



Investigação Geométrica e Geológica na Borda SW da Bacia Potiguar, NE do Brasil: estudo de caso para a os Calcários e Karst da Formação Jandaira.

Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco⁽¹⁾, Jackson Alves Martins⁽¹⁾, Eduardo Nunes Capelo Alvite⁽¹⁾, Caio César Jucá⁽¹⁾, Sergio Bezerra Lima Junior⁽¹⁾, Ailton Nascimento Amorin⁽¹⁾, Nilton César Vieira Silva⁽¹⁾, ⁽¹⁾Laboratório de Geofísica – Universidade Federal do Ceará.

Copyright 2015, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This study focuses on the Ceara Northeast limit, bordering Rio Grande do Norte, specifically in the Tabuleiro do Norte region, southwestern border of the Potiguar Basin, which is the main onshore reserves of hydrocarbons in the country. The basin in question is, due to its importance, one of the most well-known basin of the country, however, even with such large amount of studies that already exists in this region, there are still several areas with no consistent information, mainly regarding the characterization of the basin edge, as the thickness of the sedimentary packages and the depth of the top of the basement. Thus, this research jointed a regionally geological data, to well data from the System of Groundwater Management SIAGAS /CPRM and to 1D and 2D geoelectric data. Once collected all the data, a series of by-products were generated, as stratigraphic correlations, geoelectrical model of the basin edge, characterization of possible karst structures, beyond discussions on the reliability level of some existing data in the literature, such as in the SIAGAS. The geophysical survey took place between the municipal headquarters of Tabuleiro do Norte and the Olho D'água da Bica district, where were acquired Vertical Electrical Sounding and Earth Resistivity Tomography data. In order to achieve more consistent models to the complex geological reality in the edge of the Potiguar Basin, all these data were integrated among themselves and, conclusively, a final geological model in block diagram was created to represent the surface and subsurface of the study area.

Introdução e Localização da área de estudo

O presente trabalho concentra-se no limite Nordeste do Ceará, divisa com Rio Grande do Norte, especificamente no município de Tabuleiro do Norte, borda sudoeste da Bacia Potiguar, que é a principal reserva onshore de hidrocarbonetos no País. A bacia em questão trata-se, devido a sua importância, de uma das mais bem conhecidas do país, entretanto, por mais trabalhos que já existam nessa região, há ainda diversas áreas com ausência de informações coerentes, principalmente no tocante a caracterização de borda

de bacia, como espessura dos pacotes sedimentares e topo do embasamento. Nesse sentido, a presente

pesquisa contribuiu com um reconhecimento geológico regional, dados de poços levantados a partir do Sistema de Gestão de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM e dados geométricos 1D e 2D. Uma vez adquiridos os levantamentos todos os dados, uma série de subprodutos foram gerados, como correlações estratigráficas, modelo geométrico da borda da bacia, caracterização de possíveis estruturas cársticas, além da discussão sobre o nível de confiabilidade de dados existentes na literatura, como os do SIAGAS. O levantamento geofísico se deu entre a sede municipal de Tabuleiro do Norte e o distrito de Olho D'Água da Bica, onde foram adquiridas quatro sondagens elétricas verticais e cinco tomografias elétricas. A fim de obter modelos mais condizentes com a complexa realidade geológica da borda da Bacia Potiguar, estes dados foram integrados entre si e, de forma conclusiva, um modelo geológico final em bloco diagrama foi criado para representar a superfície e a subsuperfície da região em estudo.

A área da pesquisa localiza-se na porção leste do estado do Ceará, próxima a divisa com o estado do Rio Grande do Norte, mais precisamente no município de Tabuleiro do Norte (Figura 1). Conforme pode ser destacado na figura, os trabalhos geofísicos de campo estão concentrados principalmente na estrada que liga a sede municipal de Tabuleiro do Norte passando pela localidade de Olho D'água da Bica (CE- 377), e seguindo acessos vicinais até a localidade de Lajedo de Sousa, por duas justificativas plausíveis: i) por ser geologicamente compreendida por uma região de transição/contacto entre os sedimentos da BP (Formações Assu e Jandaira) e os terrenos Pré-Cambrianos (Complexo Ceará (Grupo Jaguaretama) e Grupo Orós (Faixa Orós/Jaguaribe)); e ii) por fins de mobilidade e acesso dos equipamentos geofísicos utilizados em campo.

