



**CARACTERIZAÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO-  
ESTRUTURAL DA SINCLINAL DE TORRES ATRAVÉS  
DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO (MT)**

Porto Alegre, 2016

**DANIEL AULER**

**CARACTERIZAÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA  
SINCLINAL DE TORRES ATRAVÉS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO (MT)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadora:** Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim

Porto Alegre, 2016

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitora:** Jane Fraga Tutikian

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Auler, Daniel

Caracterização do arcabouço geológico-estrutural da Sinclinal de Torres através do método Magnetotelúrico (MT) . / Daniel Auler. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.  
[58 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Silvia Beatriz Alves Rolim

1. Sinclinal de Torres 2. Bacia do Paraná 3. Magnetotelúrico 4. Serra Geral I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/2310

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**CARACTERIZAÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA SINCLINAL DE TORRES ATRAVÉS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO.**”, elaborado por “DANIEL AULER”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Dr. Jair Weschenfelder

---

Dr. Léo Afrâneo Hartmann

---

Dra. Maria Luiza C. da Rosa

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, que sempre me serviu como base moral, material e afetiva. Pela humildade e responsabilidade ensinada pelo meu pai, e pela consideração aos outros e generosidade ensinada pela minha mãe. À minha irmã, agradeço a oportunidade de dividir minhas experiências e aprender que as brigas de irmãos são passageiras, mas o elo é pra vida toda.

Também agradeço à UFRGS e ao Cnpq, que me deram estas oportunidades e viabilizaram essa caminhada estudantil. Mas principalmente, à minha orientadora Dra. Silvia Rolim que tantas oportunidades me ofereceu e tanta paciência demonstrou pelo meu jeito “diferente” e um pouco despreocupado de trabalhar. Também de suma importância é minha amiga carioca, Dra. Patrícia de Lugão, que através da sua empresa, a Stratalmage, viabilizou o projeto Paraná-Sul, o qual tive a honra de participar e usar os dados para este trabalho.

Entre colegas de projeto, agradeço especialmente ao Dr. Ruy Philipp, por sempre ser tão bem-humorado, descontraído e disposto a responder qualquer dúvida que eu tivesse sobre o assunto, e ao Leônidas Malta que além de tornar os dias de mapeamento muito mais leves, me ofereceu ajuda incessante no decorrer deste trabalho.

Por último, agradeço aos grandes filósofos e mestres espirituais, principalmente à Siddharta Gautama, Lao-Tsé e Yeshua, que me ensinaram que quando não nutrimos o espírito, o peso da vida mundana e material se torna um fardo desgastante e sem propósito, além de ensinarem o respeito e a compaixão a todos seres que são filhos deste imenso Universo.

**“Se quiseres acordar toda a humanidade, então acorda-te a ti mesmo, se quiseres eliminar o sofrimento no mundo, então elimina a escuridão e negativismo em ti próprio. Na verdade, a maior dádiva que podes dar ao mundo é aquela da tua própria autotransformação.” Lao-Tsé**

## RESUMO

O uso do método geofísico Magneto-Telúrico (MT) é relativamente recente no Brasil, porém está ganhando credibilidade e seu uso tem-se intensificado nos últimos anos. Ele é capaz de adquirir dados de resistividade das rochas em profundidades de até 20km sem perder a resolução, pois opera a partir dos campos eletromagnéticos existentes ao redor do planeta, trabalhando com frequências que variam entre 1 e 0,0001 Hz. Este método é especialmente eficaz na aquisição de dados em regiões com coberturas vulcânicas, onde o método sísmico encontra resistência devido a grande velocidade de reflexão sísmica que estas rochas fornecem. Este é o caso da Sinclinal de Torres, uma região localizada no Sul do Brasil na região Sudeste da Bacia do Paraná, sendo coberta por derrames vulcânicos do magmatismo Paraná-Etendeka, composta predominantemente por derrames basálticos e riolíticos, do tipo *pahoehoe* e *rubly* sobrepostos à Formação Botucatu, que por sua vez está sobreposta à espesso pacote sedimentar de idade Paleozóica. Neste trabalho foi realizado um levantamento através do método MT com três transectas sobre o estado do Rio Grande do Sul, totalizando 172 estações divididas em dois perfis de direção SW-NE e um perfil de direção SE-NW. Através do modelamento 2D e 3D dos resultados obtidos foi possível caracterizar a geologia estrutural da Sinclinal de Torres e do Arco de Rio Grande, além de delimitar as litofácies relacionadas à Sinclinal, da Bacia do Paraná e da região do embasamento cristalino. As interpretações dos perfis foram auxiliadas por dados de testemunhos de sondagem, mapas da geologia regional, de anomalia Bouguer e de fluxo geotérmico. Concluindo que a profundidade do embasamento pode chegar a 5300m na calha principal da Sinclinal, e que a orientação da mesma é de azimute 315°. Esses dados corroboraram a eficácia do método MT na Bacia do Paraná neste caso, e como consequência demonstrando que em determinados casos o método MT pode ser utilizado em substituição à sísmica, além de fornecer dados inéditos sobre a Sinclinal de Torres e a Bacia do Paraná.

**Palavras-Chave:** Magneto-Telúrico (MT), Sinclinal de Torres, Bacia do Paraná.

## ABSTRACT

The use of the magnetotelluric method (MT) is relatively recent in Brazil, however, it is gaining credibility and its usage has been intensified in the latest years. It is capable to acquire data of the rock resistivity beyond 20km deep without losing its resolution, because it operates through electromagnetic fields that exist around the Earth, working with frequencies between 1 and 0,0001 Hz. This method is especially effective on areas covered with volcanic flows, wherein the seismic method encounters great resistance caused by this type of rock, due to its great velocity of seismic reflection. This is the case of the Torres' Syncline, an area located in Southern Brazil in the Southeastern part of the Paraná Basin, covered by the Paraná-Etendeka magmatic event, composed mainly by basaltic flows and rhyolitic extrusion of pahohoe and rubbly type, superimposed to Botucatu formation, that is superimposed to a thick sedimentary deposition of Paleozoic age. On this work a geophysical surveying was done using the MT method with three transects on the Rio Grande do Sul state, totalizing 172 acquisition stations divided in two profile with SW-NE orientation and one profile with SE-NW orientation. Through 2D and 3D modeling of the obtained results, it was possible to characterize the structural geology of the Torres' Syncline, Rio Grande Arc and furthermore to delimit the lithofacies of the Syncline, the Paraná Basin and the region of crystalline basement. The interpretations of the profiles were done with comparisons with data of drill holes, maps of the regional geology, Bouguer anomaly and geothermal flow. Concluding that the basement depth reaches 5300m in the main channel of the Syncline, and that its orientation has an azimuth of 315°. This data corroborated the efficiency of the MT method in the Paraná Basin on this case, and as consequence proving that in some cases the MT method can be utilized as a substitute of seismic, furthermore providing unprecedented data about the Torres' Syncline and the Paraná Basin.

**Keywords:** Magnetotelluric (MT), Torres's Syncline, Paraná Basin.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Mapa geológico da Bacia do Paraná, com foco na Sinclinal de Torres (Renner, 2010). Página 11.

**Figura 2.** Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná (Modificado de Milani et al. 1997). Página 13.

**Figura 3.** Localização da Bacia do Paraná de forma simplificada, contendo as sequências e a profundidade do embasamento (Milani et al. 1997). Página 14.

**Figura 4.** Localização e contexto geológico regional da área em estudo, com os principais segmentos estruturais definidos por Zalan et al. (1990). Página 15.

**Figura 5.** Seção geológica de Encruzilhada do Sul (RS) até Curitiba (PR), mostrando a conexão entre o Arco de Rio Grande e o Arco de Ponta Grossa, com a posição da Sinclinal de Torres entre eles (Modificado de Soares et al. 2012). Página 16.

**Figura 6.** Fontes de energias eletromagnéticas. As tempestades solares fornecem ondas energéticas com frequências menores a 1 Hz, enquanto as tempestades causam distúrbios elétricos acima de 1 Hz. Página 21.

**Figura 7.** Resistividade elétrica em materiais da Terra. Modifica de Palacky (1987), obtida de Santos (2012). Página 24.

**Figura 8.** Imagem do equipamento de aquisição de dados magnetotelúricos. Em detalhe: unidade central MTU-5A. Página 25.

**Figura 9.** Arranjo usual de campo MT (Lugão et al. 2014). Página 25.

**Figura 10.** Montagem do equipamento. A, B – Alinhamento e nivelamento das bobinas (sensores magnéticos). C – Preparação de uma solução com água e sal para colocar o eletrodo. D – Disposição esquemática do eletrodo em sub-superfície. Página 26.

**Figura 11.** Localização dos três perfis em vista aérea do estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Google earth, acessado no dia 24/11/2016 às 20h e 35min. Página 28.

**Figura 12.** Mapa geológico simplificado do RS com a localização das seções de levantamento e respectivas estações geofísicas e testemunhos de sondagem próximos aos perfis. Página 29.

**Figura 13a.** Comportamento de um sinal onde ocorreu grande ruído. Página 31.

- Figura 13b.** O mesmo sinal com a correção dos ruídos (Lugão et al. 2014). Página 31.
- Figura 14.** Grid de interpolação padrão da Phoenix. A: união de células com mesmo valor de resistividade. B: encaixe da seção no grid de interpolação. Página 32.
- Figura 15a.** Exemplo de uma porção do perfil PS-I não suavizado. Página 32.
- Figura 15b.** Exemplo da mesma porção do perfil PS-I, porém suavizado. Página 33.
- Figura 16.** Modelamento 2D do perfil PS-III, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade. Página 34.
- Figura 17.** Perfil PS-III com a interpretação litológica e testemunho de sondagem. Página 36.
- Figura 18.** Modelamento 2D do Perfil PS-II, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade. Página 37.
- Figura 19.** Perfil PS-II com a interpretação litológica e testemunhos de sondagem. Página 39.
- Figura 20.** Modelamento 2D do Perfil PS-I, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade. Página 40.
- Figura 21.** Modelamento 2D do Perfil PS-I, com interpretação litológica. Página 42.
- Figura 22.** Modelamento 2D do perfil PS-I delimitação litológica e sistemas de falhas (em preto) e com a geometria do Arco de Rio Grande e a Sinclinal de Torres (em branco). Página 43.
- Figura 23.** Modelamento 3D do PSI, PSII e PSIII no Geosoft. Cores frias representam alta resistividade e cores quentes representam baixa resistividade. Página 44.
- Figura 24.** Modelamento 2D do perfil PS-I, com iso-superfície 3D da resistividade correspondente ao limite entre a porção sedimentar e o embasamento (superfície ondulada de cor verde) focando a porção norte, onde é possível ver a calha principal da Sinclinal de Torres marcada pela iso-superfície. Página 44.
- Figura 25.** Mapa de anomalia Bouguer da região Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil, com destaque para a Sinclinal de Torres traçada em preto. (Modificado de Ussami et al., 2013). Página 46.
- Figura 26.** Mapa do fluxo na região Sul e Sudeste do Brasil, com destaque para a Sinclinal de Torres traçada em preto (modificado de Hamza, 2010). Página 47.
- Figura 27.** A Sinclinal de Torres com uma orientação discretamente diferente da usual, com um azimute aproximadamente de  $295^{\circ}$  (Modificado de Waichel et al; 2011). Página 48.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT - Áudio-Magnetotelúrico  
B - Componente magnética  
E - Sinal elétrico  
EDI - *Electronic Data Interchange*  
EM - Eletromagnético  
Ex - sinal elétrico em x (orientação E-W)  
Ey - sinal elétrico em y (orientação N-S)  
GDS – *Geomagnetic Deep Sounding*  
H - Sinal magnético  
Hx - sinal magnético em x (orientação E-W)  
Hy - sinal Magnético em y (orientação N-S)  
Hz - sinal magnético em z (orientação perpendicular a superfície da Terra)  
MT – Magnetotelúrico  
MQ – Mínimos Quadrados  
N – Norte Geográfico  
PS-I – Paraná Sul I  
PS-II – Paraná Sul II  
PS-III – Paraná Sul III  
RR - Referência Remota  
SFSFA - sistema de falhas São Francisco de Assis.  
SFP - sistema de falhas Piratini.  
SFJM - sistema de falhas Jaguari – Mata.  
SFES - sistema de falhas Encruzilhada do Sul.  
SFJ - sistema de falhas Jacuí.  
SFSAC - sistema de falhas Santo Ângelo – Canoas.  
SFLE - sistema de falhas Lajeado – Estreito.  
SFNCC - sistema de falhas Não Me Toque – Capão da Canoa.  
SFTPAS - sistema de falhas Três Passos – Arroio do Sal.  
SFTP - sistema de falhas Torres-Posadas.  
SFGJ - sistema de falhas Gaurama – Jaquirana.  
TE - Transverso Elétrico

TM - Transverso Magnético

TRF - Transformada Rápida de Fourier

TRS – Transecta – Seção perpendicular ao eixo do Rife

TS - *Time Series*

UTC – *Universal Time Coordinated.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 Introdução.....	9
1.2 Hipótese .....	10
1.3 Objetivo .....	10
<b>2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>11</b>
2.1 Área de Estudo.....	11
2.2 Bacia do Paraná.....	12
2.3 Sinclinal de Torres.....	15
2.4 Histórico do Uso do Método MT na Bacia do Paraná .....	18
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>20</b>
3.1 O Método Geofísico Magnetotelúrico (MT) .....	20
3.2 Materiais e Métodos .....	27
3.3 Etapa de Planejamento .....	28
3.4 Etapa de Campo.....	29
3.5 Etapa de Laboratório .....	30
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>34</b>
4.1 Modelamento 2D do Perfil PS-III .....	34
4.2 Modelamento 2D do perfil PS-II .....	36
4.3 Modelamento 2D do Perfil PS-I.....	39
4.4 Modelamento 3D .....	43
4.5 Orientação da Sinclinal de Torres .....	45
4.6 Discussões .....	47
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos apresentam inúmeras vantagens na obtenção de dados em sub-superfície, principalmente por oferecerem uma gama de dados específicos sobre as propriedades da rocha e de questões estruturais de forma rápida e muitas vezes de baixo custo. Dentre os métodos geofísicos, o Magneto-Telúrico (MT) é ainda pouco utilizado no Brasil. Porém seu uso tem-se mostrado extremamente útil e de crescente credibilidade no decorrer dos últimos anos, como alternativa aos métodos sísmicos. A indústria petrolífera tem usado amplamente este método nas últimas décadas, principalmente por ter resultados similares à sísmica, porém com uma eficiência considerável nas questões de mobilidade operacional e de custos.

