

AQUÍFERO SERRA GRANDE: HIDROGEOLOGIA E MODELO TECTÔNICO - BORDA SUDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA - PI

Francisco Lages Correia Filho¹; Adson Brito Monteiro²; João Batista Freitas de Andrade³; Sérgio Luis Fontes⁴; Edilton Carneiro Feitosa⁵; Antônio Reinaldo Soares Filho⁶; Ney Gonzaga de Sousa⁷ & Maria Tereza Barradas⁸

Resumo – Apresentamos, aqui, parte dos resultados de estudos realizados na área do Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, situada na porção sudeste do Estado do Piauí, abrangendo a região semi-árida nos limites dos Estados do Piauí e Bahia, cobrindo uma superfície aproximada de 24.358 km², inserida no semi-árido brasileiro. Os métodos de trabalho basearam-se na fotointerpretação geológica, análise e interpretação digital e visual de imagens de satélite SRTM-Sombreada 90 e Mosaico Geocover, georreferenciadas com base no Datum WGS 84 e processamento com a utilização de software ArcGIS 9.2, cadastramento de pontos d'água, altimetria de poços selecionados, mapeamento geológico e hidrogeológico, levantamentos geofísicos, através de perfis transversais à borda da bacia, interpretação aerogeofísica (aeromagnetometria e aerogamaespectrometria) com a utilização do Método de Euler e perfuração de dois poços estratigráficos profundos para estudos e pesquisa direta. Os resultados dos estudos realizados, obtidos a partir da integração dos vários temas abordados, forneceram subsídios favoráveis à seleção de áreas para a captação subterrânea, com aumento substancial da oferta de água, para atender uma população da ordem de 175.503 habitantes (IBGE, População e Domicílio, CENSO 2000, Contagem da População, em 2007) da área investigada, composta por 24 municípios.

Abstract – We present here the studies carried out in the Project Edge southeast Parnaíba's Sedimentary Basin, located in the southeastern state of Piauí, covering semi-arid region within the limits of the State of Piauí and Bahia, covering an area of approximately 24358km², inserted in the Brazilian semi-arid region. The working methods were based on geological photo interpretation, analysis and digital and visual interpretation of SRTM90 shaded and Geocover mosaic's satellite

¹CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina/PI. Fone: (86)3222-4153. Fax: (86)3222-6651. E-mail: lages@te.cprm.gov.br; ²CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina/PI. Fone: (86)3222-4153. Fax: (86)3222-6651. E-mail: amonteiro@te.cprm.gov.br; ³CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Av. Pasteur, 404 – Urca – Rio de Janeiro/RJ. Fone: (21)2295-4097. Fax: (21)2295-4992. E-mail: jfreitas@rj.cprm.gov.br; ⁴Observatório Nacional. Rua General José Cristino, 77 – São Cristóvão – Rio de Janeiro/RJ. Fone: (21)2580-6087. Fax: (21)2580-6041. E-mail: sergio@on.br. ⁵CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Av. Profº Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária – Recife/PE. Telefax: (21)2126-8239. E-mail: edilton@yahoo.com.br. ⁶CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina/PI. Fone: (86)3222-4153. Fax: (86)3222-6651. E-mail: reinaldo@te.cprm.gov.br; ⁷CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina/PI. Fone: (86)3222-4153. Fax: (86)3222-6651. E-mail: ney@te.cprm.gov.br; ⁸CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina/PI. Fone: (86)3222-4153. Fax: (86)3222-6651. E-mail: terezbarradas@hotmail.com.

images, georeferenced based on WGS 84 and processing using ArcGIS 9.2 software, registration of water points, altimetry selected wells, geological and hydrogeological mapping, geophysical surveys, cross-sections through the edge of the basin, geophysical airborne interpretation (aeromagnetic and Airborne gamma ray) using the Euler method and the drilling of two deep wells for stratigraphic studies and research directly. The results of the studies obtained from the integration of different subject matters, provided input to the selection of favorable areas for groundwater abstraction, with substantial increase in the supply of water to serve a population around 175,503 inhabitants (IBGE Population and household, Census 2000, population counting, in 2007) the area surveyed, comprising 24 municipalities.

Palavra Chave – Serra Grande; Hidrogeologia; Modelo Tectônico

1 – INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar do Parnaíba, antes denominada de Bacia do Maranhão, está situada na região nordeste ocidental do território brasileiro, ocupando uma área de aproximadamente 600.000 km², abrangendo, parcialmente os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia. Trata-se de bacia intracratônica, posicionada entre as faixas de dobramentos que bordejam os Crátons do São Francisco, São Luís e Amazônico.

Está marcada, no sentido NE-SW, pelo Lineamento Transbrasiliano (Schobbenhaus, 1975), denominado por Góes et al., 1993, de “Zona de Falha Transbrasiliana” que impôs na borda sudeste da bacia feições estruturais de natureza “grabenforme”, muito importantes no armazenamento e captação de água subterrânea. Este potencial hídrico subterrâneo, até então ainda pouco conhecido do ponto de vista hidrogeológico, motivou o Serviço Geológico do Brasil-CPRM, através do Subprograma Bacias Sedimentares Interiores, a implantar o Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba.

Trata-se de um programa de pesquisa geológico-hidrogeológica de grande magnitude e complexidade, levado a efeito numa região tradicionalmente castigada pelos graves problemas de abastecimento d’água, cujos benefícios sociais gerados, a partir dos resultados alcançados pelos estudos realizados, revestem-se de fundamental importância, por se tratar de uma região semi-árida, secularmente castigada pela falta de água para consumo humano, com gravíssimos problemas de abastecimento, onde a maioria da população consome águas poluídas, gerando sérios problemas de saúde pública, manifestados pelas doenças parasitárias de veiculação hídrica, responsáveis pelos altos índices de mortalidade infantil e doenças parasitárias que incomodam com frequência os

adultos (Foto 01).



Foto 1. Ilustrando “barreiro poluído”, onde as pessoas disputam água para beber, tomar banho e cozinhar juntamente com os animais da região, gerando doenças parasitárias de veiculação hídrica, com graves problemas de saúde pública. Município de São Braz do Piauí (apud Correia Filho, 2009).

2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área do Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba situa-se no extremo sudeste do Estado do Piauí, abrangendo parte do estado do Bahia. Ocupa uma superfície de aproximadamente 24.358 km², delimitada por seis vértices (Figura 1).

O acesso à área, a partir de Teresina, capital do estado, se faz pelas BR-316/BR-343 até a cidade de Floriano. Daí, pela rodovia estadual, PI-140, pavimentada, até São Raimundo Nonato. De São Raimundo Nonato para Caracol, situada no extremo sudoeste do projeto, o acesso é feito pela PI-144, pavimentada, num percurso de 94 km. Para São João do Piauí, situada na porção nordeste, existem duas opções a partir de São Raimundo Nonato. A primeira, através da BR-020 (Brasília/Fortaleza), passando pela cidade de Coronel José Dias, margeando o Parque Nacional Serra da Capivara e a outra, mais distante, através das PI-140/141, pavimentadas.