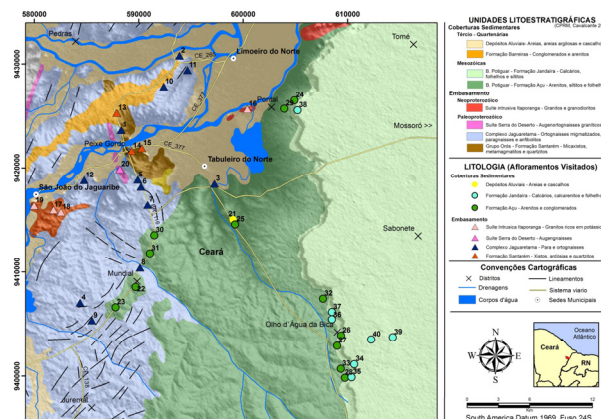


Figura 1: Localização da área de pesquisa e mapa Geológico Estrutural com base nos pontos visitados em

campo por sobre a cartografia geológica da CPRM (Cavalcante, 2003) e Modelo Digital do Terreno.

Contexto Geológico e Hidrogeológico Regional

Como principais representantes das unidades pré-cambrianas destacam-se as litologias do afloramento nas proximidades dos municípios de Limoeiro e São João do Jaguaribe onde foram observados paragneisses com forte bandamento composicional de biotita e quartzo + plagioclásio. Estas rochas encontram-se bastante fraturadas e preenchidas por quartzo recristalizado, e foram relacionadas ao Complexo Jaguaratama. Além destacam-se a sequência metassedimentar Formação Santarém com quartzitos; rochas xistosas e filitos. Destacam-se também paragneisses do Complexo Jaguaratama; corpos granitoides da Suíte Intrusiva Itaporanga; e Augengnaisses da Suíte Intrusiva Serra do Deserto.

Foi visto ao longo de uma estrada vicinal entre os Municípios de Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte, uma fácies da Suíte Itaporanga em um serrote circular com relevo destacado. A rocha encontrada pôde ser caracterizada como granítica, ausente de deformação e por vezes com presença de enclaves máficos. Além disso, outra fácies de alta concentração de potássio desta mesma unidade pôde ser reconhecida nas proximidades da sede municipal de São João do Jaguaribe.



Figura 2: Detalhes dos afloramentos visitados referentes às unidades pré-cambrianas. (A) Sequência metassedimentar Formação Santarém: (i) quartzitos; (ii) rochas xistosas; e (iii) filitos; (B) Paragneisses do Complexo Jaguaratama; (C e D) Corpos granitoides da Suíte Intrusiva Itaporanga; e (E) Augengnaisses da Suíte Intrusiva Serra do Deserto.

Com relação ao interior da BP, especificamente na região em estudo, afloram predominantemente arenitos e calcários pertencentes às Formações Açú e Jandaíra, respectivamente. Na escarpa da chapada, em um corte ao longo da estrada que liga os distritos de Olho D'Água da Bica e Lajedo do Sousa, os arenitos são avermelhados, ora apresentando níveis mais avermelhados e férricos, como observado na figura 3 e ripas de dissolução de calcário cortando as estratificações, provenientes de níveis mais acima. Importante destacar a presença de estratificações bem preservadas, preferencialmente plano-paralelas, e por vezes cruzadas tabulares ou acanalada (Figura 3).