Este trabalho mostra a eficiência do método MT aplicado à Sinclinal de Torres, uma região localizada no sudeste da Bacia do Paraná, com espessa cobertura vulcânica, um fator que dificulta a aquisição de dados através da sísmica. Embora a região da Sinclinal seja relativamente bem conhecida, os dados geofísicos de profundidade são escassos e desta forma a aquisição do dado da resistividade das rochas em profundidades que ultrapassam 05 km, que é possível através do método MT, é uma informação inteiramente nova nesta área. Dentre as diversas utilidades da caracterização geológica-estrutural da Sinclinal de Torres e da Bacia do Paraná, se destaca o interesse do desenvolvimento de modelos com potencial para a geração de hidrocarbonetos em depósitos não-convencionais.

É importante ressaltar que o presente trabalho é parte do projeto Paraná-Sul (Rolim & Lugão, 2012), realizado em conjunto com as Universidades UFRGS e UNISINOS.

O presente trabalho caracteriza o arcabouço geológico estrutural da área através do método MT com modelamentos 2D e 3D, e através destes modelos em comparação com dados de gravimetria, condutividade térmica, testemunhos de sondagem, colunas estratigráficas e mapas geológicos. Sendo assim possível provar a eficiência do método na delimitação de diferentes litofácies e feições estruturais com falhas, dobras e fraturas.

## 1.2 Hipótese

O trabalho tem como premissa a possibilidade de utilizar o método MT para realizar interpretações das superfícies que delimitam as trocas das grandes unidades litológicas, identificar grandes estruturas que as controlam e, a partir destes dados, comparar com testemunhos de sondagem, mapas geológicos, de Anomalia Bouguer e de fluxo geotérmico para caracterizar o arcabouço geológico estrutural da Sinclinal de Torres na Bacia do Paraná. Através disto, mostrar a eficácia do método MT e sua utilização como uma alternativa ao método sísmico.

## 1.3 Objetivo

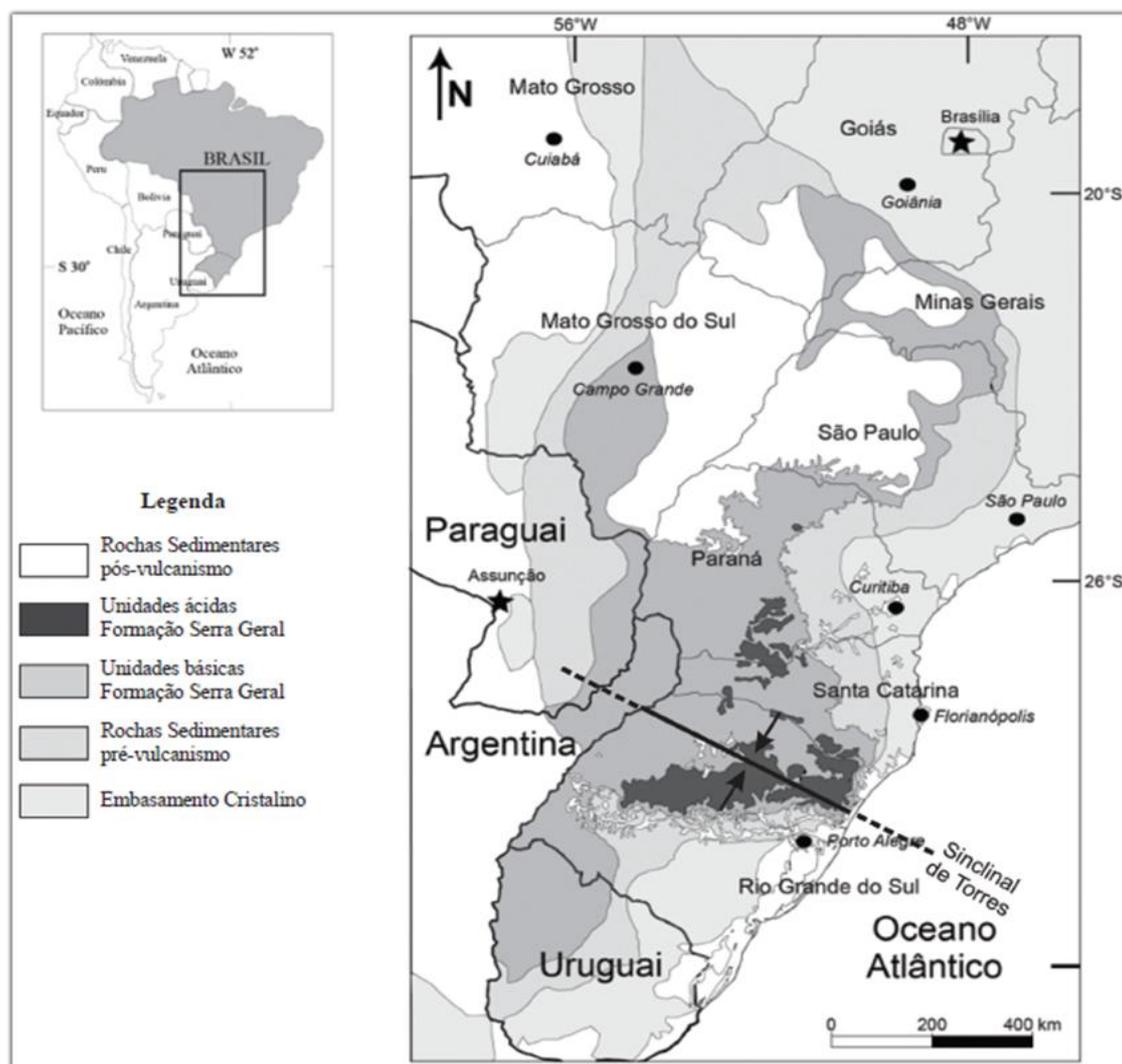
Geral: O objetivo deste trabalho é caracterizar o arcabouço geológico-estrutural da Sinclinal de Torres na Bacia do Paraná.

Específico: Delimitar as variações de litofácies obtidas nos três perfis de resistividade, assim como demarcar importantes feições estruturais na Sinclinal e na Bacia do Paraná. Através de um modelamento 2D e 3D mostrar a precisão do método MT, confirmando sua acurácia com comparações com testemunhos de sondagem, mapas geológicos, de anomalia Bouguer e de fluxo geotérmico. Dessa forma, demonstrar que o método MT é um bom substituto a outros métodos geofísicos, principalmente em relação à sísmica neste caso específico, por fornecer dados similares, porém em menor tempo e com menor custo. Este trabalho também tem o intuito de fornecer novas informações para posteriores estudos relacionadas à Bacia do Paraná, principalmente para o estudo do potencial de reservatórios não-convencionais de hidrocarbonetos na região Sudeste da Bacia do Paraná e na Sinclinal de Torres.

## 2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1. Área de Estudo

O presente trabalho foi realizado no sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul. O levantamento geofísico foi feito no sudeste da Bacia do Paraná, com enfoque na Sinclinal de Torres (figura 1).



**Figura 01.** Mapa geológico da Bacia do Paraná, com foco na Sinclinal de Torres (Renner, 2010).

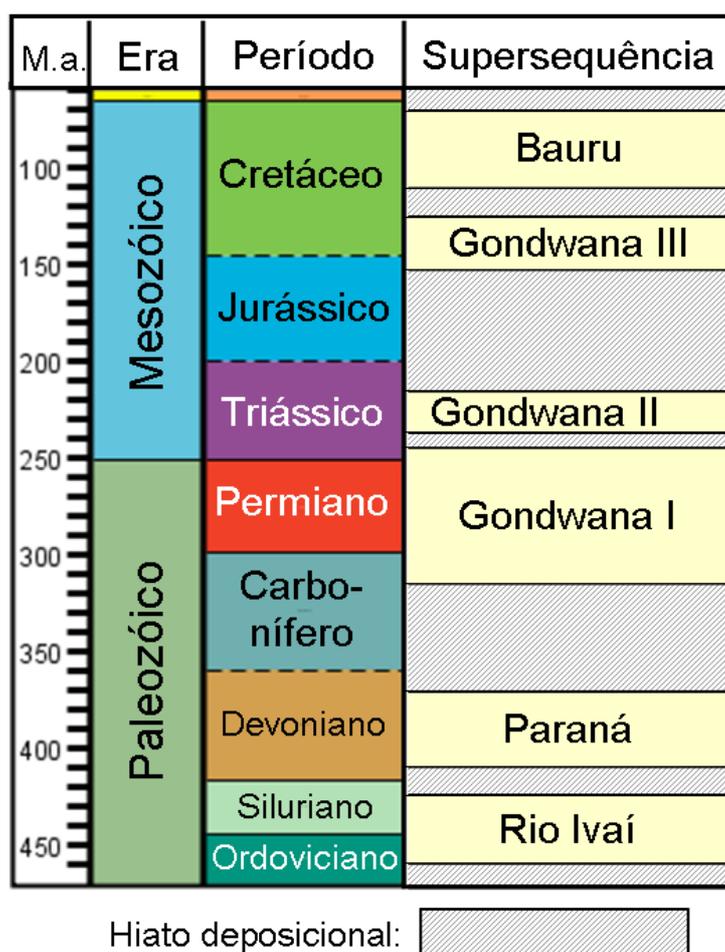
## 2.2. Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma extensa área de sedimentação Paleozóica-Mesozóica que contém um registro estratigráfico de idade que varia do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo (fig. 2 e 3) e contém seis supersequências (Milani; 1997), sendo elas: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As primeiras três supersequências estão relacionadas a grandes ciclos transgressivos paleozóicos. As outras três supersequências correspondem à pacotes sedimentares continentais e à rochas ígneas associadas.

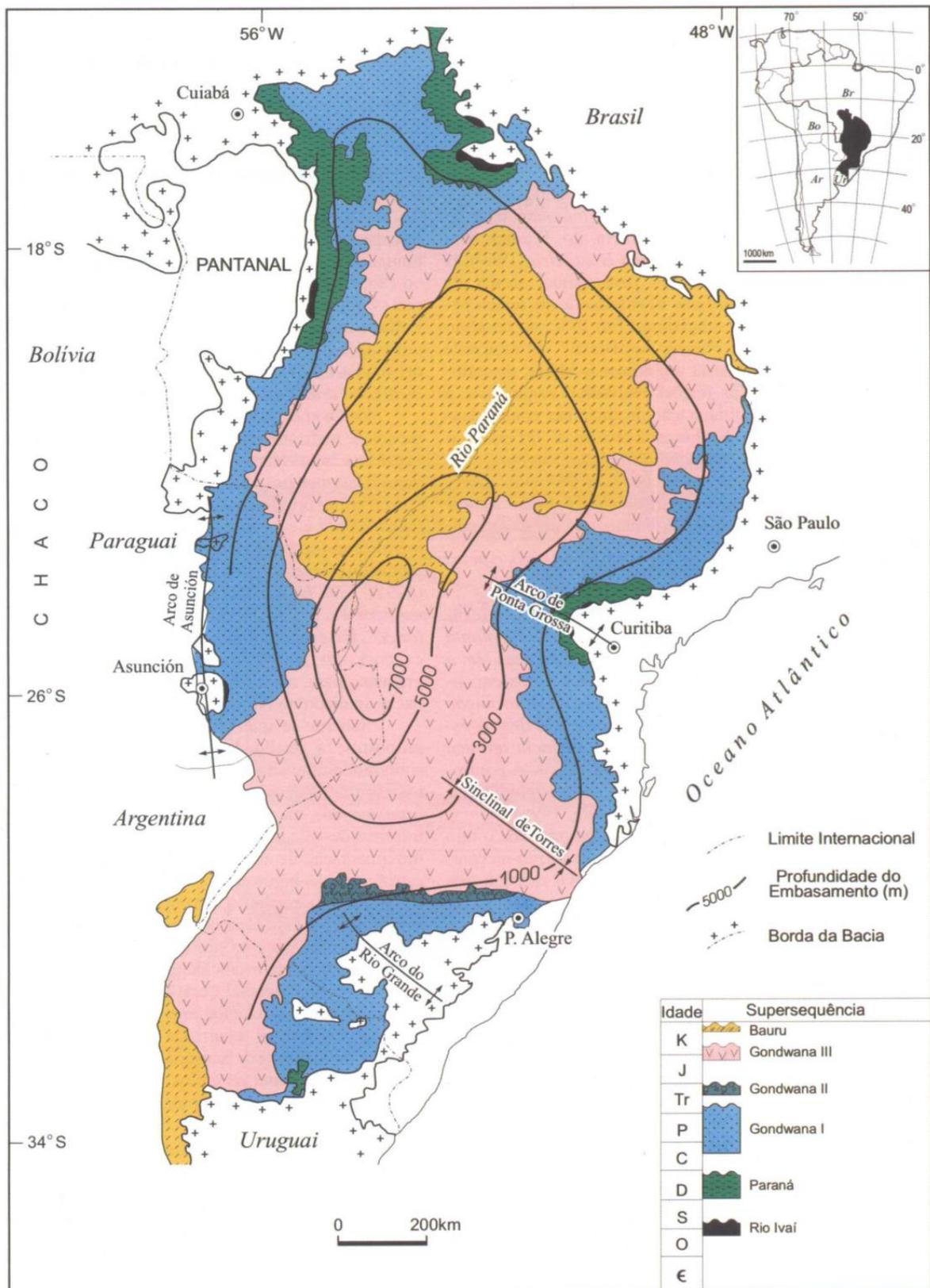
Nas supersequências estão registradas sucessivas fases de acumulação sedimentar intercaladas com períodos de erosão em larga escala (Milani; 1997). Cada unidade foi condicionada a um contexto climático e tectônico particular durante sua evolução. A supersequência Rio Ivaí está relacionada à implantação da Bacia do Paraná e, devido à sua área de ocorrência e à sua geometria, com depocentros alongados e de orientação geral SW-NE, supõe-se que ela tenha sido controlada por mecanismos de rifteamento. Após, durante um amplo período de afogamento marinho das áreas cratônicas do Gondwana, acumulou-se a supersequência Paraná. Durante a deposição da supersequência Gondwana I, houve um efetivo isolamento da Bacia no interior do continente, assim, predominaram as deposições em condições de bacia intracratônica, culminando com a deposição de campos de dunas eólicas, já no final do período Jurássico. Durante o Eocretáceo, houve o magmatismo Serra Geral, que estão relacionados aos períodos iniciais de ruptura do paleocontinente, encerrando assim a supersequência Gondwana III. Por fim, a história sedimentar da Bacia do Paraná é encerrada pela cobertura continental da supersequência Bauru.