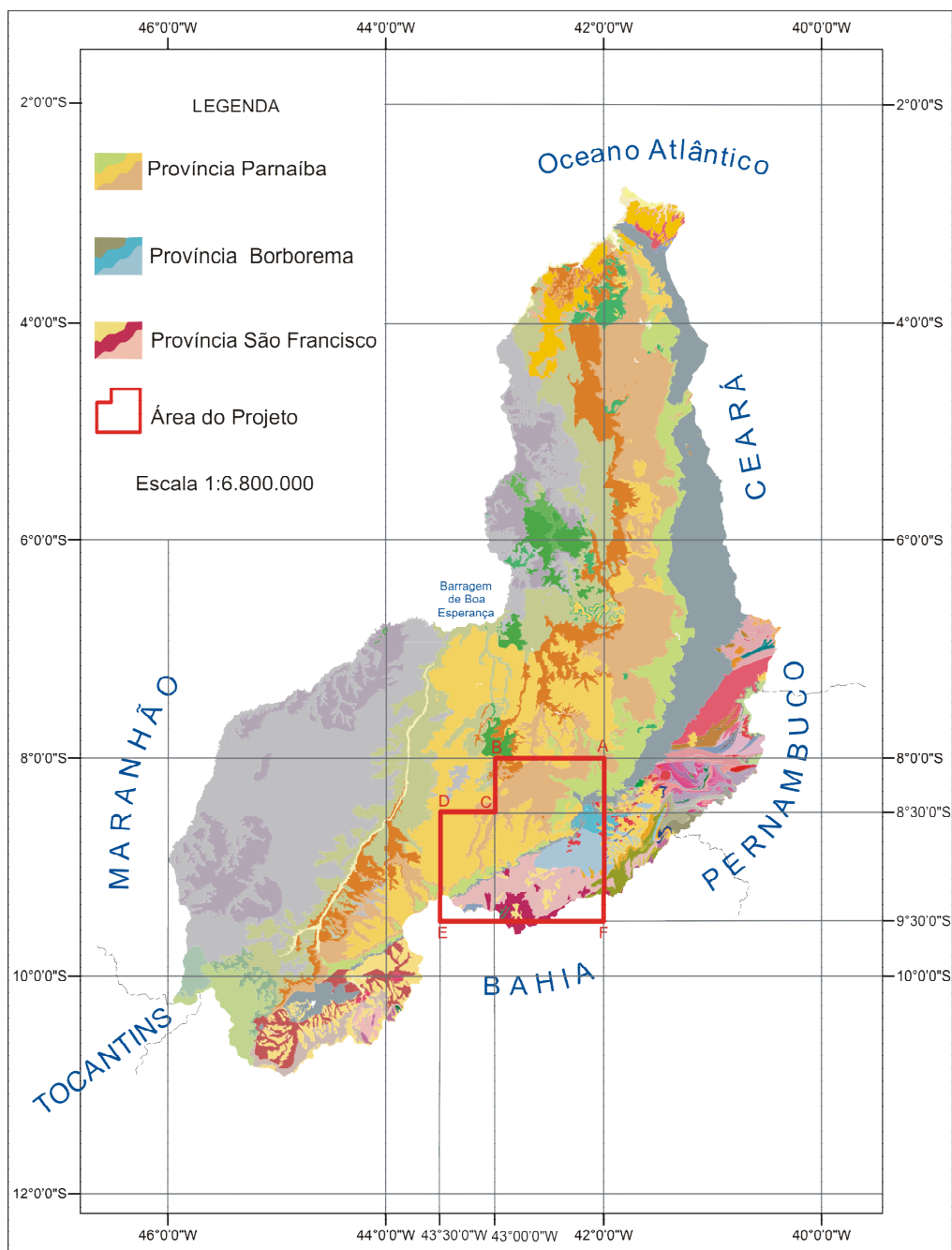


Figura 1. Mapa Geológico do Estado do Piauí, com a área de estudo e indicação das províncias geotectônicas (CPRM, 2006).

3 - METODOLOGIA

Primeiramente, foi feito o mapeamento geológico dos aquíferos e um estudo detalhado das estruturas lineares, utilizados como métodos de prospecção hidrogeológica na identificação e individualização das diversas unidades cartografadas. Procurou-se ressaltar aspectos da litologia regional e local, suas variações faciológicas, como indicadores qualitativos de porosidade e

permeabilidade. Além desses aspectos foram verificados os contatos entre as diferentes unidades e as possíveis estruturas de interesse hidrogeológico. Os lineamentos mereceram atenção especial, sobretudo aqueles com direção NE-SW, situados na borda da bacia, os quais se acreditam ser indicadores de estruturas profundas e de grande importância como armazenadoras de água subterrânea.

A geofísica foi utilizada como um importante instrumento de pesquisa indireta, sendo uma ferramenta complementar na investigação e definição de importantes estruturas na borda sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Para tanto, lançou-se mão do uso de diferentes métodos geofísicos, a fim de se aferir e otimizar os resultados na avaliação e definição dessas complexas estruturas. Assim, foram realizados, ao longo do desenvolvimento dos trabalhos, três estudos geofísicos com a utilização dos Métodos Magnetotélúrico (MT), Transiente Eletromagnético (TEM), Eletroresistividade, Aeromagnetometria e Aerogamaespectrometria. Os resultados comparativos foram satisfatórios e o aferimento dos métodos estabeleceu modelos tectônicos para a borda sudeste da bacia, resultando em investigações profundas, através de modelagens MT de subsuperfície e um Mapa Tectono-Estrutural, gerado com base nos dados aerogeofísicos, com apresentação de estruturas em “grabens” e “horst”, bem definidas.

4 - GEOLOGIA

A área de estudo está contextualizada no domínio de três grandes províncias estruturais do nordeste brasileiro (Almeida et al., 1977), conhecidas como: Província São Francisco, Província Borborema e Província Parnaíba.

Por ser um trabalho, cujo foco são as estruturas armazenadoras de águas subterrâneas da borda da bacia serão enfatizados os aspectos geológicos, somente referentes à Bacia Sedimentar do Parnaíba.

Góes e Feijó (1994) subdividiram a coluna sedimentar da bacia em cinco grupos, depositados do Siluriano ao Cretáceo, denominados do mais antigo para o mais jovem de grupo Serra Grande, grupo Canindé, Grupo Balsas, Grupo Mearim e as formações Grajaú, Codó, Itapecuru, Urucuaia e Areado que estão associadas a um único ciclo deposicional. Na área investigada foram identificados os grupos Serra Grande Indiviso (Ssg): arenitos esbranquiçados a amarronzados, finos a muito grosseiros, comumente conglomeráticos, caulínicos, grosseiramente acamadados, com camadas e espessos bancos de conglomerados e raros níveis de siltito ou argilito, na base; Grupo Canindé Canindé: formação Pimenteiras (D2p) – folhelhos e siltitos cinza-arroxeados a avermelhados, finamente laminados, micromicáceos, por vezes calcíferos, com alternância de arenitos cremes a amarronzados e avermelhados, duros e, normalmente laterizados; formação Cabeças (D2c) –

arenitos rosados, esbranquiçados e amarronzados, finos a médios, com freqüente estratificação cruzada, siltitos arroxeados, micáceos e presença de níveis conglomeráticos na porção média a inferior do pacote; formação Longá (D3C11) – folhelhos e siltitos cinza-escuros a arroxeados, finamente laminados, micromicáceos, com bancos de arenitos amarronzados a esbranquiçados, em sua porção média; formação Poti (C1po) – arenitos esbranquiçados a rosados, finos a médios, com intercalações de siltitos e folhelhos, além de conglomerado intraformacional, na base.