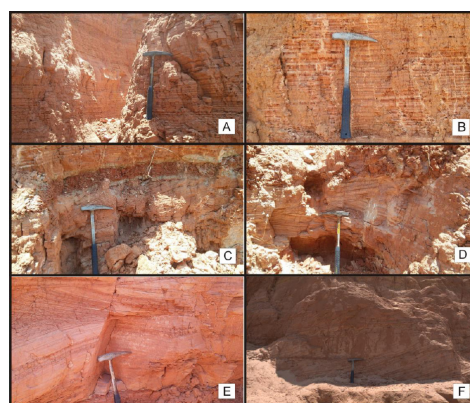


Figura 3: Figura 2.8. Diversas estruturas diferentes presentes nos arenitos da Formação Açú. Estratificação planoparalela (A e B); Dissoluções de calcário dentro do arenito (B); Estratificação cruzada tabular (D); Estratificação cruzada acanalada (E e F). Nível férrico bem definido (C).

Seguindo em direção ao topo observaram-se intercalações entre folhelhos e calcarenitos ausentes de estruturas, ambos já representando a Formação Jandaíra. Por fim, na chapada, já na localidade de Lajedo do Sousa, passa a predominar calcário maciço (Figura 4) e as ocorrências de calcarenito passam a ser subordinadas e mais escassas.

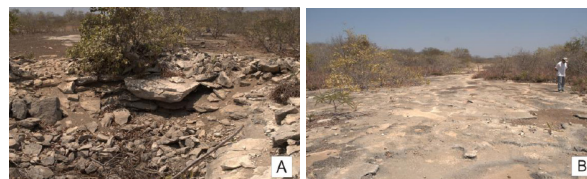


Figura 4: Detalhes de afloramentos de calcário na área de pesquisa.

Na base da coluna, representando a camada mais inferior da escarpa, e correlacionada a Formação Açú, está o arenito médio a grosso com estratificações plano paralela, cruzada tabular e cruzada acanalada. O calcarenito também estratificado aparece logo depois, representando uma mudança gradual da Formação Açú para a Formação Jandaíra, sendo as estratificações estruturas reliquiares da formação sotoposta. Intercalações entre folhelho e calcarenito começam a aparecer na parte superior da escarpa, já indicando um ambiente mais marinho, mas ainda com injeções de areia no sistema, o que pode indicar ambiente não tão profundo. No entanto, na porção mais superior, encontra-se calcário maciço, típico representante da Formação Jandaíra. Sua aparição representa a transição para um ambiente totalmente marinho de águas profundas.

Atualmente, no município de Tabuleiro do Norte, o cadastro do SIAGAS/CPRM conta com 134 registros de poços apresentando diferentes níveis de quantidade e qualidade de informações. Portanto, para a definição dos registros de poços a serem utilizados foi realizada uma

análise criteriosa dos relatórios disponíveis, levando em consideração principalmente: i) posição geográfica estratégica dos poços dentro da área de estudo e seu entorno próximo; ii) quantidade de informações disponíveis no relatório construtivo do poço, como exemplo o seu perfil geológico construtivo; e iii) a qualidade/consistência das informações disponíveis e seus níveis de detalhes e confiabilidade. A figura 5 mostra os poços selecionados para essa pesquisa dentre os mostrados acima.

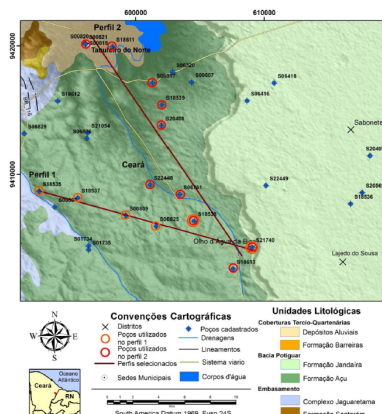


Figura 5: Mapa geológico com a localização dos poços selecionados a partir do cadastro do SIAGAS.