A Bacia do Paraná tem um considerável potencial para a geração de hidrocarbonetos (Milani; 1997), potencial este que está relacionado com dois sistemas petrolíferos bem estabelecidos: no caso do primeiro, favorável a hidrocarbonetos gasosos, a geração ocorreu nos folhelhos da Fm. Ponta Grossa e a sua acumulação nos arenitos do Grupo Itararé ou da Fm. Rio Bonito. Já no segundo caso, propenso a ocorrência de óleo, a geração ocorreu nos folhelhos betuminosos da Fm. Irati e sua acumulação nos arenitos da Fm. Rio Bonito. O magmatismo

mesozóico ocorrido na Bacia pode ter sido um ponto crucial na maturação dos horizontes com potencial para a geração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná (Milani; 1997). Neste quesito o MT poderá auxiliar em posteriores pesquisas neste assunto, devido à necessidade de conhecer o comportamento estrutural do pacote sedimentar que possa conter hidrocarbonetos, para posterior estudo de viabilidade de exploração.



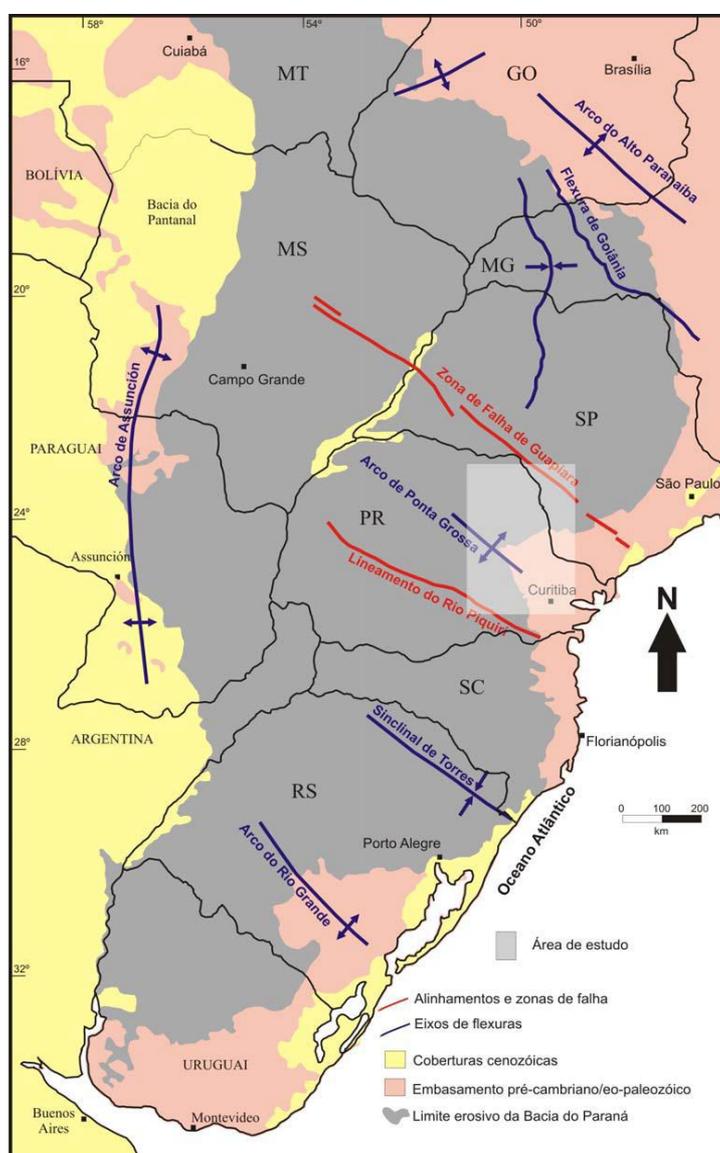
**Figura 2.** Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná (Modificado de Milani; 1997).



**Figura 3.** Localização da Bacia do Paraná de forma simplificada, contendo as superseqüências e a profundidade do embasamento (Milani; 1997).

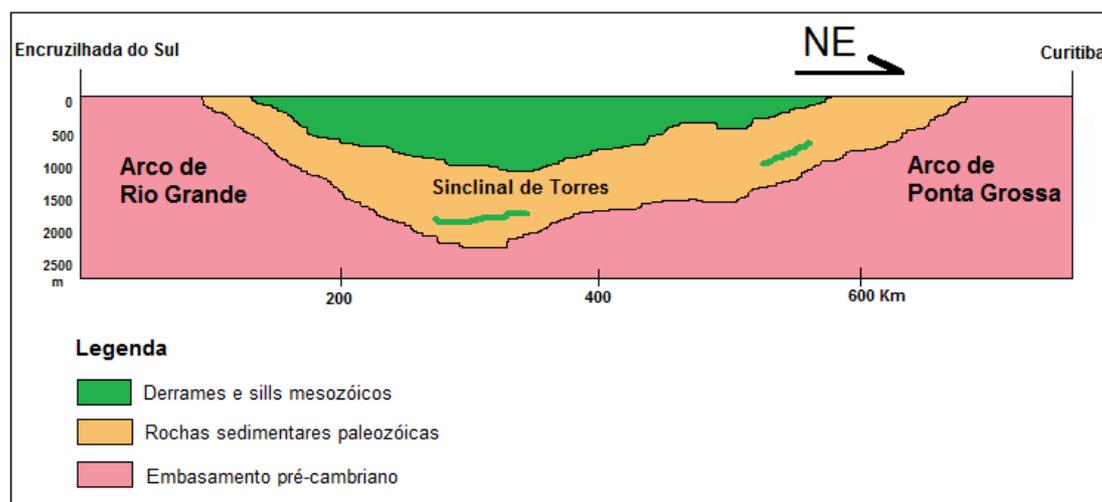
### 2.3. Sinclinal de Torres

A partir do período Juro-Cretáceo, quando iniciou a ruptura do supercontinente Gondwana, as estruturas do embasamento da Bacia do Paraná sofreram forte reativação e houve uma injeção de grande volume de magma básico, que se instalou na forma de soleiras e diques entre as unidades paleozóicas da Bacia e atingiu a superfície em forma de derrames (Milani et al; 2007). Essa reativação tectônica também resultou na formação de arcos e flexuras, com as feições mais proeminentes localizando-se na borda leste e sudeste da Bacia do Paraná (fig. 4), dentre elas o Arco de Ponta Grossa, a Sinclinal de Torres e o Arco de Rio Grande (Almeida, 1983; Zalán, 1990; Machado et al, 2012).



**Figura 4.** Localização e contexto geológico regional da área em estudo, com os principais segmentos estruturais definidos por Zalán et al;1990.

A sinclinal de Torres é a ligação entre os arcos de Ponta grossa que fica mais ao norte e o Arco de Rio Grande que fica ao sul (figura 5), ela tem orientação NW-SE e caimento suave para NW. Na sua superfície, é comum a presença de falhas que causaram movimento vertical nas unidades da Bacia do Paraná. A extensão da Sinclinal de Torres é representada principalmente pelo lineamento Torres-Posada (Vitorello e Padilha; 2000).



**Figura 5.** Seção geológica de Encruzilhada do Sul (RS) até Curitiba (PR), mostrando a conexão entre o Arco de Rio Grande e o Arco de Ponta Grossa, com a posição da Sinclinal de Torres entre eles. (Modificado de Soares et al; 2012)

Esta estruturação tectônica tem íntima associação a uma junção tríplice que foi gerada pela ação da Pluma de Tristão da Cunha, responsável pelo estabelecimento de um sistema Rfte-Rifte-Rifte, onde dois braços deste sistema tiveram desenvolvimento completo, gerando o Oceano Atlântico, e o terceiro braço foi abortado no processo e é onde se posiciona o Arco de Ponta Grossa (Magalhães, 2009).

Foi proposto, que durante a ruptura do Gondwana, a extrusão de magma ocorreu em três eixos principais, sendo que o lineamento Torres-Posada é um destes eixos, na extensão da Sinclinal de Torres (Cordani e Vandomos; 1967). Esta estrutura também sinaliza a continuidade da Bacia do Paraná em território Africano, correspondendo a Bacia do Etendeka (Marzoli et al; 1999). A Sinclinal também corresponde a maior aproximação da Bacia do Paraná ao litoral, constituindo-se na cidade de Torres (RS) como costões compostos por arenitos e basaltos.

No que concerne à litologia e à estrutura da Sinclinal, ela pode ser dividida em três porções distintas: uma calha principal, uma porção intermediária e uma ombreira sul. Cada uma destas porções demonstra uma diferença de espessura e estratigrafias relacionadas com a evolução estrutural da Sinclinal (Lima et al; 2012).

Os derrames vulcânicos na Sinclinal de Torres podem ser divididos em duas unidades: a unidade I sendo caracterizada por baixa efusão de magma por um longo período de tempo, composta por inúmeros derrames do tipo *sheet pahoehoe*, *compound lavas* e do tipo *ponded* nos vales interduna e a unidade II que pode ser caracterizada por grande volume de magma gerado num período curto de tempo, sendo a lava principalmente do tipo *rubbly*, contendo núcleo maciço e topos fragmentados. Ambas as unidades são do tipo baixo TiO<sub>2</sub> e pertencem a fácies Gramado (Rossetti et al; 2014). Sob os derrames vulcânicos que foram gerados na separação do supercontinente Gondwana, está a formação Botucatu, que contém uma espessura considerável, podendo atingir até 800m. Esta formação representa um antigo deserto com área superior ao atual deserto do Saara, sendo um ambiente árido, com predominância de processos eólicos e formações de dunas arenosas. Os depósitos desta formação costumam ser de arenito fino-médio, avermelhado devido a presença de óxido de Fe e com estratificação cruzada-paralela de médio a grande porte (Lopes et al; 1986). A Fm. Serra Geral e a Fm. Botucatu compõem a Supersequência Gondwana III, sendo precedida pela Supersequência Gondwana II e I, e após, as supersequências Paraná e Rio Ivai.

#### 2.4. Histórico do Uso do Método MT na Bacia do Paraná

Numa pesquisa que foi realizada com o intuito de verificar a profundidade do embasamento cristalino na porção leste da Bacia do Paraná (Zevallos et al; 2009), o MT foi usado devido a dificuldade de traçar limites usando apenas a sísmica, pois a camada vulcânica estava causando demasiada interferência. No estudo verificou-se que na área o pacote vulcânico tinha em média 1 km de espessura, e que o embasamento estava numa faixa que variava de 3,8 a 4,3 km de profundidade. Tais dados foram corroborados pelas medidas obtidas através de sondagens que existiam no local, mostrando que os dados obtidos pelo MT eram de fato verídicos e dessa forma mostrando-se como uma alternativa viável e de baixo custo em relação à sísmica.

Em outro estudo, que foi realizado na porção noroeste da Bacia do Paraná com o intuito de adquirir mais detalhes acerca do embasamento cristalino (Bologna et al, 2013) usou-se o MT pois os furos de sondagem que chegavam até o embasamento eram escassos devido a camada sedimentar que atinge até 6000m de espessura na região. Pelas datações obtidas através de dois furos de sondagem, averiguava-se que o embasamento era composto por um único bloco cristalino de idade de aproximada de 2 Ga (Cordani et al; 1984), porém após a aquisição de dados através de MT, verificou-se que havia dois blocos cristalinos de resistividade totalmente distintas e dessa forma teorizou-se que o embasamento naquela região que antes era considerado como sendo um único bloco, seria na verdade dois blocos cristalinos unidos por uma faixa móvel durante o Neoproterozóico. Tal modelo foi corroborada por um trabalho de análises de função de receptor (Júlià et al, 2008). Tal estudo mostra que o método MT foi capaz de adquirir dados que eram praticamente inviáveis de se obter através da sondagem devido à profundidade do embasamento cristalino naquela porção da Bacia e que foram passados despercebidos pela sísmica.

Em recente trabalho realizado por Rolim e Lugão (2012) e por Philipp et al (2014), usando os mesmos dados de MT que o presente trabalho usou, foi possível averiguar diversas estruturas geológicas em grande profundidade, principalmente no embasamento cristalino, estruturas que ficam pouco aparentes ou passam despercebidas com o uso da sísmica. Dentre elas ficou evidente a existência do Arco de Rio Grande associado a importantes falhas de direção NW-SE, e a precisão dos dados teve acurácia o suficiente para estabelecer os rejeitos dessas falhas que variam em torno de 300-1000 m. Também ficou evidente principalmente pela

modelagem 2D, que o Arco de Rio Grande se trata de um Horst de dimensão regional onde há um acréscimo expressivo da espessura das rochas sedimentares da Bacia do Paraná na porção sul e norte da estrutura, assim como um soerguimento do embasamento (Phillip et al; 2014). Os limites dessa estrutura também ficaram evidentes, no caso, sendo delimitada ao norte pelo sistema de falhas Jaguari-Mata e ao sul pelo sistema de falhas Alegrete e Ibaré. Através dessas evidências verificou-se que o arqueamento ocorreu simultaneamente à deposição sedimentar de certas porções da Bacia do Paraná, dados que foram corroborados por evidências estratigráficas anteriores a esse trabalho (Faccini et al; 2003). Na modelagem 3D foi possível criar um mapa com a profundidade do embasamento cristalino em todo o território do Rio Grande do Sul e inclusive atingindo áreas além deste, como porções do Uruguai, Argentina e da plataforma costeira, mesmo que este não fosse o objetivo do trabalho. Verificou-se através desse mapa tridimensional um possível paleorelevo, com destaque para um vale de mais de 3km de profundidade com direção W-NW e aberto para a Argentina. Além deste, na porção sul do estado foi verificado um paleovale alinhado com o Rifte-Guaritas com abertura para o Uruguai, cujos estudos anteriores apontam fácies marinhas, indicando que de fato havia abertura para o oceano (Phillip et al; 2014). Concluindo que este estudo utilizando os dados de MT não apenas corroborou dados já existentes como também trouxe novas informações sobre a Bacia do Paraná, principalmente no que concerne a zonas mais profundas, cujas informações são mais difíceis de obter.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 O Método Geofísico Magnetotelúrico (MT)

O método MT foi desenvolvido originalmente com o intuito de pesquisar bacias sedimentares (Cagniard; 1953), principalmente por se tratarem de ambientes geológicos de relativa simplicidade, onde se presume que predominam depósitos sedimentares de estratificação horizontal.