5 - HIDROGEOLOGIA

A evolução da Bacia Sedimentar do Parnaíba propiciou a deposição cíclica de seqüências arenosas e siltico-argilosas, resultando na formação de sistemas aquíferos que se desenvolveram do mais antigo para o mais recente, separados por espessas camadas semipermeáveis que se comportam como aquitardos. Dessa forma, esses processos deposicionais deram origem a três sistemas aquíferos principais, conhecidos regionalmente como Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, de idade paleozóica, entre os quais se intercalam os aquitardos Pimenteiras e Longá. O primeiro, de maior interesse para esse trabalho, conhecido como aquífero Serra Grande representa a seqüência basal da bacia, assentado diretamente sobre as rochas pré-cambrianas, cuja área de exposição e recarga se caracteriza por uma estreita faixa de direção NE-SW. Trata-se de unidade geológica predominantemente clástica, com espessuras anômalas e muito variáveis, tanto em sua faixa aflorante como em subsuperfície, em função de movimentações tectônicas que ocorreram durante sua sedimentação, especialmente na borda da bacia. No poço stratigráfico CC 220, com 953m de profundidade, perfurado pela CPRM, situado no Parque Nacional Serra da Capivara, a 10 km da borda da bacia, dentro da área do projeto, esta unidade apresenta no perfil litológico do poço 791m de espessura, sem atingir a interface com o embasamento cristalino. A alimentação desse aquífero é feita, através de infiltração direta de chuvas, principalmente em sua área de recarga. Deve ocorrer, também contribuição por filtração vertical procedente do aquífero Cabeças, via aquitardo Pimenteiras. Foram determinados os seguintes valores, como representativos do aquífero Serra Grande: Transmissividade – $T = 7,0.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; Condutividade Hidráulica – $K = 2,8.10^{-5} \text{ m/s}$; Coeficiente de Armazenamento – $S = 1.0.10^{-4}$ e a Porosidade Efetiva - $\eta_e = 3\%$. O aquífero Cabeças é a unidade hidrogeológica que ocupa a maior superfície aflorante na área sedimentar do projeto, com 6.425 km^2 , distribuindo-se por toda sua porção norte, extrapolando seus limites. Forma extensas coberturas arenosas, detrito-lateríticas que contribuem consideravelmente para a recarga do aquífero. Em condições de confinamento ocorre regionalmente entre o aquitardo Pimenteiras na base e o aquitardo Longá, no topo, onde ocupa no canto noroeste da área investigada reduzida superfície, já que é um aquífero predominantemente livre. Em sua faixa aflorante, apresenta

espessuras que variam entre 40 e 80 metros nas proximidades do contato com a formação Pimenteiras, chegando entre 100 e 150 metros em sua porção setentrional, nas imediações da zona de contato com a formação Longá. A recarga se dá, principalmente, por infiltração direta de água das chuvas e por parte das águas escoadas nos locais, onde o rio Piauí é influente, além de drenança vertical ascendente, via aquífero Pimenteiras, a partir do aquífero Serra Grande, cujas relações ainda não foram bem definidas e quantificadas. As águas do aquífero Cabeças são, via de regra, de excelente qualidade química e baixíssimo teor salino. Foram determinados os seguintes parâmetros como representativos desse aquífero: Transmissividade – $T = 6,39 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$; Condutividade Hidráulica – $K = 5,32 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$; Porosidade Efetiva - $\eta_e = 3\%$. O aquífero Poti tem restrita ocorrência na área do projeto e não oferece interesse hidrogeológico neste estudo.

6 - LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS

A geofísica é um importante instrumento de pesquisa indireta e foi utilizada, como ferramenta complementar, na investigação e definição de importantes estruturas armazenadoras de água subterrânea na borda sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Para tanto, lançou-se mão do uso de diferentes métodos geofísicos, a fim de se aferir e otimizar os resultados na avaliação e definição dessas complexas estruturas. Assim, foram empregados nos estudos realizados os Métodos Magnetotelúrico (MT), Transiente Eletromagnético (TEM), Eletroresistividade, Aeromagnetometria e Aerogamaespectrometria, a seguir comentados.

6.1 – Geofísica Terrestre

6.1.1 – Estudos Realizados pelo Observatório Nacional – ON/CNPq/CPRM

Paralelamente ao mapeamento geológico dos aquíferos foram executados estudos geofísicos, com o uso de recursos técnicos não convencionais, através da aplicação dos métodos Magnetotelúrico (MT) e Transiente Eletromagnético (TEM). Dessa forma, a CPRM em parceria com a equipe de geofísica do Observatório Nacional/CNPq e pesquisadores da Universidade de Leicester, Inglaterra, realizaram seis perfis transversais à borda da bacia, cujos resultados permitiram um mapeamento geoeletoestratigráfico das estruturas de subsuperfície, gerando seções de resistividade elétrica x profundidade que representam as propriedades elétricas das formações sedimentares e das rochas do embasamento da área investigada, cuja modelagem sugere a existência de estruturas “*grabenformes*” no substrato da bacia e, conseqüentemente o espessamento do pacote sedimentar de sua borda sudeste. A aquisição de dados, pelo Método MT, é feita

realizando-se medidas simultâneas dos campos elétrico e magnético em duas direções ortogonais, X e Y, em estações ao longo de cada perfil, sendo o campo magnético também medido na direção Z (vertical). O equipamento utilizado foi o sistema de aquisição de dados MT da EMI (Figura 2) que opera na faixa de frequência de 0,001 a 300Hz. Os dados são coletados na forma de séries temporais em uma das quatro bandas de frequência possíveis: TS1, TS2, TS3, ou TS4. Este método permite reconhecer contatos entre litologias com contrastes de resistividade elétrica e identificar estruturas geológicas como, por exemplo, falhas. O equipamento de tomada das medidas consiste de três bobinas, utilizadas para medir o campo magnético nas direções X e Y (horizontal) e Z (vertical), foto 2. Três eletrodos não polarizáveis de Cu-CuSO⁴ são colocados em contato com o solo, através de uma solução de sulfato de cobre, num arranjo em L que permite medir a diferença de potencial em duas direções (X e Y), dispondo o eletrodo central em posição comum às duas direções (Figura 2). O sinal medido passa por um condicionador de sinal de campo elétrico (EFSC), que é um filtro e pré-amplificador de dois canais. A Unidade de Aquisição e Processamento (APU) amplifica e filtra os sinais magnéticos e elétricos, medidos pelos sensores, faz a conversão dos sinais analógicos de entrada para sinais digitais e armazena as séries temporais no computador. A aquisição e processamento dos dados de medida são realizados em um computador “notebook”, onde são mostradas as séries temporais na tela, utilizando-se o “software” fornecido pela EMI (Foto 3).



Foto 2. Disposição das bobinas de indução, segundo direções ortogonais X e Y (norte magnético e leste), utilizadas para medir as variações temporais do campo geomagnético, no levantamento geofísico, com o Método Magnetotelúrico - MT (apud Correia Filho, 2009).



Foto 3. Notebook, com software, ligado aos equipamentos de campo, para fazer a modelagem dos dados obtidos e apresentá-los em forma de seções, conforme os valores apresentados pela resistividade elétrica x profundidade no levantamento magnetotelúrico (apud Correia Filho, 2009).