A partir desses dados de poços selecionados foram elaboradas seções onde pode ser observado e interpretado que o estrato sedimentar que corresponde a Formação Açú pôde ser dividido em dois fácies distintos: i) fácies superior composto essencialmente por sedimentos silto-argilosos intercalados com arenitos finos a médios, avermelhados. Nesse pacote ocorrem níveis bem consolidados com presença de argilitos acinzentados mais na base e níveis bem mais friáveis e intemperizados em direção ao topo; e ii) fácies inferior aparentemente de forma concordante, com os sedimentos aumentando a granulometria. Os argilitos e siltitos desaparecem e tornam-se praticamente inexistentes e os arenitos finos dão lugar a arenitos grossos, por vezes médios, mas predominantemente de coloração esbranquiçada.

Métodos Geofísicos e Resultados em Geral

Nessa pesquisa foram utilizadas duas técnicas geofísicas envolvendo os métodos elétricos. Uma foi a técnica da sondagem elétrica vertivas (SEV) e a outra a técnica da Tomografia Elétrica Multieletrodo (ERT), ambas bastante apresentadas e difundidas na literatura geofísica. Na figura 6 estão apresentadas a título ilustrativo os princípios básicos da duas técnicas. Merece destaque a técnica ERT pois trata-se de imageamento contínuo com grande número de informações de resistividades aparente e com processamento bem mais robusto.

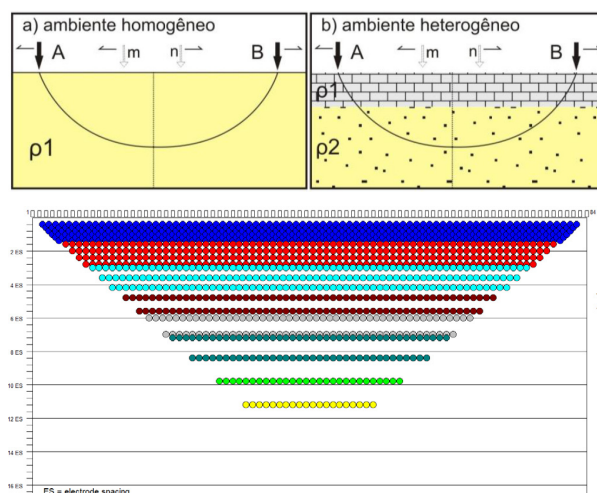


Figura 6: O princípio da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na parte superior e da Tomografia Elétrica (ERT) na parte inferior. Notar que existem cerca de 1200 medidas nessa configuração ERT.

Desta maneira, foram distribuídas de forma a atender os objetivos propostos e em função da disponibilidade de acessos e condições para a realização de tal (Figura 7) o seguinte: i) quatro (4) SEV's com arranjo Schlumberger com espaçamento médio de 2000 metros entre os eletrodos AB; e ii) cinco (5) ERT, com extensão média de 840 metros cada uma. de estudo. A distribuição dessas aquisições por sobre a geologia da área encontra-se na figura 7.



Figura 7: Mapa de localização das aquisições geofísicas (SEV's e ERT's) na base cartográfica geológica da CPRM (Cavalcante, 2003).

Após as etapas de planejamento e execução da coleta de dados geofísicos em campo, iniciou-se a rotina de organização e processamento de acordo com os manuais dos softwares utilizados e bibliografias clássicas (Loke,

2004; Gandolfo, 2007). Desta maneira, segue adiante os principais passos da rotina de processamento utilizada para as SEV's (softwares ATO e RESIST - 1D) e para as ERT's (plataforma EARTHIMAGER - 2D). Importante ressaltar que após alguns testes, a escolha destes softwares foi principalmente em função da precisão na inversão e representatividade com o contexto geológico na modelagem dos dados. Na figura 8 está apresentado um exemplo da rotina de processamento e interpretação para os dados das SEV's.