Este método geofísico começou a ser usado intensivamente em alguns países a partir da década de 1970, focando a exploração de petróleo. Porém, na época, não obteve tanto sucesso como o método geofísico da reflexão sísmica. O principal motivo, é que a sísmica já apresentava um considerável desenvolvimento teórico e instrumental nesta época.

Na década de 1980 esta situação mudou consideravelmente. Houve uma especialização nas técnicas de processamento e interpretação de dados MT, assim como um maior desenvolvimento nos instrumentos de medição. Como consequência, a resolução do método melhorou de forma considerável, tornando viável seu uso em ambientes geológicos mais complexos.

As profundidades típicas de exploração deste método são maiores do que 2 km, podendo atingir até 200 km. É um método ideal para o estudo da crosta média e inferior.

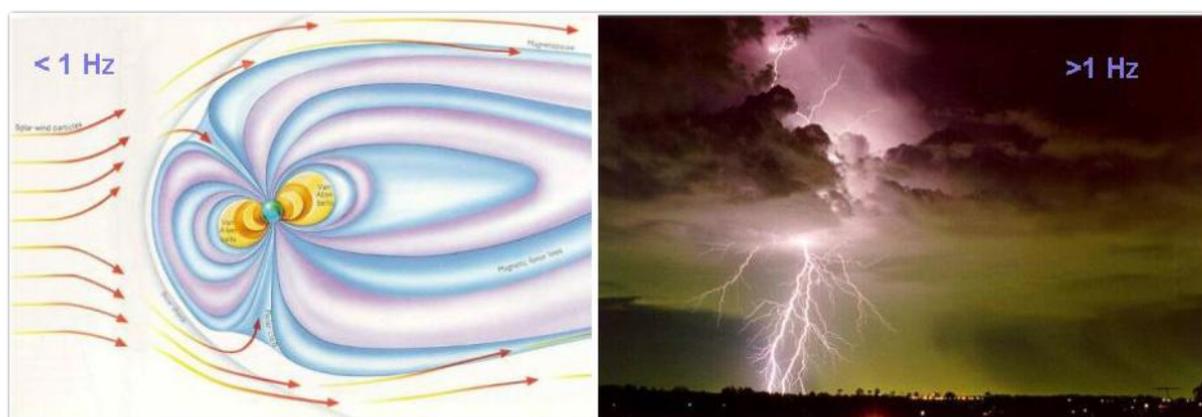
As informações contidas neste capítulo foram retiradas do livro Fundamentos do Método Magnetotelúrico na Exploração de Hidrocarbonetos, Menezes, 2013.

O método Magneto-telúrico (MT) é uma técnica para determinar a distribuição da condutividade elétrica no subsolo a partir da medição na superfície do campo elétrico e magnético naturais. Os resultados obtidos podem ser comparados com um registro elétrico de poço suavizado, materializado através de uma seção de resistividade por profundidade. Os resultados de uma linha de estações são interpretados para proporcionar a distribuição e a estrutura da condutividade elétrica do subsolo. O método consiste na mensuração simultânea das variações do campo elétrico e magnético da Terra em um local de interesse, em uma ampla faixa de frequências. Estas variações são analisadas, normalmente utilizando um computador, para a obtenção do espectro e deste, a resistividade

aparente como uma função da frequência. A interpretação consiste na comparação das curvas de resistividade calculadas para modelos simples com as curvas de campo. O método MT depende da penetração de energia eletromagnética dentro da Terra. O controle da profundidade provém como uma consequência natural da maior penetração que alcançam as baixas frequências. As medições são absolutas, e sua interpretação proporciona valores de resistividade e profundidade verdadeiros, não somente em zonas anômalas. Segundo Vozoff (1972), as profundidades obtidas a partir da interpretação de dados MT são mais confiáveis do que as que se obtêm baseados na gravimetria ou na magnetometria.

As fontes que geram os campos eletromagnéticos (EM) no subsolo estão associadas principalmente aos fenômenos de interação entre o vento solar e a magnetosfera da Terra e as tempestades meteorológicas que ocorrem na atmosfera do planeta (figura 6).

As mensurações dos campos elétricos e magnéticos são utilizadas para determinar a resistividade elétrica do subsolo. A profundidade de penetração dos campos está diretamente relacionada com este parâmetro, ou seja, quanto maior for a resistividade do subsolo, maior será a profundidade dos campos EM.



**Figura 6.** Fontes de energias eletromagnéticas. As tempestades solares fornecem ondas energéticas com frequências menores a 1 Hz, enquanto as tempestades causam distúrbios elétricos acima de 1 Hz.

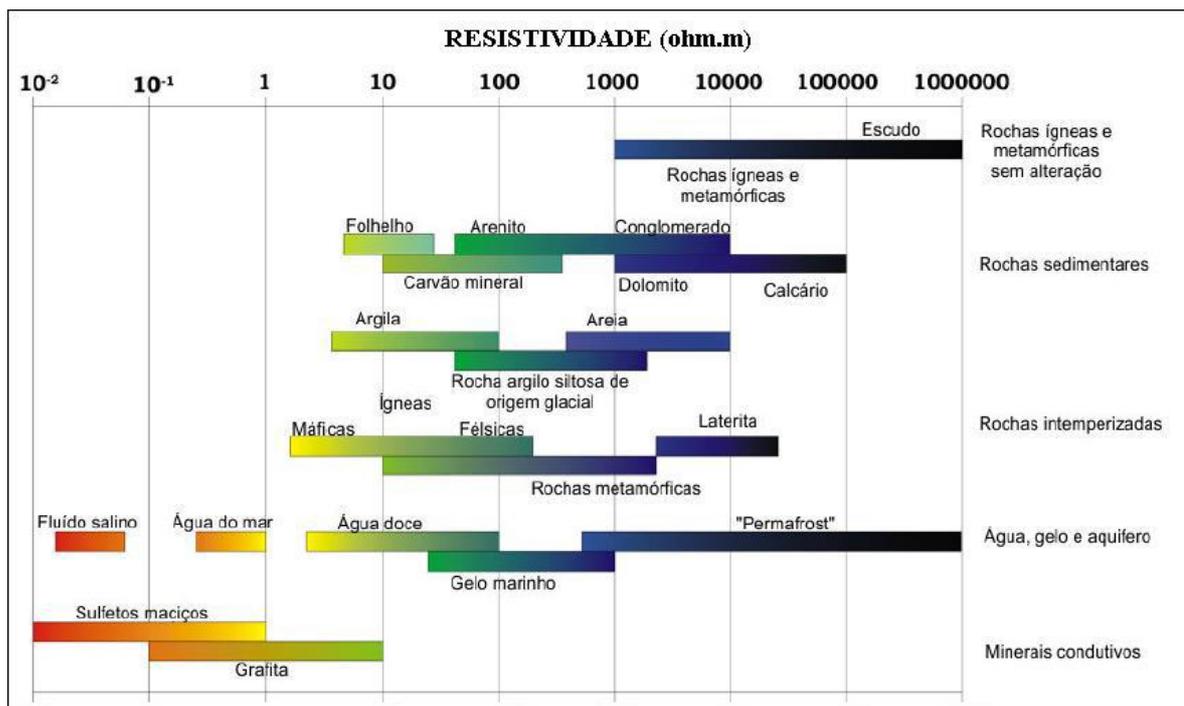
O método MT opera no intervalo de frequências entre 1 e 0,0001 Hz. O sinal magnético  $H$ , variável no tempo, sempre está presente no campo magnético terrestre em forma de “ruído” e quando é muito grande pode interferir com os levantamentos magnéticos. Em uma terra condutiva, o campo magnético variável induz correntes telúricas, as quais representam os sinais elétricos  $E$ . A amplitude do sinal cai rapidamente com o aumento da frequência sobre a maior parte do espectro de frequências utilizado. Todavia, o nível do sinal pode ser incrementado rapidamente com o início de tempestades magnéticas, algumas vezes em um fator de 10, mas não é raro que se aumente em um fator de 100. A maior parte do ruído magnético que alcança a superfície da terra abaixo de 1 Hz deve-se ao fluxo de corrente na camada ionizada que circunda a Terra (ionosfera). Estas correntes são impulsionadas pela atividade solar e pelos movimentos relativos da Terra, do Sol e da Lua. As frequências, acima de 1 Hz, provêm das tempestades elétricas dentro da atmosfera em volta do planeta. Os campos gerados pelo efeito das tempestades podem ser muito grandes localmente, por esta razão não é desejável que estas ocorram nas proximidades dos levantamentos MT.

Após a aquisição, é necessária a inversão de dados que permite obter um modelo a partir da comparação de dados geofísicos de campo que incluam propriedades físicas do subsolo. Um bom modelo obtido a partir da inversão é aquele que reproduz os dados de campo e é consistente com outra informação disponível, por exemplo, informação litológica de poços. Os modelos de sondagem MT buscam encontrar modelos de resistividade em função da profundidade das estruturas geológicas que se encontram no subsolo, que sejam consistentes com as resistividades e fases para a categoria de frequências utilizada em cada estação. A inversão unidimensional é realizada sobre as curvas médias de resistividade e fase utilizando alguns dos algoritmos existentes, entre os quais o de Occam (Constable et al; 1987) é um dos mais populares. A principal vantagem deste método radica na obtenção de modelos amenizados com o fim de evitar uma super-interpretação dos dados. Isto é obtido a partir da definição do conceito de aspereza, definida como a integral do quadrado da primeira derivada e segunda das resistividades em função da profundidade. A partir da inversão unidimensional de sondagens individuais, é possível construir seções de resistividade em função da profundidade a partir da interpolação dos valores de resistividade obtidos entre sondagens contíguas (seção final de interpretação).

Na presença de anisotropia no plano horizontal em decorrência da influência de uma estrutura geológica alongada (tal como uma falha) próxima à zona de estudo, são definidos dois modos de polarização: um deles quando o fluxo de corrente é paralelo à estrutura (TE) e o outro perpendicular com o fluxo do campo magnético paralelo à estrutura (TM). Isto define duas resistividades e duas fases principais, uma ao longo da estrutura regional e outra perpendicular a esta. A inversão 2D é um processo mais elaborado que, contudo, pode ser realizado utilizando software comercial (Phoenix) que utiliza rotinas amplamente comprovadas desenvolvidas por Rodi Mackie, 2001. Uma suposição comum para ambas as rotinas é que o perfil para o qual vai se fazer a inversão é perpendicular ao campo elétrico. Por essa razão é importante estimar o azimute da estrutura regional e rotacionar a impedância ao sistema de referência definido pelas estruturas principais.

A efetividade das sondagens MT depende em grande medida do contraste condutivo entre os materiais do subsolo (fig. 7). Se existe um bom contraste elétrico entre as diferentes unidades litológicas dos materiais que conformam o subsolo, então isto permitirá uma adequada determinação dos limites, das profundidades e das suas espessuras. A combinação desta característica com informação de registros físicos de testemunhos de sondagem permite correlacionar o sinal geofísico à rocha, o que implica um conhecimento extra no processo de interpretação e, portanto, nos alcances dos modelos quantitativos obtidos.

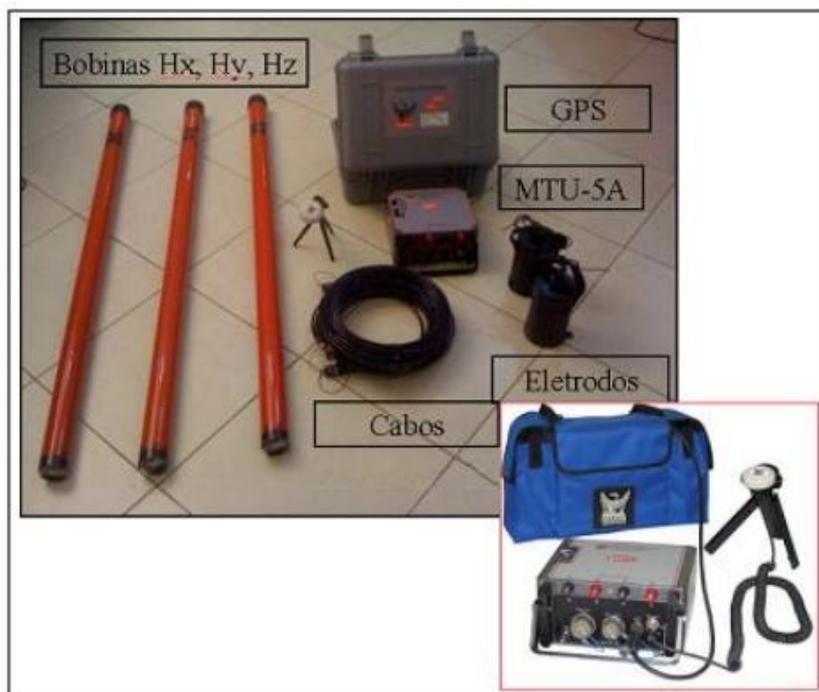
O equipamento utilizado – Phoenix modelo MTU-5A – consiste em uma unidade de aquisição, filtração e amplificação dos sinais que contém um módulo de pré-processamento e armazenamento da informação. É complementado com três sensores e quatro taças porosas para os dois dipolos elétricos e outra para conectar a terra ao instrumento (fig. 8). A instalação de uma estação MT em campo consiste em colocar dois dipolos elétricos de 60 a 100 m de separação orientada com precisão (ao Norte magnético) em direções N-S e E-W (fig. 9).