No Método Eletromagnético Transiente, diferentemente do Método MT, utiliza-se corrente elétrica gerada artificialmente, seja no domínio do tempo (Método Transiente Eletromagnético – TEM) ou no domínio da frequência (“Horizontal Loop Eletromagnetics”- HLEM). Neste trabalho, como ferramenta complementar do Método MT nos perfis da borda da Bacia Sedimentar do Parnaíba, usou-se apenas o Método TEM. Funciona, através de uma corrente elétrica, em forma de pulsos quadrados, intermitentes, aplicada sobre a superfície terrestre, onde a forma de decaimento, experimentado pela corrente elétrica, após esta ser desligada, depende da condutividade elétrica do meio, da forma e da dimensão de condutores, em subsuperfície. Na aquisição de dados com o Método TEM foi utilizado o SIROTEM-MK3 da GEOINSTRUMENTS. As medidas foram feitas, através de um arranjo do tipo “loop” quadrado de 20 ou 50m de lado, disposto sobre a superfície terrestre, onde correntes de até 5A, em forma de pulsos intermitentes, são aplicadas. Quando a corrente é desligada, num intervalo de tempo típico que dura entre 0,1 e 100 milissegundos, são realizadas medidas do decaimento desta corrente utilizando o mesmo “loop” transmissor como receptor (modo “loop coincidente”) ou medindo-se o campo magnético secundário associado, que é detectado por uma bobina de indução, normalmente instalada no centro do arranjo (modo “in loop”). É bom salientar que vários arranjos contíguos são realizados, de forma a se obter um perfil de medidas TEM. Os resultados podem ser apresentados na forma de curvas de decaimento do campo magnético, para diferentes tempos ou na forma de seções de resistividade elétrica, após simples transformação.

Foram executados um total de seis perfis transversais à borda da bacia, orientados na direção SE-NW, com comprimento variando de 14 a 44 km, somando um total de 176 km de extensão e espaçamento entre as estações indo de 0,36 a 7,7 km. Em função da limitação de espaços será apresentado, apenas o perfil geofísico MT da localidade Mocambo, com 35 km de extensão (Figuras 3 e 4).

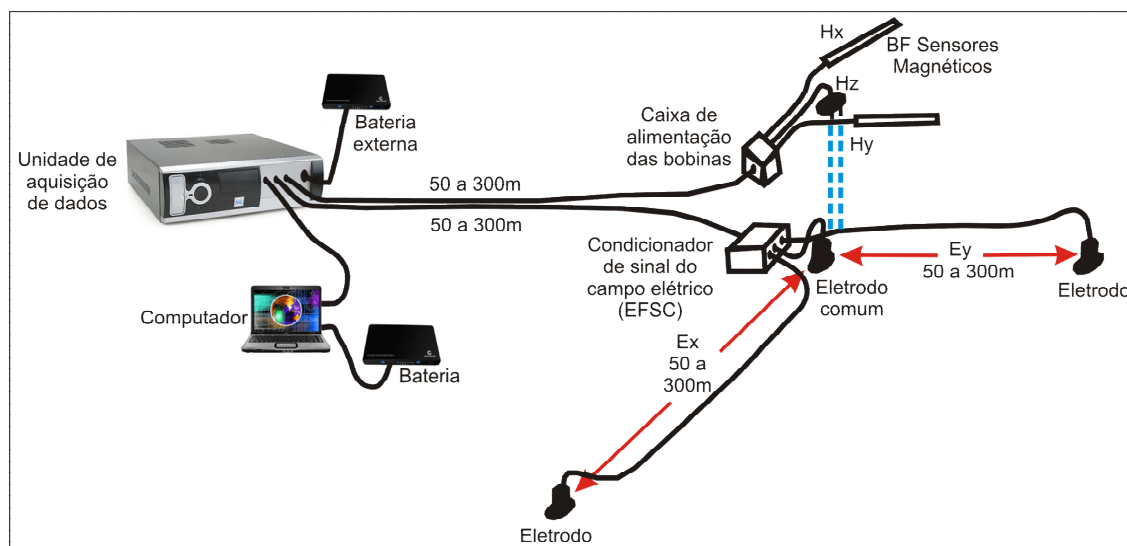


Figura 2. Sistema de operação na aquisição de dados pelo Método Magnetotelúrico – MT.
Modificado do Manual de Operações da EMI (apud Correia Filho, 2009).

6.1.1.1 – Perfil Geofísico MT da Localidade Mocambo (SE-NE)

Executou-se ao longo deste perfil, dezenove estações magnetotelúricas compreendendo cerca de 35 km de extensão, transversal à borda da bacia, passando pela localidade Mocambo (Figura 3). A análise e interpretação da seção de resistividade elétrica x profundidade, obtida através da inversão unidimensional dos dados MT, indica que na estação MC05 ocorre o contato, através de falha normal ou de gravidade, entre as rochas não aflorantes do embasamento arqueano-proterozóico (com resistividades acima de $200\Omega.m$) e as rochas sedimentares da bacia (com resistividades entre 15 e $150\Omega.m$). Resistividades menores do que $15\Omega.m$, verificadas neste perfil, correspondem às rochas também condutivas, pré-silurianas, não aflorantes, detectadas pelo método MT, que serviram de substrato para a sedimentação dos arenitos e arenitos conglomeráticos, atribuídos ao grupo Serra Grande.

Os resultados da interpretação dos dados evidenciam no perfil a existência de fossas tectônicas ou estruturas “*grabenformes*”, resultando em pequenas bacias de deposição que chegam a atingir profundidade de até 1.200m, como mostrada entre as estações MC14 e MC16. No primeiro desses depocentros, situado próximo ao contato com as rochas do embasamento, entre as estações

MC06 e MC09, foi locado o poço estratigráfico da localidade Mocambo, município de São Raimundo Nonato, com 700m de profundidade, sem alcançar o substrato, tendo o grupo Serra Grande, no perfil litológico da perfuração, 639m de espessura, indo do contato superior com a formação Pimenteiras até o final do furo (Figura 4). Os outros dois depocentros estão compreendidos, entre as estações MC09 e MC11 e, entre a MC14 e MC16, respectivamente. Nas bordas desses depocentros é possível ocorrer rochas cisalhadas, nas zonas de falhamentos. Observar a presença de sedimentos do grupo Serra Grande e formação Pimenteiras, sobre o embasamento arqueano-proterozóico, representado pelos granitóides sintectônicos, entre as estações MC03 e MC05 (Figura 4).