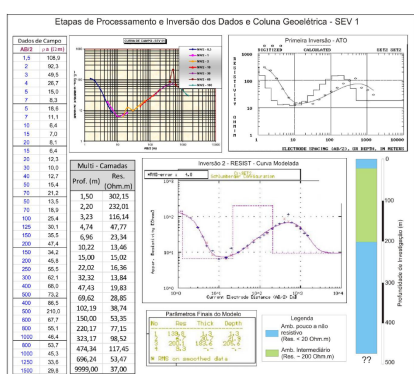


Figura 8: Rotina de processamento e interpretação adotada para as SEV's dessa pesquisa.

Por outro lado, a rotina para o processamento dos dados de ERT envolveu um investimento, em todos os sentidos, bem mais aprofundado. De um modo geral a figura 9 apresenta o resultado de uma das seções regionais de ERT com 840 metros de extensão longitudinal, onde os eletrodos foram espaçados de 10 metros entre si. Assim 84 eletrodos foram utilizados permitindo uma profundidade de investigação em torno dos 114 metros. Nessa figura todas as etapas do processamento podem ser visualizadas, inclusive importantes parâmetros da inversão como o RMS e a L2.

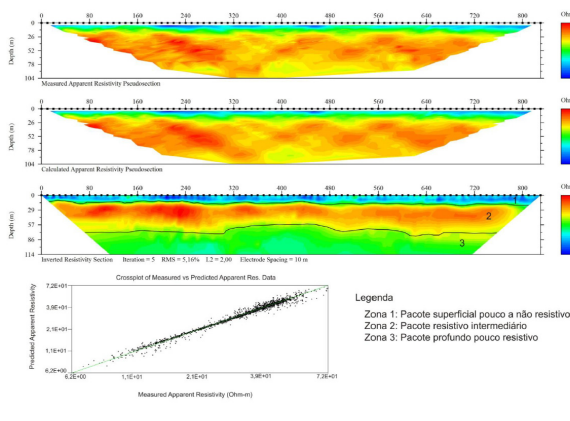


Figura 9: Rotina e resultado de processamento, inversão e interpretação adotada para as ERT's dessa pesquisa (ERT TAB2).

A seção TAB 2 (Figura 9), possui um padrão bem diferenciado das outras, com estratos geoeletricos quase horizontalizados. A presença de alguns spikes, e ruído no

dado bruto tornaram a inversão robusta a mais adequada, gerando um modelo final com RMS e L2 Norm de 5,16% e 2,00, respectivamente. O modelo final gerado para o perfil em questão possui aspecto bem horizontalizado, com três estratos geoeletricos facilmente diferenciáveis e pertinentes, ao longo de toda a seção. Mais superficialmente observa-se um horizonte 1, bem condutivo, que alcança até cerca de 15 metros de espessura. Mais embaixo há uma horizonte 2, resistivo em relação à anterior, mas com apenas cerca de 200 Ohm-m nas partes mais contrastantes, chegando até cerca de 80 metros de profundidade. Por fim, na parte mais profunda da seção, se visualiza um estrato geoeletrico condutivo que ultrapassa o limite de investigação do arranjo utilizado, e que não dá indícios de aumento na resistividade em profundidades maiores.

Uma outra seção muito interessante pelos resultados apresentados é a seção TAB 1 cujos resultados estão apresentados na figura 10.

Para a seção TAB1, após análise da qualidade do dado, o tipo de inversão utilizada foi a *smooth model*, que permitiu caracterizar os contornos e contatos dos ambientes geoeletricos sem mascarar anomalias presentes. Com as iterações realizadas o RMS e o L2 Norm final foi de 5,26% e 1,99, respectivamente. Em relação ao modelo final gerado para este perfil, cinco zonas geoeletricas contrastantes foram individualizadas (Figura 10). Primeiramente um horizonte 1, superficial e resistivo, na ordem de 800 Ohm-m, e restrita entre os eletrodos 17 e 40. Em seguida temos um horizonte 2, condutivo e pertinente ao longo de toda a seção, que atinge a superfície na maior parte do tempo e pode chegar até pouco menos de 30 metros de profundidade em sua parte mais espessa onde aparece um caimento, entre os eletrodos 32 e 40. A seguir entramos então em outro horizonte condutivo, mas de resistividade intermediária em relação aos outros (horizonte 5), e que atinge profundidades superiores ao que esse arranjo foi capaz de alcançar. Inseridos nesse horizonte 5 temos a ocorrência de duas faixas anômalas.