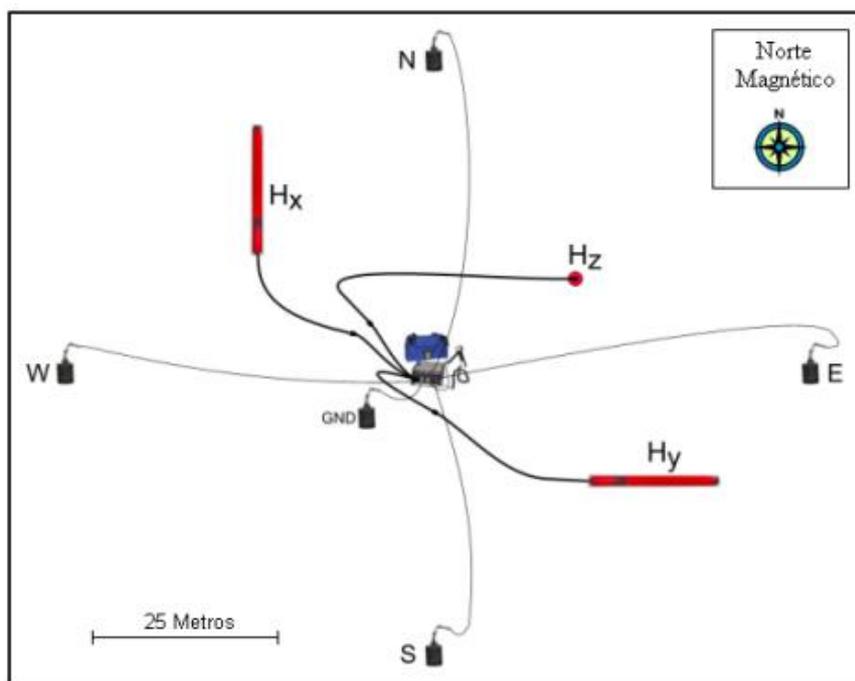
**Figura 7.** Resistividade elétrica em materiais da Terra. Modifica de Palacky (1987), obtida de Santos (2012).

Cada dipolo está conectado a terra através de dois eletrodos ou taças porosas que contêm um eletrólito que facilita a passagem do sinal ao instrumento. Para melhorar o contato com o solo, os eletrodos são enterrados a uns 50 cm da superfície, umedecendo com água e cobrindo posteriormente para manter estáveis as condições de medição. O quinto eletrodo se coloca no centro do arranjo que funciona como descarga na terra para proteção do instrumento.

O seguinte passo é a colocação dos sensores magnéticos ou bobinas receptoras. A colocação dos dipolos divide o terreno em quatro quadrantes onde se colocam as três bobinas para a mensuração dos componentes do campo magnético Hx, Hy e Hz. Cada uma destas é orientada e nivelada cuidadosamente; uma na direção NS, a outra EW e a terceira se coloca verticalmente. Não existe regra preferencial para dispor as bobinas nos quadrantes em específico. O arranjo apresentado na fig. 9 é o mais usual em termos de logística e operacionalidade em campo.



**Figura 8.** Imagem do equipamento de aquisição de dados magnetotelúricos. Em detalhe: unidade central MTU-5A.



**Figura 9.** Arranjo usual de campo MT (Lugão et al. 2014)

As três bobinas são enterradas e cobertas para evitar perturbações causadas pelo movimento do ar (fig. 10). Tanto dipolos quanto sensores magnéticos se conectam ao equipamento central com seus respectivos cabos e evita-se que

estes fiquem descolados do solo para evitar vibrações por efeitos de movimentos com o ar que podem gerar ruído no sinal. Este arranjo permite medir dois componentes horizontais de campos elétricos ( $E_x$  e  $E_y$ ) e dois componentes horizontais e uma vertical de campo magnético ( $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ) para o intervalo de frequências entre 320 a 0,0002778 Hz. Esta informação é armazenada no equipamento durante 24 horas, depois é descarregada para um computador portátil para seu posterior processamento e interpretação. Os dados MT são adquiridos na modalidade referência-remota (RR). Essa modalidade tem como objetivo eliminar o ruído eletromagnético que prejudica a qualidade dos dados. A RR pode ser disposta de duas maneiras:

- uma estação base em coleta constante de dados em um local longe de interferências e ruídos eletromagnéticos ou;
- ao utilizar dois equipamentos simultaneamente (em um mesmo período de coleta) usam-se os dados da estação com menor ruído.



**Figura 10.** Montagem do equipamento. A, B – Alinhamento e nivelamento das bobinas (sensores magnéticos). C – Preparação de uma solução com água e sal para colocar o eletrodo. D – Disposição esquemática do eletrodo em sub-superfície.

A inversão 2D e a interpretação dos dados MT podem ser feita através de diversos métodos de interpolação usados na geração de malhas. O método

adequado deve ser escolhido dependendo da variável geofísica trabalhada, do tipo de processamento realizado, do padrão e distribuição da variável analisada, das informações geológico-estruturais, etc (Journel & Huijbregts; 1978). Muitas vezes a escolha do interpolador pode resultar em criação de falsas feições (feições inexistentes) ou mesmo o desaparecimento de feições sutis importantes. Os dados magnetotelúricos, por sua característica vetorial, trazem informação sobre a dimensionalidade da subsuperfície através da análise dos parâmetros obtidos do tensor impedância. Os dados obtidos apresentam características de estruturas bidimensionais (2D). Sendo assim, vamos realizar diretamente inversão 2D, pois a inversão 1D dos dados não produziria modelos confiáveis. O algoritmo utilizado para inversão e obtenção de modelos suavizados foi desenvolvido por Randy Mackie. O algoritmo utiliza regularização de Tikhonov utilizando o método dos gradientes conjugados. O problema direto (modelagem) utiliza uma solução por diferenças finitas geradas por uma rede análoga às equações de Maxwell. Os parâmetros da inversão são as resistividades dentro de células em uma malha 2D que se estende lateralmente e em profundidade para considerar condições de contorno e também leva em consideração a topografia. A modelagem 2D inversa é executada a partir de modelos preliminares homogêneos. A inversão sem vínculos e a partir dos modelos de meio-espaço é importante para acessar as informações que podem ser extraídas dos dados, sem qualquer influência de idéias pré-concebidas, as quais podem induzir erros na interpretação se não forem confiáveis.

### 3.2. Materiais e Métodos

Para realizar o mapeamento em subsuperfície da área alvo foram utilizados:

- 1 – levantamento geofísico pelo método Magnetotelúrico;
- 2 – correlação do sinal geofísico com testemunhos de sondagem;
- 3 – trabalhos anteriores da área de estudo (bibliografia pesquisada);
- 4 – correlação com mapas de anomalia Bouguer e de fluxo geotérmico;
- 5 – uso de softwares: RECON, Surfer e ArcGis para a computação e aplicação de modelos informatizados nos processamentos de dados existentes na região.

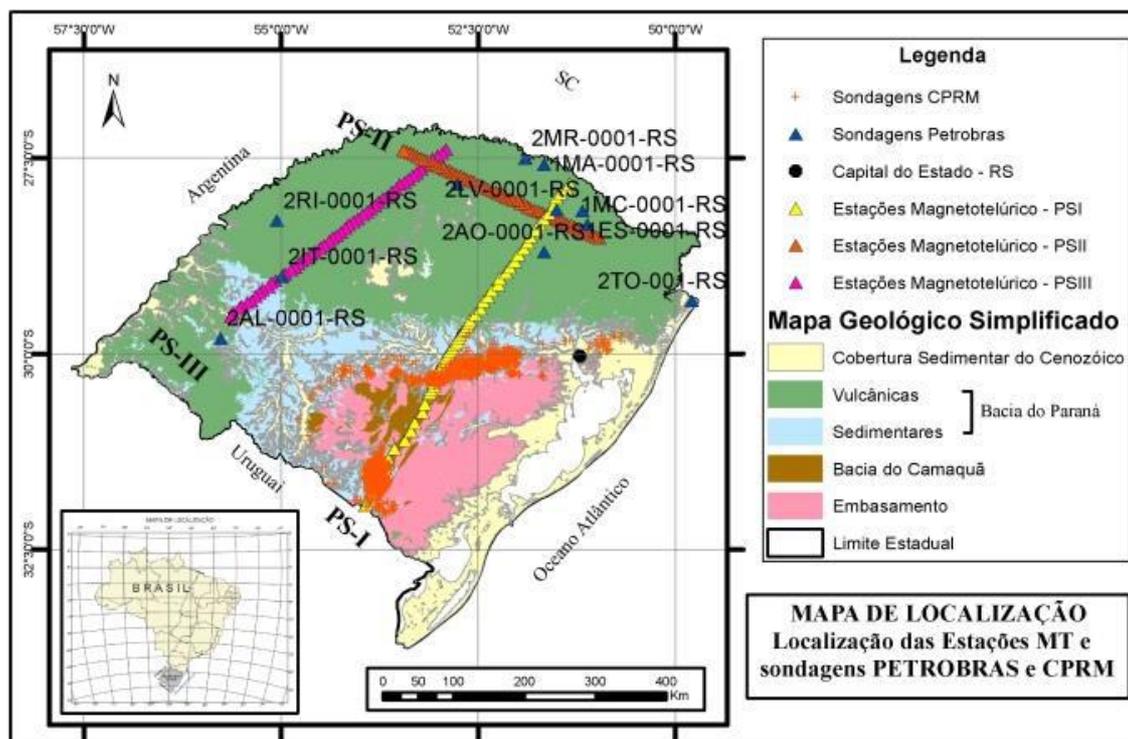
### 3.3. Etapa de Planejamento

Os dados de MT adquiridos neste trabalho fazem parte de um projeto maior, do qual o aluno faz parte, que visa compreender aspectos estruturais da Bacia do Paraná e, portanto, os perfis de MT efetuados foram planejadas para este fim. O primeiro passo do mapeamento geofísico foi decidir a direção dos perfis e quantos seriam feitos. A equipe decidiu que seriam feitos três perfis: dois de direção SW-NE (PS-I e PS-III), e um perfil na porção norte do estado de direção SE-NW que passaria apenas sobre a Bacia do Paraná (PS-II), conforme a figura 12.

O perfil PS-I foi constituído por 68 estações, que tiveram início na cidade de Aceguá - RS e terminaram na cidade de Barracão – SC. O espaçamento entre cada estação variou de 5 km, 10 km ou 15 km, dependendo do grau de detalhamento que era visado em cada região e da complexidade geológica. O perfil PS-II foi constituído por 54 estações, todas elas com um espaçamento de 5 km entre cada uma delas, sendo a primeira estação na cidade de Vacaria e a última na cidade de Frederico Westphalen, no Rio Grande do Sul. O perfil PS-III foi constituído por 50 estações, todas elas com um espaçamento de 7 km entre cada uma delas, a primeira sendo em Nonoai e a última em Manoel Viana. Tanto o PS-II quanto o PS-III foram feitos sobre as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral (Fig. 11).



**Figura 11.** Localização dos três perfis em vista aérea do estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Google earth, acessado no dia 24/11/2016 às 20h e 35min.



**Figura 12.** Mapa geológico simplificado do RS com a localização das seções de levantamento e respectivas estações geofísicas e testemunhos de sondagem próximos aos perfis (Rolim et al; 2014)

### 3.4. Etapa de Campo

O mapeamento foi feito utilizando a configuração mostrada na figura 04, com a modalidade de referência remota (RR), utilizando uma estação base que não continha ruídos. Em média, era possível montar duas estações por dia e desmontar outras duas.

Os fatores que influenciavam o tempo de levantamento eram o clima e também o acesso aos locais das estações. Por vezes, não havia estradas com um caminho direto ao ponto desejado, e era necessário executar prolongadas voltas e desvios do trajeto principal. A instalação do equipamento demandava diversos cuidados para que os dados fossem coletados corretamente e o equipamento ficasse protegido de eventuais danos ou interferências. O primeiro dos cuidados era evitar instalar o equipamento perto de fios elétricos, e caso houvesse redes de alta tensão, a distância a ser tomada era ainda maior. O segundo cuidado era a proteção do equipamento: os fios que conectavam o processador às bobinas e eletrodos foram revestidos com mangueiras para evitar que animais mordessem e danificassem os mesmos, algo que já tinha ocorrido em mapeamentos anteriores. O processador

era envolvido com uma lona para proteger do clima e dos animais. Além desses cuidados, deveríamos constantemente prestar atenção se o equipamento estava instalado da forma correta, sempre utilizando uma bússola para o alinhamento e misturando uma solução salina à terra onde os eletrodos seriam enterrados, para garantir uma boa condutividade dos mesmos. Por último, antes de desinstalar qualquer estação, verificávamos os dados no computador para ver se eles tinham sido adquiridos de forma satisfatória. Após, desinstalava-se os equipamentos.

### 3.5. Etapa de Laboratório

Após adquiridos os dados em campo e finalizados os perfis propostos, é necessário que os dados sejam tratados, processados e finalmente os modelos de inversão 2D podem ser gerados. Os dados adquiridos se comportam em duas curvas distintas: uma delas se refere ao comportamento da resistividade em direção paralela ao perfil, e a outra em direção perpendicular ao perfil. Quanto mais harmônicas forem as duas curvas, mais constante é o comportamento da estrutura geológica. Na hora de analisar estas curvas, devemos corrigir as porções delas que contenham muito ruído, e isto é realizado através do software Phoenix que é provido pelo fornecedor do equipamento. Essa correção é feita com a eliminação de pontos que diferem do comportamento natural da curva (fig. 13a e 13b).