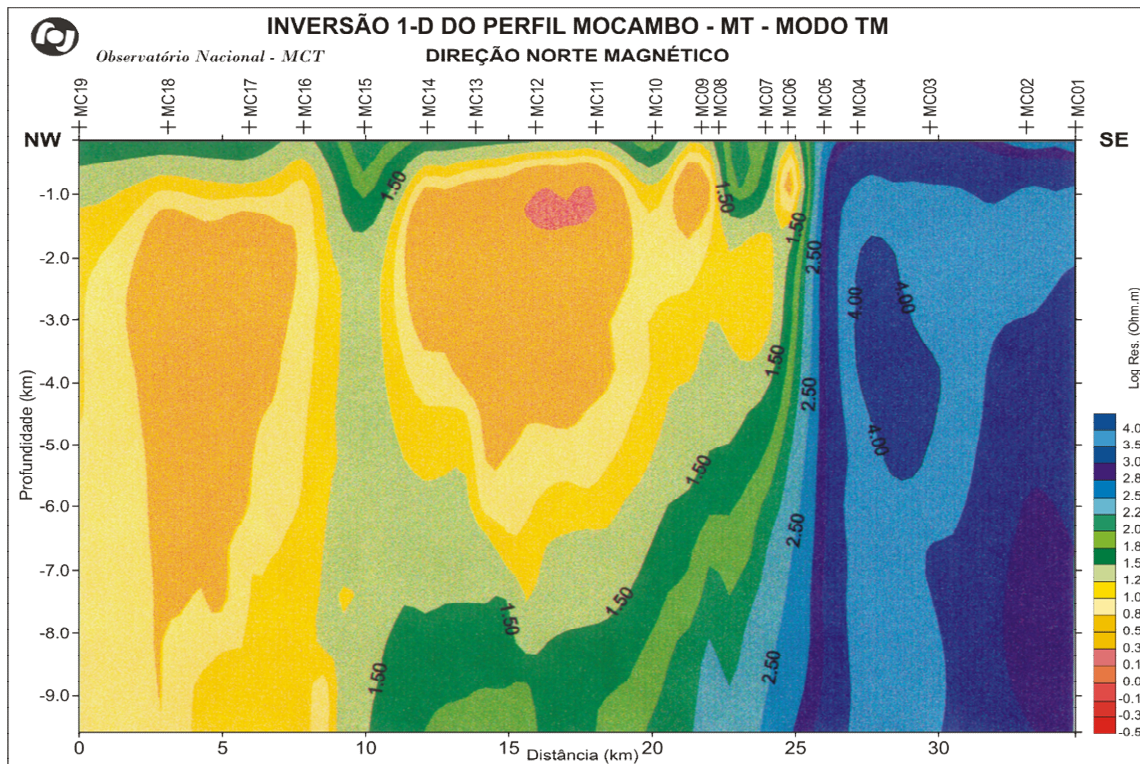


Figura 3. Modelagem da inversão 1-D do perfil MT da localidade Mocambo (apud Correia Filho, 2009).

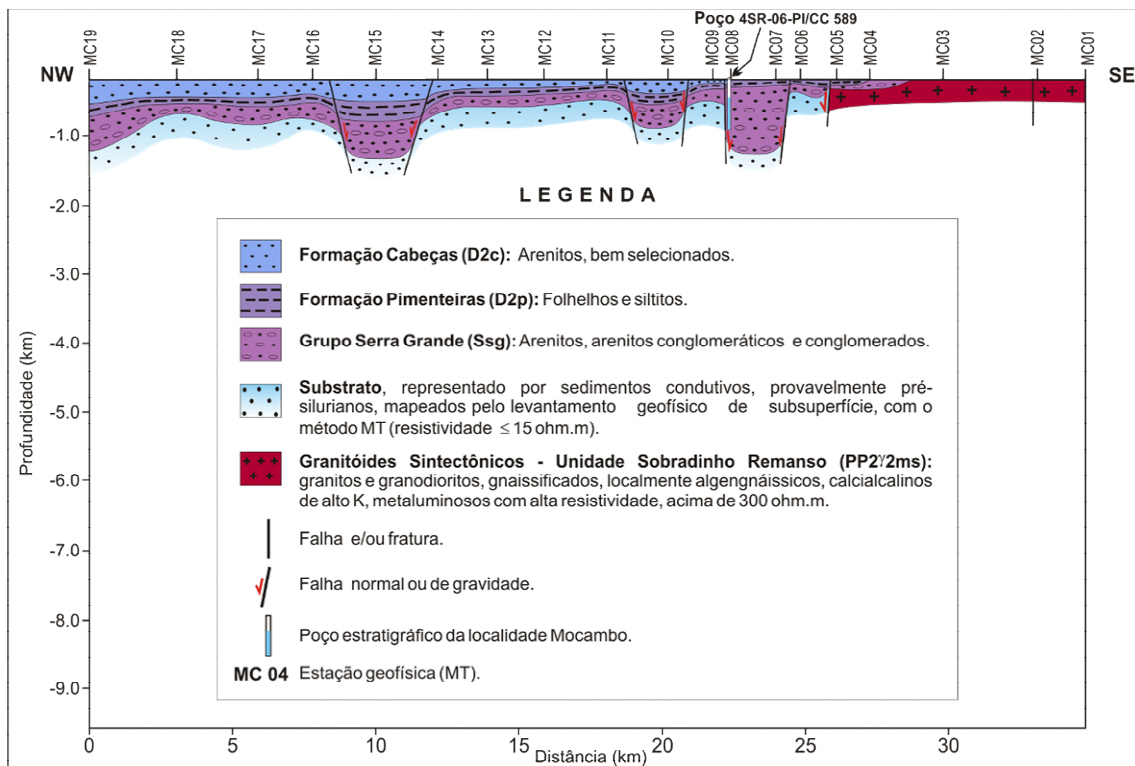


Figura 4. Perfil geológico, elaborado com base na interpretação da seção geofísica do Mocambo - Método MT, inversão 1-D (apud Correia Filho, 2009).

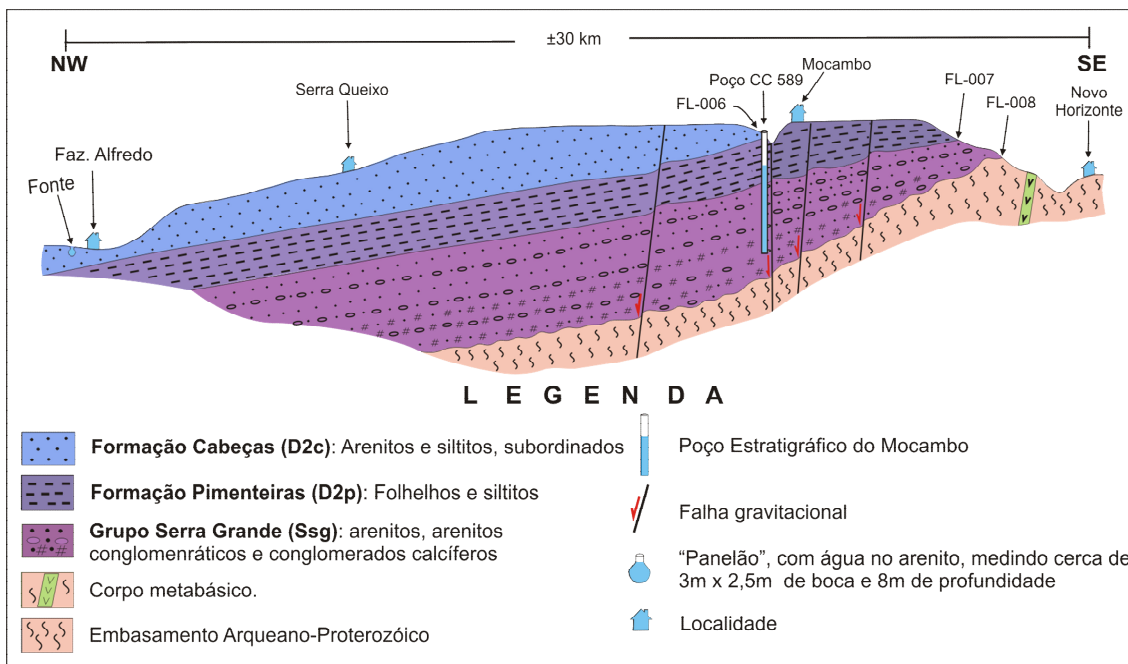


Figura 5. Perfil geológico, esquemático, ilustrando a litoestratigrafia e o espessamento do grupo Serra Grande na borda da bacia, com a localização do poço do Mocambo. Município de São Raimundo Nonato/PI (apud Correia Filho, 2009).