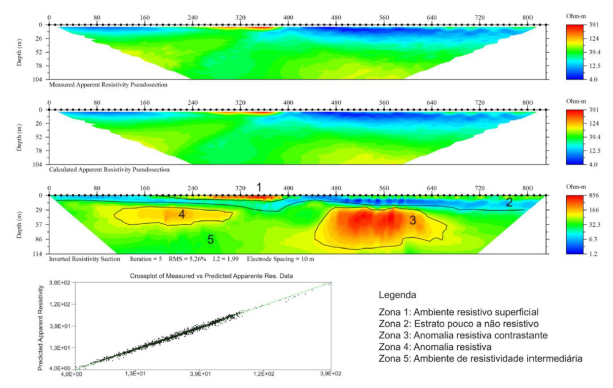


Figura 10: Rotina e resultado de processamento, inversão e interpretação adotada para as ERT's dessa pesquisa (ERT TAB1). Notar as anomalias resistivas bem marcadas e ovaladas.

Ainda, um horizonte 3 bastante resistivo, com um padrão ovalado, ocorrendo principalmente entre os eletrodos 42 e 62 tendo início com cerca de 30 metros de profundidade e um horizonte 4, um pouco menos resistivo, mas bem perceptível, com padrão alongado, ocorrendo na mesma profundidade, mas entre os eletrodos 8 e 32.

Na figura 11 está apresentado em uma visão de perspectiva o resultado das inversões para as duas seções ERT's ortogonais que identificaram duas anomalias resistivas com características bastante particulares.

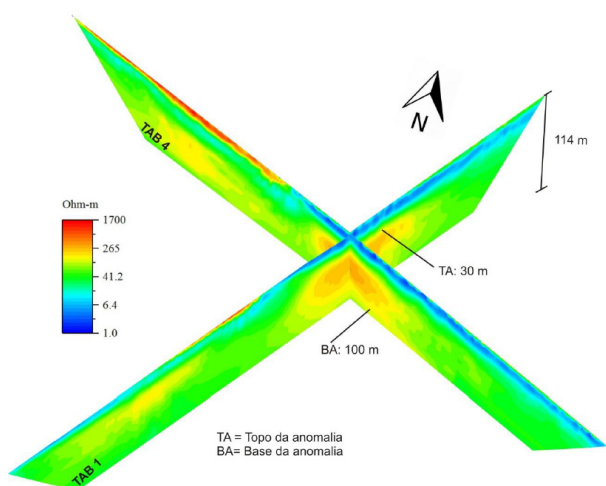


Figura 11: Resultado das inversões para duas seções ERT's ortogonais.

Na figura 12 pode ser observado um modelo geológico conceitual final que foi elaborado a partir do conjunto de dados coletados, processamento e interpretações levadas a efeito nessa pesquisa.

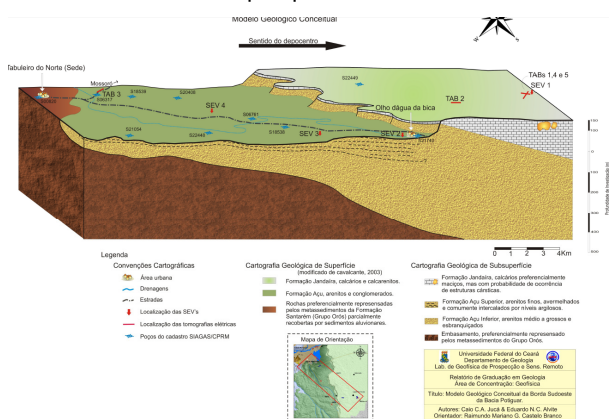


Figura 12: Modelo geológico final para a região pesquisada.