A última parte do processamento geofísico corresponde na geração das seções MT. Os dados pontuais de cada estação retirados do campo (resistividade das rochas e profundidade) são processados em uma malha (fig. 14b) pré-estabelecida pelo software de inversão. Cada célula desta malha retorna um valor médio de resistividade entre seus vizinhos (fig. 14a.), produzindo assim, uma seção de profundidade x resistividade (fig. 15a).

Um último recurso visual ainda pode ser aplicado chamado de “suavização”. A suavização é um processo gráfico que retira o aspecto rústico quadriculado da seção tornando-a mais homogênea e apresentando contatos mais graduais (fig. 15b).

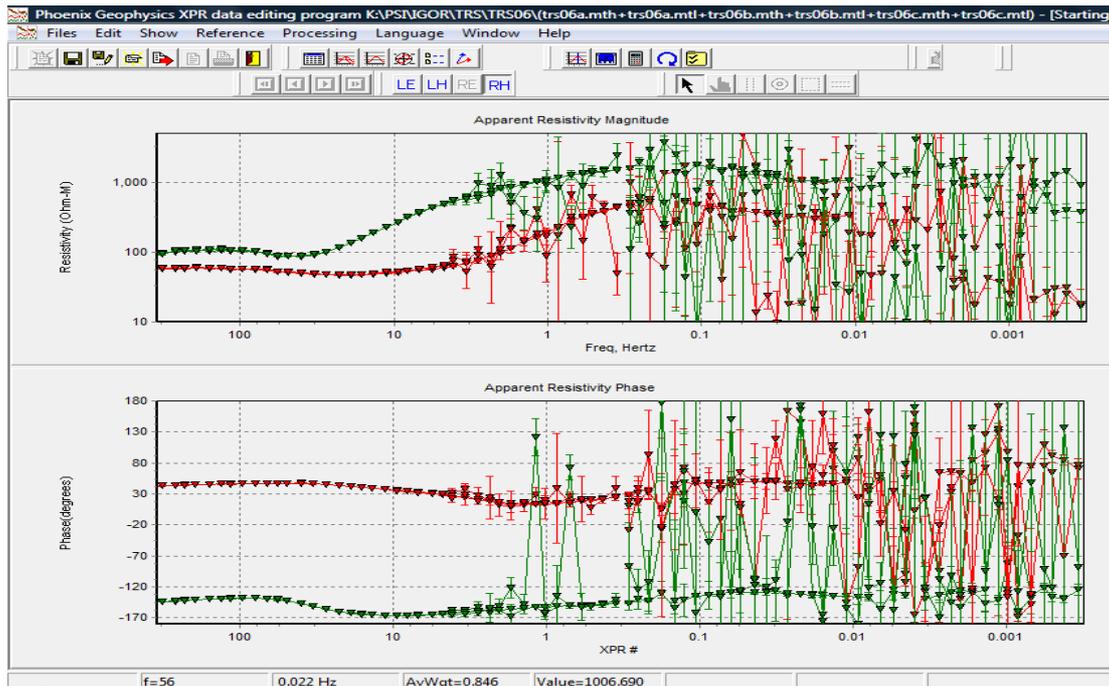


Figura 13a. Comportamento de um sinal onde ocorreu grande ruído.

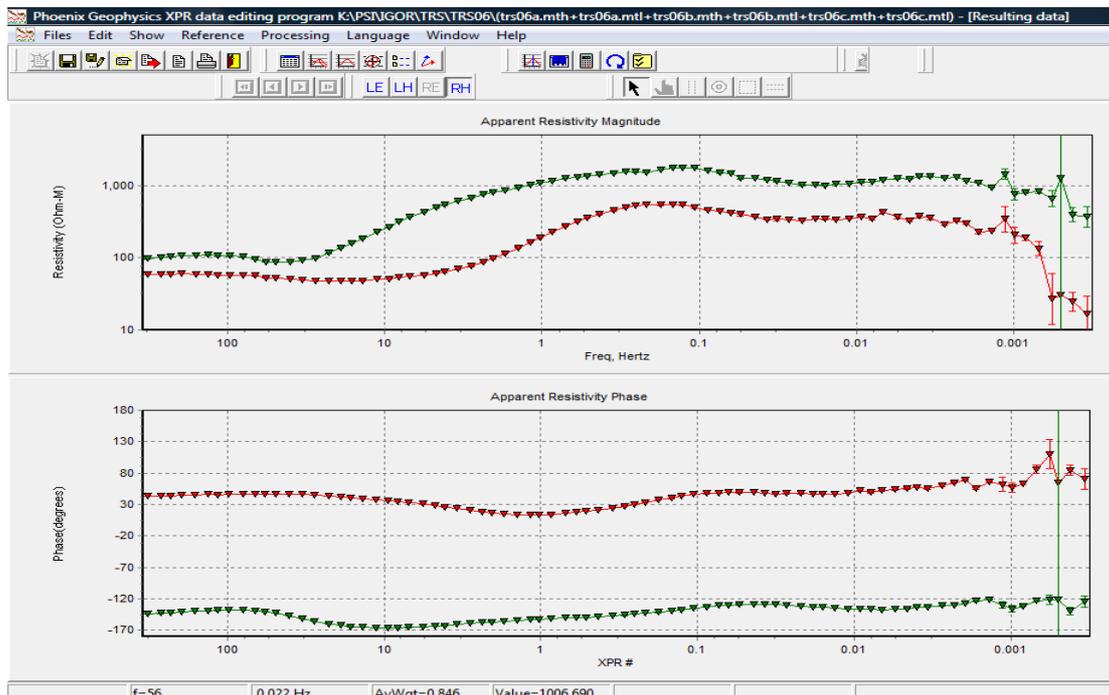
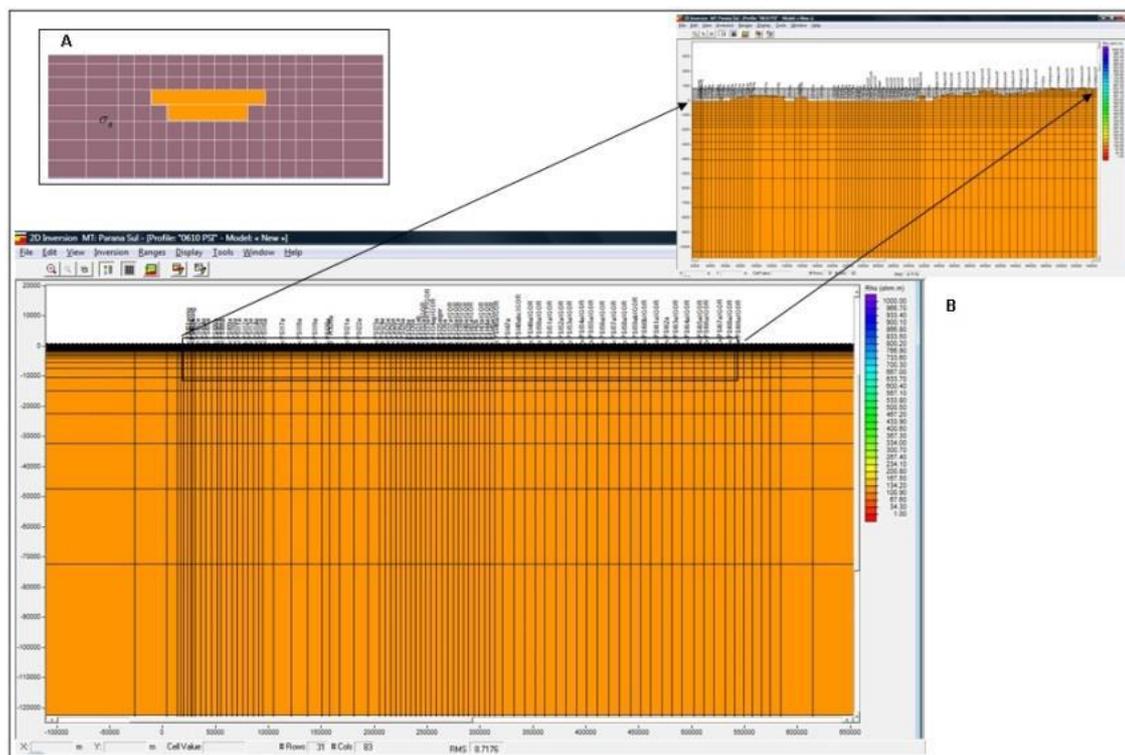
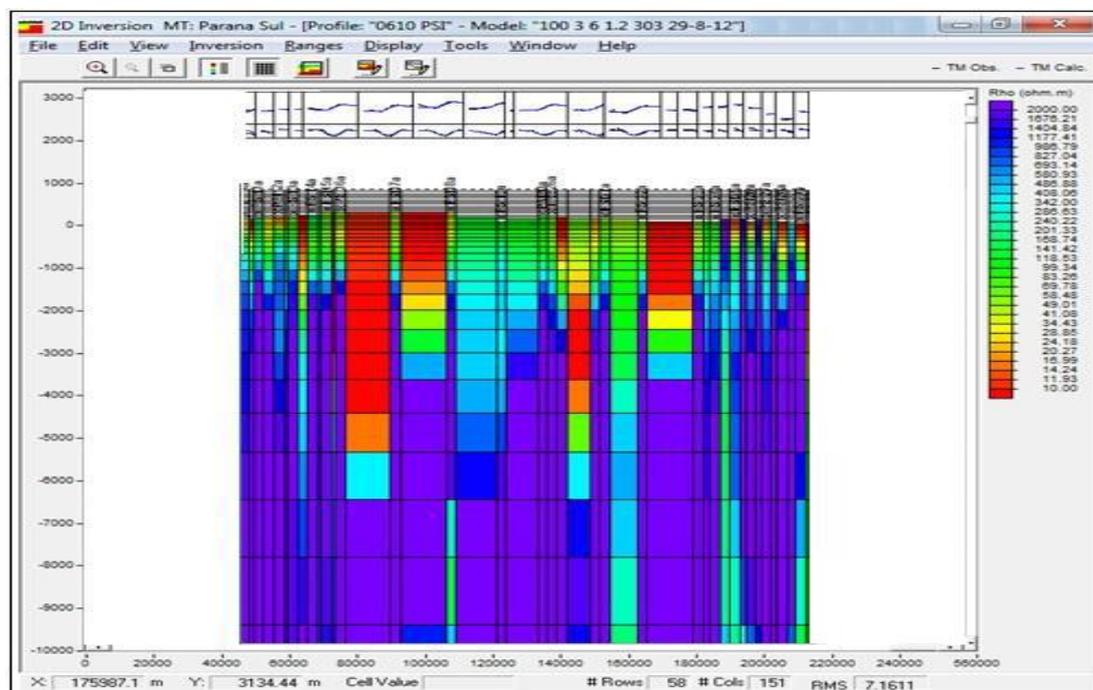


Figura 13b. O mesmo sinal com a correção dos ruídos (Lugão et al; 2014).



**Figura 14.** Grid de interpolação padrão da Phoenix. A: união de células com mesmo valor de resistividade. B: encaixe da seção no grid de interpolação.



**Figura 15a.** Exemplo de uma porção do perfil PS-I não suavizado.

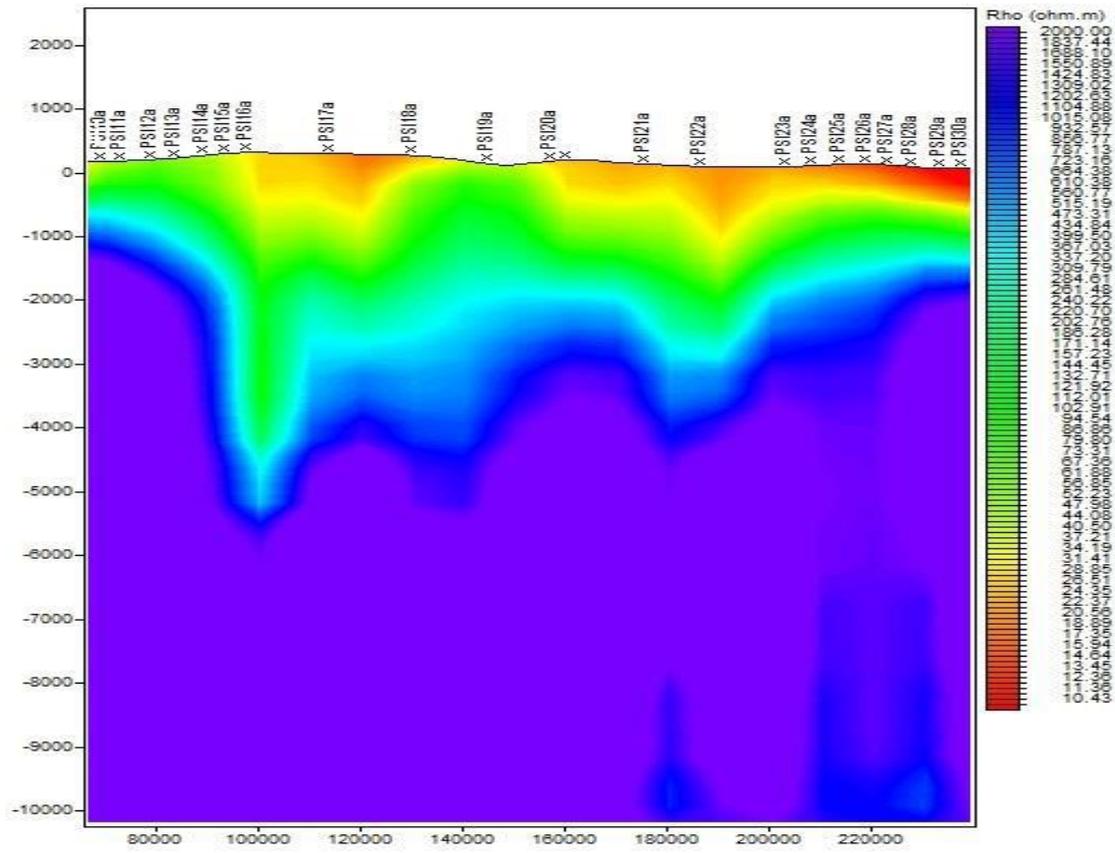
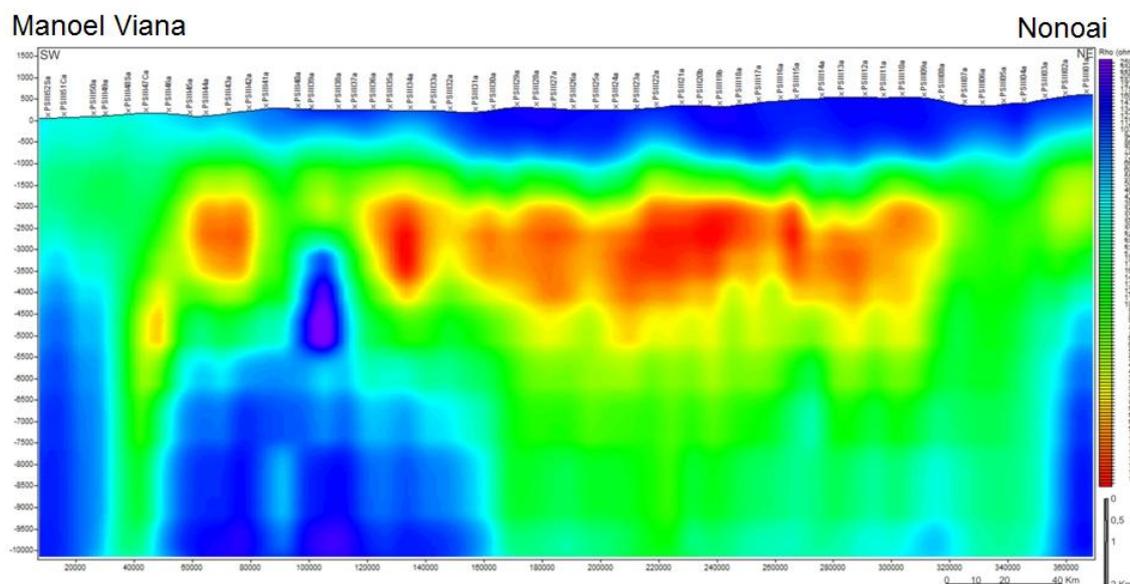