6.1.2 - Estudos Realizados pelo LABHID/UFPE/CPRM

Em 2001, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil contratou o Laboratório de Hidrogeologia da Universidade Federal de Pernambuco, LABHID/UFPE, para executar com o *Método de Eletroresistividade, um perfil lateral de resistividade*, com 35 km de extensão, ao longo da rodovia PI-140, partindo de São Raimundo Nonato em direção à cidade de Canto do Buriti e oito *sondagens elétricas verticais* (SEV's), com investigação pontual, sendo as SEV's de 1 a 7 de interesse deste trabalho, situadas dentro da área do Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Dessas, as SEV's 1, 3, 4 e 5 foram executadas no perfil ao longo da PI-140. A SEV2, como parâmetro, na locação do poço estratigráfico CC220, situado no Parque Nacional Serra da Capivara, com 953 m de profundidade, sem atingir o embasamento, onde só o grupo Serra Grande apresenta 791 m de espessura. As SEV's 6 e 7 foram usadas, também, como parâmetros na locação do poço estratigráfico na localidade Bate, município de São Braz do Piauí e a SEV8 está situada, fora dos limites da área de estudos. A aplicação dessa ferramenta, na área do projeto, teve a finalidade de se comparar com os resultados dos outros métodos geofísicos e propor um modelo de configuração estrutural da borda da bacia, além de avaliar as condições hidrogeológicas da região do Baixão do Bate, visando à perfuração de poços estratigráficos profundos de pesquisa geológico-hidrogeológica. Os dados obtidos desses estudos, relativos ao perfil de resistividade, foram processados e resultaram numa seção de resistividade aparente, cuja interpretação gerou um perfil geológico da borda da bacia, com estruturas em “grabens e “horsts”, à semelhança das conclusões obtidas, com a utilização de outros métodos geofísicos, aferidos (Figura 6).

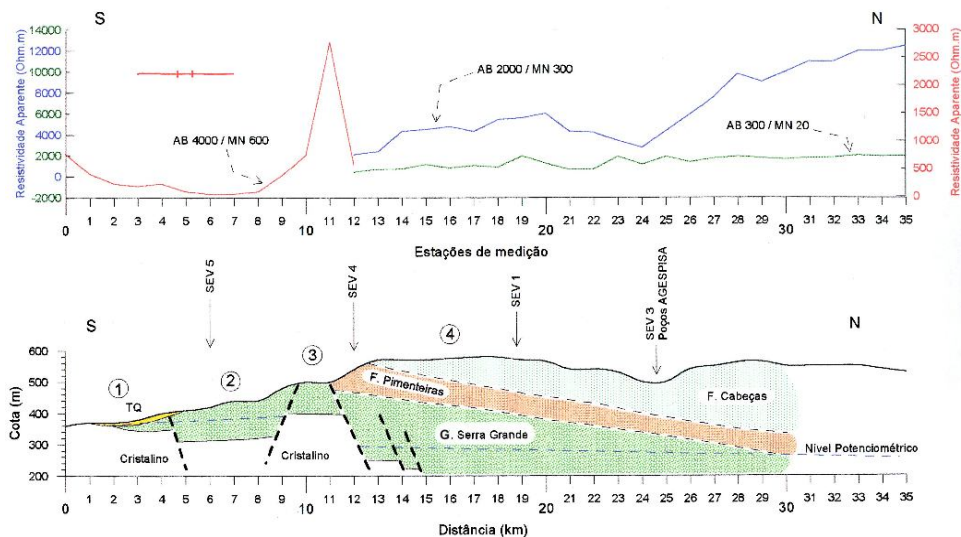


Figura 6. Perfis de resistividade e geológico de São Raimundo Nonato à Tamboril do Piauí, situado ao longo da PI-140 (Feitosa, 2001).

6.2 - Aerogeofísica

6.2.1 – Estudos Realizados pela DIGEOF/CPRM

Com o objetivo de aferir os resultados dos estudos dos diversos métodos geofísicos terrestres utilizados foram usados os dados do levantamento aeromagnetométrico (Campo Total) e aerogamaespectrométrico (Canais de Tório, Urânio, Potássio e Contagem Total), obtidos pelo Projeto Borda Sul da Bacia Sedimentar do Parnaíba (CPRM, 1978), executado pela PROSPEC S. A., através do Convênio DNPM/CPRM. Posteriormente, esses dados foram reprocessados pela CPRM, gerando o Mapa de Intensidade Magnética do Campo Total, reduzido o IGRF e o Mapa da Primeira Derivada Vertical.

A Divisão de Geofísica da CPRM – DIGEOF/CPRM/RJ, após análise, processamento e interpretação desses dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, produziu o Mapa Tectono-Estrutural da área do projeto, em escala 1:250.000, com o auxílio do Método de *EULER*, confirmando a presença de importantes estruturas armazenadoras de água subterrânea na borda sudeste da bacia, sendo mais uma ferramenta essencial na definição dos “grabens” e “horsts” da região investigada.

6.2.1.1 – Aeromagnetometria e Aerogamaespectrometria

A contribuição da aerogeofísica para o Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba possibilitou agregar informações que levaram à elaboração do Mapa Tectono-Estrutural, uma ferramenta indispensável na confirmação e definição das estruturas “*grabenformes*” e no planejamento das pesquisas hidrogeológicas.

Os estudos de interpretação da aerogeofísica consistiram na análise dos dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico, executado com linhas de vôo espaçadas a cada 2 km na direção N-S e linhas de controle espaçadas a cada 10 km na direção E-W, ambas em uma altura de vôo de aproximadamente 150 metros. As imagens dos *grids* (magnetométricos e gamaespectrométricos) foram geradas com malhas de 500 x 500 metros.

Os dados aeromagnetométricos apresentaram maiores resultados na identificação de elementos estruturais e os gamaespectrométricos nas delineações de diferenciações litológicas, aflorantes. Entretanto, a principal contribuição da geofísica revelou-se nos estudos magnetométricos, em face da possibilidade do método fornecer informações reveladoras, em subsuperfície, que colaboraram enormemente no conhecimento e definição das geoestruturas, principalmente na borda da bacia, foco das investigações.

6.2.1.1.1 – Aeromagnetometria

Os dados aeromagnetométricos, antes de serem interpretados, foram submetidos à etapa de reprocessamento visando melhorar a qualidade dos *grids* a serem gerados (Campo Magnético Total Residual, Primeira Derivada Vertical do Campo Magnético Total e Sinal Analítico do Campo Magnético Total). Nesta etapa procurou-se corrigir os desnivelamentos das linhas de vôos existentes nos *grids*. Para a correção dos desnivelamentos foi necessário à aplicação de um filtro direcional (cosseno direcional), obtendo-se, por um lado, bons resultados na interpretação qualitativa (visual), com uma melhor definição das feições planares e lineares, perdendo-se, por outro lado, na interpretação quantitativa, pois os sinais magnéticos sofrem alterações que diminuem a precisão nos estudos das profundidades e dimensões das fontes magnéticas (litologias).

