUCKENBRODT W. Revisão estratigráfica para os depósitos do albio-terciário inferior na Bacia de São Luís (MA). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Ciências da Terra, v. 9, p. 29-41. 1997.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JUNIOR, A. E. Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p. 67-76.

ROY A.; APPARAO A. Depth of investigation in direct current methods. **Geophysics**. V.36, n. 5, p. 943-959. 1971.

SOUSA, S.B. Sistema aquífero da Ilha do Maranhão (MA). In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABAS/AHLSUD/IAH, 2000. 1 CD-ROM.