Figura 15b. Exemplo da mesma porção do perfil PS-I, porém suavizado.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Modelamento 2D do Perfil PS-III

O perfil PS-III foi constituído por 50 estações, todas elas com um espaçamento de 7 km entre cada uma delas, a primeira sendo em Nonoai e a última em Manoel Viana (fig. 16).



**Figura 16.** Modelamento 2D do perfil PS-III, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade.

#### Descrição do Perfil PSIII:

O perfil PS-III, tem um comportamento menos homogêneo que o PS-II, porém relativamente mais simples que o perfil PS-I. A suas estações são todas sobre a Bacia do Paraná, porém numa direção com consideráveis variações estruturais do embasamento, principalmente na porção SW do perfil. Embora tenha a mesma orientação que o PS-I, isto é, transversal à Sinclinal de Torres, as suas estações terminam antes da calha principal da Sinclinal, e, portanto carece de informações mais detalhadas da mesma, cabendo ao perfil PS-I suprir as informações estruturais da Sinclinal. Porém, o perfil PS-III fornece informações relevantes sobre a Bacia do Paraná, sobre a acurácia do método MT e sobre as variações litológicas do pacote sedimentar da Bacia (fig. 17).

Analisando o topo do perfil, vemos na borda SW um sinal de resistividade em torno de 30 Ohm.m, que através da correlação com o mapa geológico da região que se trata de rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Em direção ao centro do perfil, a partir da estação PS-III46a, o valor de resistividade aumenta consideravelmente, sendo em torno de 100 a 150 Ohm.m, e podemos concluir através do mapa geológico e de afloramentos, que é o início dos derrames vulcânicos da Fm. Serra Geral, que vão cobrir o perfil até a borda NE do perfil, com valores de resistividade bem homogêneos, indicando derrames maciços. Os derrames alcançam profundidades de até 1000m abaixo do nível do mar, e a espessura dos derrames atinge 1500m segundo as informações deste perfil. As maiores profundidades e espessuras do derrame ficam na porção NE do perfil.

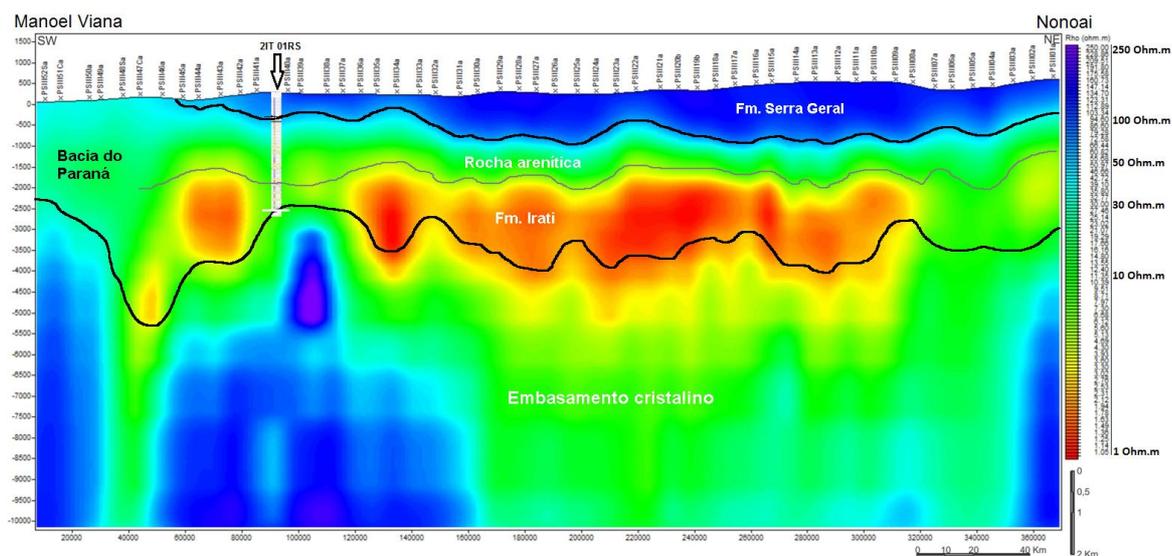
Abaixo da cobertura vulcânica, estão as rochas sedimentares da Bacia do Paraná, com valores típicos de rochas com baixa resistividade, variando de 1 Ohm.m a 40 Ohm.m. Essas variações estão associadas com o tipo da rocha, e sua alteração. Arenitos tem uma resistividade maior que as rochas pelíticas, e podemos averiguar essa diferença claramente no PS-III e diferenciar dois pacotes distintos dentro da porção sedimentar da Bacia. As rochas pelíticas possuem a resistividade muito baixa, sendo menor que 10 Ohm.m. Com o auxílio de furos de sondagem na região podemos averiguar que se trata da Fm. Irati, que contém folhelhos em abundância. Acima da Fm Irati, até a cobertura vulcânica, há rochas com resistividade acima de 10 Ohm.m, podendo assim presumir-se a ocorrência predominante de arenitos, principalmente da Fm. Botucatu que antecede a Fm Serra Geral, e isso é confirmado pelos furos de sondagem da região. A espessura do pacote sedimentar da Bacia varia entre 2000 a 3000m na maior parte do perfil, porém chegando a 5000m na porção SW, entre as estações PS-III46a e PS-III48a.

#### Testemunhos de sondagem:

Na região do perfil PS-III, havia no banco de dados da CPRM um testemunho de sondagem que estava próximo o suficiente do perfil para ser utilizado como referência na delimitação litológica. O testemunho é o 2IT 01RS, entre as estações PS-III40 e PS-III41.

Na interpretação do perfil, a profundidade do testemunho onde ocorria a divisão entre os derrames vulcânicos e o pacote sedimentar da Bacia do Paraná foi

marcada com um traço preto fino no perfil PSII, e a profundidade onde havia a divisão entre o pacote sedimentar e o embasamento foi marcada com um traço branco grosso. Estes limites litológicos marcados no testemunho estavam de acordo com a divisão litológica mostrada pela variação de resistividade no perfil e PSIII, denotando a precisão do método MT até aquela profundidade.

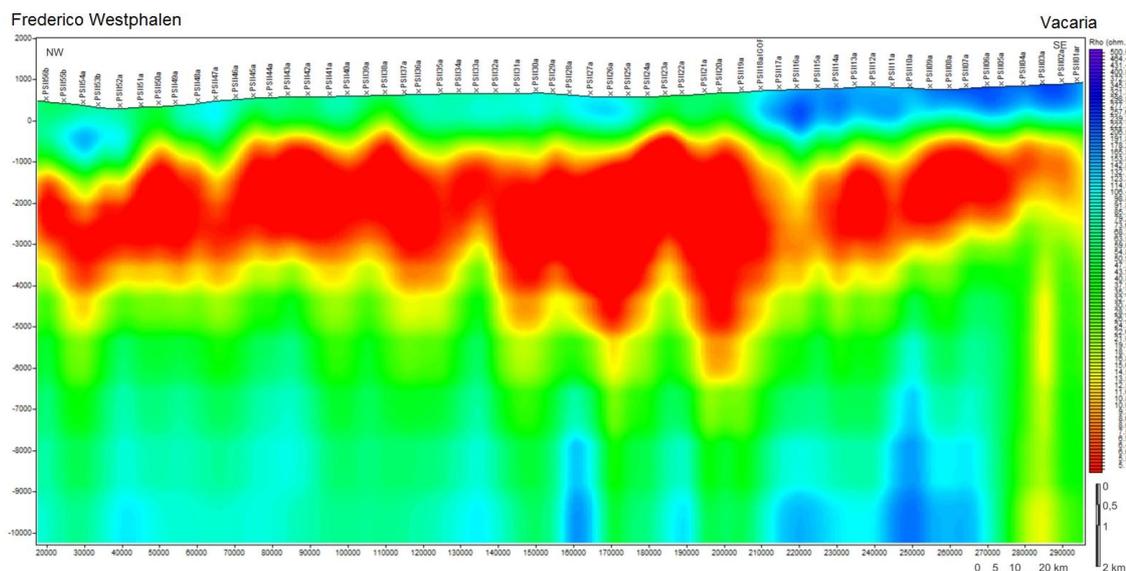


**Figura 17.** Perfil PS-III com a interpretação litológica e testemunho de sondagem.

O topo do embasamento cristalino que sustenta a Bacia tem uma profundidade de 2500 a 3500m abaixo do nível na maior parte do perfil, porém, onde o pacote sedimentar é mais espesso, na borda SW entre as estações PS-III46a e PS-III48a, ele chega a 5400m abaixo do nível do mar.

#### 4.2. Modelamento 2D do perfil PS-II

O perfil PS-II foi constituído por 54 estações, todas elas com um espaçamento de 5 km entre cada uma delas, sendo a primeira estação na cidade de Vacaria e a última na cidade de Frederico Westphalen – RS (fig. 18).



**Figura 18.** Modelamento 2D do Perfil PS-II, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade.

#### Descrição do perfil PS-II:

O perfil PS-II possui um comportamento muito homogêneo, típico de bacia sedimentar. Isso se deve ao fato de ter todas as suas estações sobre a Bacia do Paraná e numa direção que apresenta poucas variações estruturais (fig. 19).

A primeira feição que se destaca é a cobertura de alta resistividade, que cobre todo o perfil, com valores variando de 50 Ohm.m a 500 Ohm.m. Como todo o perfil PS-II foi feito sobre a Fm. Serra Geral, sabemos que se trata de uma cobertura puramente vulcânica. Embora sejam derrames relativamente maciços, a variação da resistividade pode ocorrer por diversos fatores, sendo dois principais: o primeiro é o alto grau de fraturamento ou porosidade da rocha com preenchimento aquoso ou alteração hidrotermal da mesma, desta forma tornando a rocha menos resistiva em certas porções dos derrames em relação às porções de rocha vulcânica inalterada. O segundo é a variação composicional, que no caso da Fm. Serra Geral costuma ser entre basalto e em menor escala a ocorrência de riolitos. O riolito por conter maior grau de sílica, um mineral de baixa condutividade elétrica e menor susceptibilidade a alteração que os argilominerais e piroxênios contidos nos basaltos, tende a ter uma resistividade maior que este. A profundidade que os derrames alcançam não varia bruscamente, sendo em torno de 300-600m de profundidade abaixo do nível do mar, porém com uma maior profundidade no

extremo NW do perfil, onde alcança 1200m abaixo do nível do mar. A espessura máxima que o pacote vulcânico atinge, segundo o perfil, é em torno de 1600m de espessura.

Abaixo desta cobertura vulcânica, temos a porção sedimentar da Bacia do Paraná. Os valores da resistividade desta porção variam entre 5 Ohm.m a 40 Ohm.m, que são valores baixos. Isso se deve ao fato de a rocha sedimentar ter maior porosidade e/ou argilominerais, propiciando o preenchimento da rocha com fluidos e a alteração hidrotermal, que aumentam a condutividade da rocha. Nas bordas SE e NW do perfil a espessura é relativamente menor do que na porção central do perfil. Nas bordas a espessura do pacote sedimentar varia em torno de 2000 a 3000m de espessura, já na porção central do perfil, mais especificamente entre as estações PSII-18 a PSII-31, a espessura de rocha sedimentar chega a 4500m.

Abaixo, sustentando o pacote sedimentar está o embasamento cristalino. Os valores de resistividade deste, segundo o perfil MT, variam de 50 Ohm.m a 500 Ohm.m. Segundo este levantamento, a profundidade do topo do embasamento chega a 2000m abaixo do nível do mar, na borda SE do perfil, 4500m na porção central, onde o pacote sedimentar é mais espesso, e em torno de 3500m abaixo do nível do mar na borda NW do perfil.