6.2.1.1.2 – Aerogamaespectrometria

Os dados gamaespectrométricos foram submetidos ao mesmo processo de filtragem realizado nos dados magnetométricos, na geração das imagens dos *grids* dos canais dos elementos potássio, urânio, tório e do canal de contagem total. Nesse método, a filtragem foi imprescindível devido aos fortes desnivelamentos dos dados, sem a qual não seria possível realizar sua interpretação qualitativa.

6.2.1.1.3 – Interpretação dos Dados Aeromagnéticos e Aerogamaespectrométricos

Neste processo foi dada maior ênfase ao ambiente sedimentar que é objetivo do projeto. Os estudos de mapeamento de subsuperfície sugerem a existência de estruturas armazenadoras de água subterrânea na borda e no interior da bacia sedimentar, de relevante importância para as pesquisas hidrogeológicas e o abastecimento regional, considerando que se trata de uma porção do estado com grande carência de recursos hídricos de boa qualidade para consumo humano.

Para a realização desses estudos foi indispensável à interpretação magnetométrica, dividida em duas etapas. A primeira consistiu de uma interpretação qualitativa para a identificação das estruturas lineares, como falhas, diques, lineamentos (traços estruturais e foliação) e planares, tais como diferenciações litológicas nos terrenos do embasamento arqueano-proterozóico, soleiras básicas e outras, ambas a partir do contraste da susceptibilidade magnética entre as rochas e/ou entre minerais no interior dessas rochas. A segunda refere-se à interpretação quantitativa,

procurando definir estruturas em subsuperfície, no ambiente sedimentar da Bacia do Parnaíba, tais como “*grabens*” e “*horsts*”.

Para os estudos das geoestruturas subaflorantes foi utilizado o *Método Estatístico de Euler (Deconvolução de Euler)*, visando se obter contrastes no limite entre sedimentos e o embasamento cristalino. O método consiste em uma técnica automática de interpretação quantitativa, magnética, para estimar a posição horizontal e a profundidade da fonte geradora da anomalia. Durante o processamento dos dados adotou-se o índice estrutural 0 (zero) em uma janela de 5.000 metros, continuando com os dados para cima até uma altura de 300 metros do solo.

Na gamaespectrometria foi realizada a interpretação qualitativa dos *grids* de tório, urânio, potássio e do canal de contagem total, procurando-se delinear as principais feições planares e lineares, de acordo com os níveis de radiação gama.

6. 2.1.1.4 – Resultados Obtidos

Os produtos obtidos com os dados levantados pela (CPRM, 1978) mostraram que, mesmo sendo um projeto executado há trinta anos, com a utilização de recursos tecnológicos bem inferiores aos usados atualmente, contribuiu consideravelmente com a obtenção de informações valiosas para os resultados alcançados, sobretudo, no aumento substancial da oferta de água subterrânea de boa qualidade, para uma população tradicionalmente carente de abastecimento desse recurso.

Nas imagens dos *grids* dos mapas magnetométricos foram verificados os principais *trends* estruturais da área, sistemas de falhas, diques, intrusões básicas, limite aproximado entre o ambiente sedimentar e o embasamento arqueano-proterozóico, bem como dados sobre o arcabouço estrutural da bacia. O uso do *Método de Euler* possibilitou identificar o posicionamento, a definição e a direção de estruturas, sugerindo tratar-se de modelos do tipo “*graben*” e “*horst*”, como ilustra a figura 7. Obtiveram-se, também, através deste método, informações sobre a profundidade da interface sedimentos/embasamento, nos desníveis em degraus, em diversos pontos da bacia. Convém citar que as precisões das informações relacionadas aos cálculos de profundidades sofreram oscilações, devido ao tratamento realizado nos dados magnetométricos para corrigir uma grande quantidade de desnivelamentos, entre as linhas de vôo do levantamento aerogeofísico. Essas correções (filtragens), normalmente alteram os comprimentos de onda e as amplitudes dos sinais magnéticos, diminuindo, assim, a margem de precisão dessas informações quantitativas. É importante, também ressaltar que foi possível realizar estudos comparativos entre a perfuração de poços profundos (sondagens) existentes na região, com os resultados obtidos pelo aplicador *Euler*, que se mostraram bastante satisfatórios.

A gamaespectrometria contribuiu para os trabalhos de mapeamento geológico, através da integração das feições geofísicas com imagens de radar, satélite e os dados de campo. O *grid* do canal de urânio, por estar com muitos ruídos, não apresentou bons resultados. Os demais canais (K, Th e Contagem Total) mostraram-se satisfatórios, principalmente na individualização de rochas de composição granítica a granodiorítica de sedimentares, resultando em uma base geológica de natureza litoestrutural.

Os resultados do processamento e interpretação dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foram integrados, finalizando-se os trabalhos com a elaboração do Mapa Tectono-Estrutural que define e delimita blocos alçados e rebaixados, a partir de interpretação essencialmente qualitativa, focada na análise de feições planares e lineares (Figura 7). No tratamento desses dados foi utilizado o software Oasis Montaj, (versão 5.1.8), da empresa canadense de consultoria em geofísica, GEOSOFT.

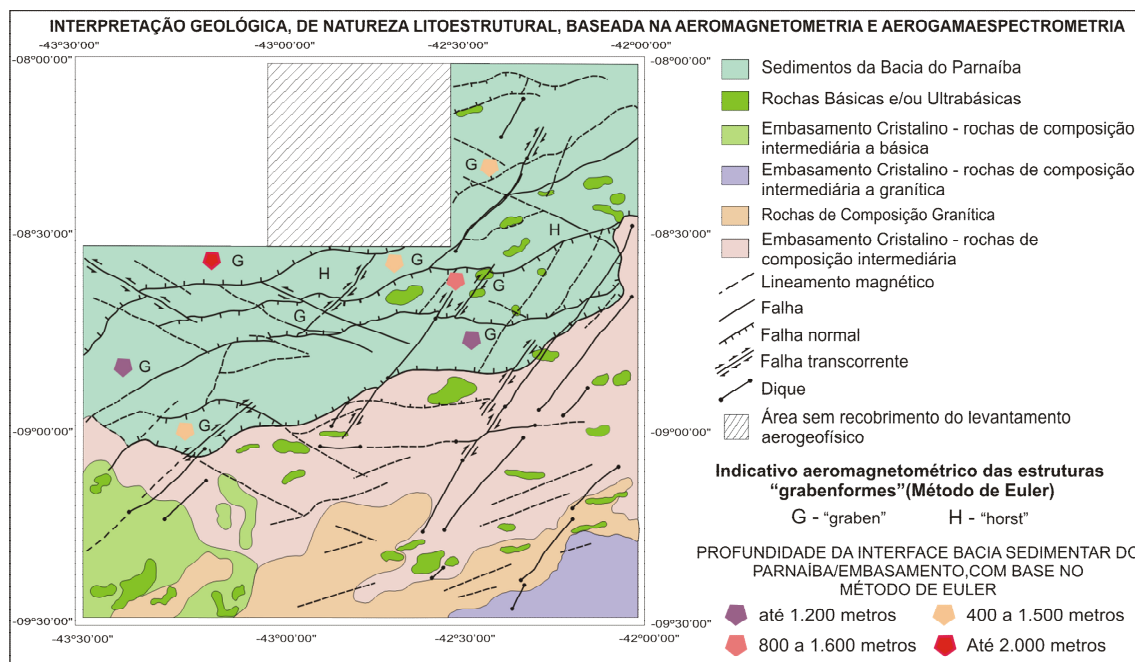


Figura 7. Mapa Tectono-Estrutural, elaborado com a utilização do Método de Euler (Andrade & Correia Filho, 2004).