Conclusões

Como principais conclusões estão a geração de modelos a partir das interpretações conjuntas de dados aqui abordados. Primeiramente, foi possível distinguir as diferentes fácies da Formação Jandaíra, que em sua base é caracterizada por calcarenitos muitas vezes preservando estruturas semelhantes às da Formação Açú, e depois passa gradualmente para uma fácies com alternância entre folhelhos e calcarenitos, sendo estes últimos já mais calcíticos e menos arenosos que os sotopostos. Por fim, encontra-se o clássico calcário Jandaíra maciço, principal fácies desta formação. Com os dados de poços também foi possível distinguir duas diferentes fácies da Formação Açú, que nesta pesquisa foi dividida em Açú superior e inferior.

Os dados geoeletricos 1D das SEV's por se tratarem de uma investigação mais profunda (500 metros nas SEV's de menor abertura) forneceram importantes informações para se delimitar a profundidade do topo do embasamento, que variou de 100 a 470 metros, até desaparecer na SEV 1, que por sua vez teve profundidade de investigação de 750 metros e está localizado em cima da chapada, no ponto mais interior da bacia, ou seja, em direção ao depocentro o topo do embasamento passa de 100 metros para profundidades superiores a 750 metros em menos de 30 quilômetros. Outra informação importante extraída dos dados das SEV's é a delimitação do contato entre as Formações Jandaíra e Açú no topo da chapada (SEV 1), e consequente definição da espessura desta última, que no caso foi interpretado como uma interface a aproximadamente 200 metros de profundidade.

Já os dados 2D das ERT's por possuírem boa resolução lateral forneceram informações a respeito dos possíveis processos de carstificação na Formação Jandaíra. Foi possível a partir dos dados identificar e delimitar topo e base de duas anomalias resistivas, que nesta pesquisa foram interpretadas como possíveis cavernas oriundas dos processos de dissolução do calcário a partir da percolação de água por fraturas. Foram adquiridas duas tomografias elétricas, que se cruzaram quase que no centro, com o objetivo de melhor se investigar estas anomalias, e se possível, dimensioná-las, o que é, por sua vez, bastante impreciso, pois a depender dos parâmetros geofísicos e do tipo de inversão utilizados neste processo, a resposta resistiva das anomalias podem variar lateralmente e em profundidade. É importante frisar que estes dados 2D também foram suficientes para fornecer informações necessárias para se delimitar a espessura da Formação Açú e da Formação Jandaíra, bem como a profundidade dos seus contatos, que variaram seguindo o mesmo critério das SEV's, ou seja, quanto mais a leste ou perto do depocentro, maior a profundidade do contato. A partir das tomografias elétricas também tornou possível a criação de um modelo 3D para as anomalias, a partir de uma plataforma gráfica.

Agradecimentos

Ao Projeto GEOFMEL (Petrobras/Cenpes/FCPC/UFC/LGPSR), à Universidade Federal do Ceará e ao Laboratório de Geofísica da UFC. Aos profissionais que colaboraram em todas as etapas dessa pesquisa.

Referencias

AGI – Earthimager 2D. Software para processamento de dados de ERT 2G. AGI – Advanced Geosciences, Inc. EUA.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará em escala de 1:500.000. Formato digital shapefile (ESRI).

CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento de Águas Subterrâneas no Estado do Ceará. 1998. Diagnóstico do Município de Tabuleiro do Norte.

GANDOLFO, O. C. B. 2007. Um estudo do imageamento Geométrico na investigação rasa. 234p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

LOKE, M. H. 2002. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Electrical imaging surveys environmental and engineering studies. 136p.

RESIST - ZOHDY, A.A.R. & BILDORF, R. J. 1989. Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in Quick Basic. U.S. Geological Survey Open File Report 89-137-2, 64 p