O contraste dessas feições planares e lineares permitiu indicar a existência de amplas estruturas alongadas, com cerca de 160 km de extensão, variando de 20 a 40 km de largura, orientadas na direção NE-SW, reconhecidas como "grabens" e "horsts", concordantes com a orientação do Lineamento Transbrasiliano e com o Lineamento Magnético Sudeste do Piauí. Essas estruturas originaram-se de um complexo sistema de falhamentos normais e/ou gravitacionais e transcorrentes, alinhados tanto na direção NE-SW como NW-SE, possivelmente, relacionados ao rifteamento da bacia no início de sua sedimentação. Neste mapa ficou evidente que o contato da borda da bacia com as rochas cristalinas, em algumas regiões, como ao sul de São João do Piauí e

na porção sudoeste da área do projeto, não segue rigorosamente o limite estabelecido pelo mapeamento geológico. Isso, dificilmente ocorreria, pois o método magnetométrico, através dos mapas transformados da Primeira Derivada do Campo Magnético Total e Fase do Sinal Analítico do Campo Magnético Total, delineiam o contato geofísico, a partir de informações de superfície e de subsuperfície, diferentemente do gamaespectrométrico que só trabalha com informações de superfície. Dessa forma, na porção sudoeste da área investigada, desde as proximidades de São Braz do Piauí até Caracol o contraste geofísico do contato entre o embasamento e a cobertura sedimentar, obtido pelo método magnetométrico, avança sobre a Província Parnaíba em decorrência da pequena profundidade da interface embasamento/sedimentos (inferior a 200m). É bom lembrar que as rochas sedimentares da região não são magnéticas e, dessa forma, a feição do contato geofísico é a do embasamento sotoposto, já que o seu topo está a pouca profundidade e suas rochas contêm magnetita ao contrário do ambiente sedimentar, de “pouca espessura”, que não apresenta contraste na magnetometria, onde o método magnético não detecta os sedimentos.

É importante ressaltar que, normalmente os limites de bacias sedimentares são feitos com a utilização dos métodos gravimétrico e magnetométrico, pois os métodos radiométrico e gamaespectrométrico costumam apresentar problemas de dispersão dos minerais, acarretando erros de contato.

7 – CONCLUSÕES

- A definição de estruturas “grabenformes”, na área do projeto, armazenadoras de água subterrânea, amplia consideravelmente a oferta de água para consumo humano e animal na região semi-árida, entre os limites dos Estados do Piauí e Bahia, beneficiando, diretamente, cerca de 175.503 pessoas, em 24 sedes municipais e comunidades rurais.
- A modelagem e interpretação das seções dos perfis geofísicos, executados na borda da bacia, com o Método MT e a interpretação dos dados aeromagnetométricos com a utilização do Método de EULER, sugerem um amplo e complexo fenômeno de formação de “grabens” e “horsts” entrecruzados que, ocorrendo durante os processos de sedimentação geraram espessamentos da ordem de 1200m do grupo Serra Grande, próximo à borda da bacia, além de notáveis adelgaçamentos locais e regionais.
- A combinação dos estudos geológicos, tectono-estruturais e hidrogeológicos com os resultados geofísicos de subsuperfície revelaram um espessamento anômalo do pacote sedimentar, especialmente dos arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados do grupo Serra Grande, confirmado pela perfuração dos poços estratigráficos da localidade Mocambo e Parque Nacional

Serra da Capivara, situados cerca de 10 km a norte da borda da bacia, respectivamente com 700 e 953m de profundidades, dentro de estruturas “grabenformes”. De acordo com a interpretação dos resultados geofísicos se estima uma espessura superior a 1.000m nesses locais, para todo pacote sedimentar;

- A integração de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto mostrou ser muito eficiente no reconhecimento de estruturas geológicas regionais e outras de menor amplitude, mais específicas.

8 – RECOMENDAÇÕES

- A perfuração de poços tubulares profundos, na borda sudeste da bacia, nos limites da área do projeto, deve ser feita, após estudos criteriosos de locação, envolvendo geologia, estrutural, hidrogeologia e geofísica, executados por técnico habilitado e compatibilizados com as informações disponíveis neste relatório, em especial com uma análise criteriosa das seções geofísicas, *em função das variações locais significativas dos condicionantes geológicos e hidrogeológicos.*

- Evitar, com a interveniência do órgão gestor de recursos hídricos do estado, a perfuração de poços tubulares na área de recarga do aquífero Serra Grande, em toda borda da bacia.

- Perfurar, na zona de confinamento do aquífero Serra Grande, próximo à borda da bacia, na área de abatimento de blocos, com estruturas tipo “graben”, somente poços totalmente penetrantes neste aquífero, acompanhados de seus respectivos piezômetros, a fim de se poder avaliar à sua plena potencialidade hídrica, suas características hidrodinâmicas e sua litoestratigrafia, em seus diferentes ambientes de sedimentação e possibilitar o seu monitoramento;

- É importante executar um levantamento gravimétrico, para um melhor esclarecimento das estruturas “grabenformes” e, posteriormente, se utilizar o método de eletrorestividade para alvos selecionados.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. De; HASUI, Y.; NEVES, B. B. de B. & FUCK, R. A. 1977. **Províncias Estruturais Brasileiras**. Atas do Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande - PB. p363-391.

ANDRADE, J. B. F. e CORREIA FILHO, F. L., 2004. **Aplicação da Aerogeofísica em Estudos para Água Subterrânea no Sul do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (Relatório Interno)

CORREIA FILHO, F. L., 2009. **Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba**: relatório final. Teresina: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 153p.; 2v. (No prelo).

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL., 2006. **Mapa Geológico do Estado do Piauí**. 2ª versão. Teresina: CPRM/RETE. Escala 1:1.000.000. 1 CD-ROM.

_____, 1978. **Projeto Borda Sul da Bacia do Parnaíba**: levantamento aerogamaespectométrico e aeromagnetométrico, Estados do Piauí e Bahia: Relatório Final. Rio de Janeiro.

Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/universo.php?tipo=31o/tabela13_1.shtm&uf=22> Acesso em: 07/dez./2008.

FEITOSA, E. C., 2001. **Aplicabilidade do Método Geofísico de Eletroresistividade na Caracterização Tectono-Estrutural da Borda Sudeste da Bacia do Parnaíba**: região de São Raimundo Nonato – PI. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (Relatório Interno)

GÓES, A.M., FEIJÓ, F.J., 1994. **Bacia do Parnaíba**. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro, 8(1):57-67.

GOÉS, A. M. de O., Travassos, W. A. S. e Nunes, K. C., 1993. **Projeto Parnaíba**: reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias. Belém: [s.n.].

SCHOBENHAUS FILHO, C., 1975. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**: folha Goiás (SD-22). Brasília: DNPM. 114 p.