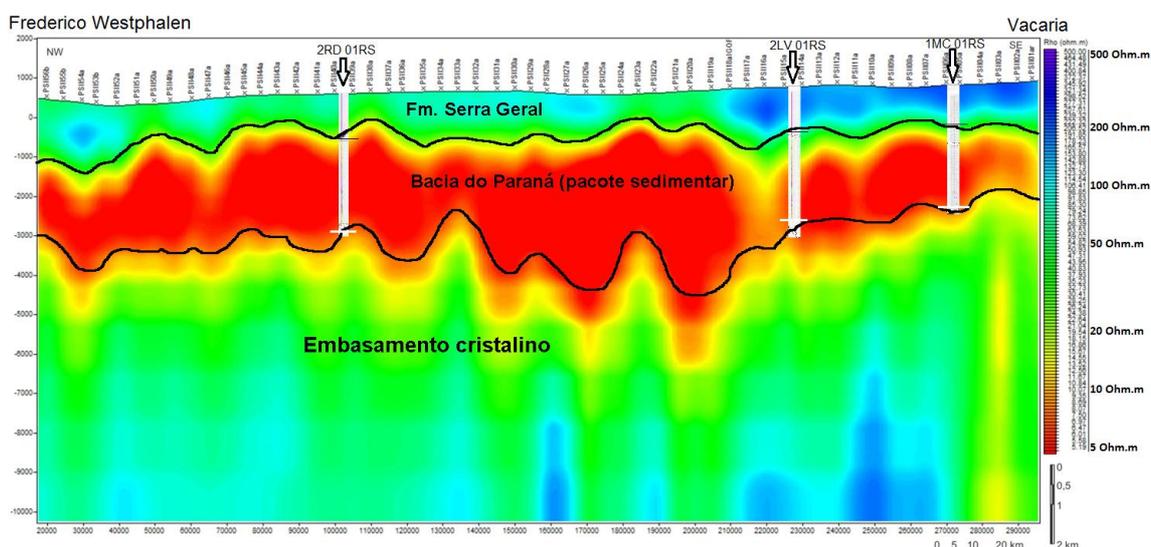
O perfil PS-II está em posição paralela à Sinclinal de Torres, e, portanto fornece menos informações sobre a sua estrutura do que o perfil PS-III que está perpendicular à Sinclinal, e principalmente que o perfil PS-I que está perpendicular à Sinclinal e possui melhor posicionamento e maior número de estações que o perfil PS-III. Portanto a análise estrutural de maior detalhe da PS-II não é útil ao objetivo principal deste trabalho.

#### Testemunhos de sondagem:

Na região do perfil PS-II, havia no banco de dados da CPRM três testemunhos de sondagem que estavam próximos o suficiente do perfil para serem utilizados como referência na delimitação litológica.

O primeiro é o 1MC 01RS entre as estações PSII05 e PSII06, o segundo é o 2LV 01RS entre as estações e PSII14 e PSI15I e o terceiro é o 2RD 01RS entre as estações e PSII39 e PSII40.

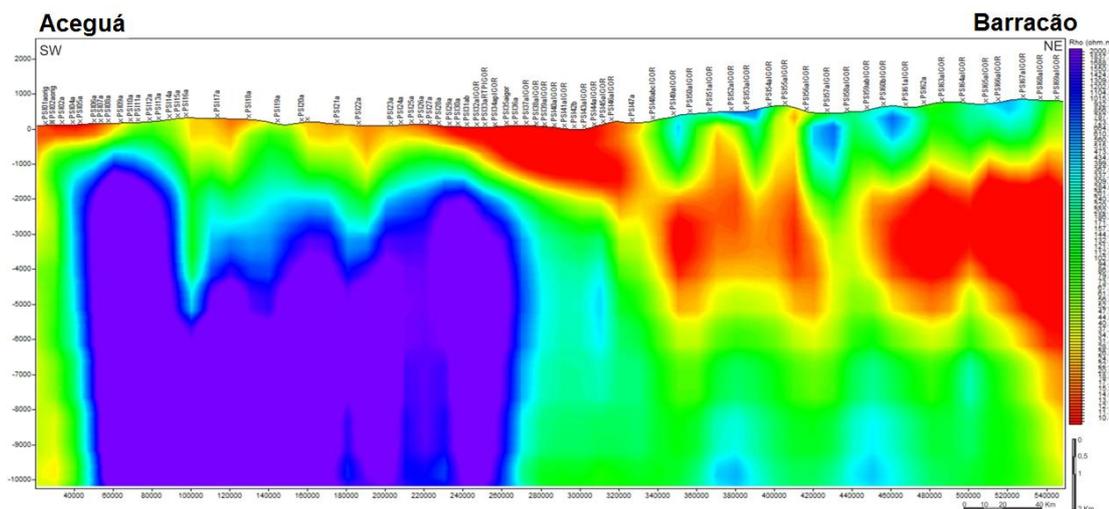
Na interpretação do perfil, a profundidade do testemunho onde ocorria a divisão entre os derrames vulcânicos e o pacote sedimentar da Bacia do Paraná foi marcada com um traço preto fino no perfil PSII, e a profundidade onde havia a divisão entre o pacote sedimentar e o embasamento foi marcada com um traço branco grosso. Todos estes limites litológicos marcados nos testemunhos estavam de acordo com a divisão litológica mostrada pela variação de resistividade no perfil PSII, denotando a precisão do método MT até aquela profundidade.



**Figura 19.** Perfil PS-II com a interpretação litológica e testemunhos de sondagem.

#### 4.3. Modelamento 2D do Perfil PS-I

O perfil PS-I foi constituído por 68 estações, que tiveram início na cidade de Aceguá - RS e terminaram na cidade de Barracão – SC. O espaçamento entre cada estação variou de 5 km, 10 km ou 15 km, dependendo do grau de detalhamento que era visado em cada região e da complexidade geológica (fig. 20).



**Figura 20.** Modelamento 2D do Perfil PS-I, não interpretado. Cores quentes representam alto valor de resistividade e cores frias representam baixo valor de resistividade.

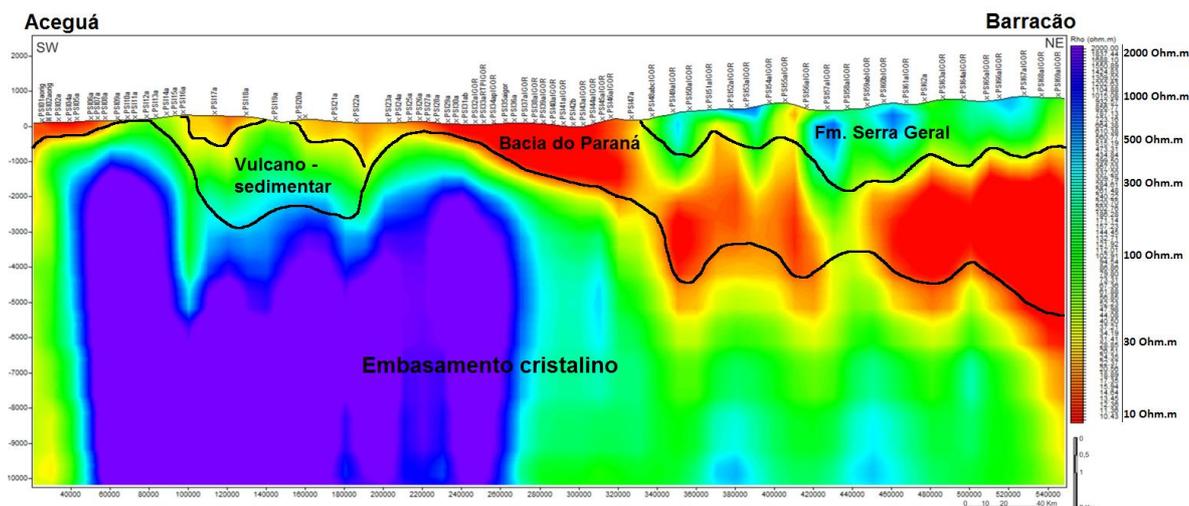
#### Descrição geral do perfil PS-I:

A primeira feição que chama atenção ao interpretarmos o perfil, é o grande domo de cor azul forte, que representa alta resistividade, superior a 1000 Ohm.m. Pode ser inferido pela profundidade e pelo alto valor resistivo que se trata do embasamento, e pela posição geológica e pelo formato em domo, que se trata do Arco de Rio Grande, uma feição anticlinal relacionada à Sinclinal de Torres. No perfil também temos muitas porções de cor amarelo e vermelha, que representa uma resistividade muito baixa, entre 30 a 10 Ohm.m, que podem ser imediatamente interpretadas como porções sedimentares. Entre os extremos azul e amarelo-vermelho ocorre faixas de cor verde, um valor de resistividade mediana, de 80 a 150 Ohm.m, cuja interpretação requer mais atenção, pois são áreas transicionais entre embasamento, rochas sedimentares ou cobertura vulcânica, e portanto requerem um conhecimento geológico mais detalhado da área para que a classificação e a delimitação do pacote seja feita de forma plausível. Na superfície SW do perfil PSI, a porção verde alcança a superfície, e através de mapas geológicos da área correspondente pode ser concluído que se trata de porções aflorantes do embasamento. Logo à direita (seguindo em direção NE) dessa faixa verde que atinge a superfície, temos feições amarela-vermelhas e um pouco de verde, que representam rochas vulcano-sedimentares, segundo o mapa geológico da área, que pertencem a sub-bacia Guaritas, na Bacia do Camaquã (Rocha; 2015). Seguindo adiante em direção NE, a porção sedimentar ganha maiores

proporções e também atinge a profundidades maiores, e, portanto pode ser classificada como o início da borda da Bacia do Paraná, que coincide com o mapa geológico da CPRM. Acima dessas faixas espessas de cor vermelha, chegando à superfície, há faixas verdes com algumas manchas azuis, começando na estação PSI-47 e seguindo até a borda NE do perfil PS-I, uma resistividade que varia de 100 a 500 Ohm.m, um valor consideravelmente maior que a resistividade da Bacia, e através do mapa geológico pode ser concluído que são as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral, que permanecem cobrindo a superfície até o final do perfil PSI, na cidade de Barracão. Na porção NE, na parte inferior do perfil, o pacote sedimentar se torna mais espesso e bem profundo, e isso é a principal evidência da Sinclinal de Torres, o foco deste trabalho.

#### Caracterização do embasamento do perfil PS-I:

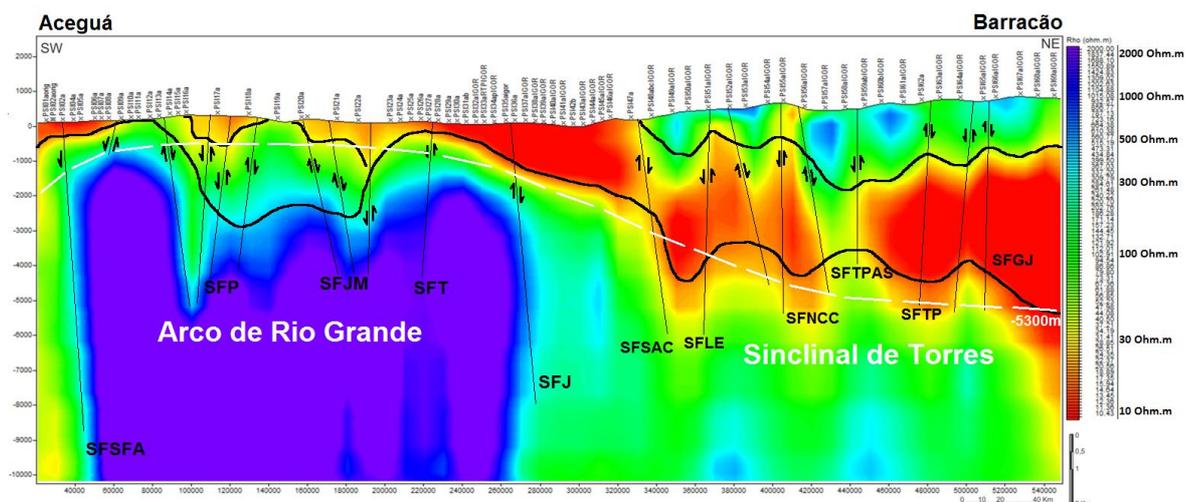
Em relação ao embasamento, a sua profundidade varia bastante no perfil PS-I. No lado SW do perfil, entre as estações 01 e 09, ele está relativamente raso, variando de 100 a 600m de profundidade, se tornando aflorante na estação 10 até a estação 12, onde inicia-se a sub-bacia Guaritas inserida na Bacia do Camaquã (Rocha, L. M. 2015). Na Bacia do Camaquã o embasamento atinge a profundidade de até 2800m, segundo os dados MT do perfil PS-I. Seguindo em direção NE, após o sistema de falhas Encruzilhada do Sul (SFES) o embasamento se torna mais raso novamente, variando entre 1000 a 300m de profundidade. A partir da estação 28, inicia-se a Bacia do Paraná, e sua profundidade vai aumentando gradativamente, com feições de escalonamento causado por diversas falhas normais de alto ângulo e sub-verticais. Na estação 47, onde inicia-se os derrames da Fm Serra Geral, o embasamento encontra-se a uma profundidade de 2500m, segundo os dados MT, e continua se aprofundando em direção NE até a borda do perfil PS-I na cidade de Barracão, onde a profundidade do embasamento atinge 5300m, segundo a interpretação dos valores de resistividade. Esta feição Sinclinal que inicia-se na estação 20 e segue até o extremo NE do perfil PS-I é a evidência principal da Sinclinal de Torres (Rolim et al; 2014). O perfil PS-I com a interpretação litológica está mostrado na figura 21. Em anexo, no final deste trabalho, estão os três perfis, PS-III, PS-II e PS-I interpretados (figs. 17, 19, 21 e 22), ocupando a página inteira para uma melhor visualização (página 55).



**Figura 21.** Modelamento 2D do Perfil PS-I, com interpretação litológica.

### Caracterização estrutural do perfil PS-I:

Tanto nas porções de alta resistividade do perfil, como nas de média a baixa resistividade, há diversas discontinuidades, escalonamentos e por vezes as feições variam abruptamente no sentido vertical/diagonal. Isso pode ser caracterizado como grandes falhas (fig. 22), e uma vez que elas são localizadas no mapa geológico, pode-se saber especificamente a que sistema de falhas pertencem. O primeiro grande sistema de falha visível, partindo de Aceguá, está na região das estações 02 e 09, relacionado à borda SW do Arco de Rio Grande, e foi caracterizado (Rolim S.B.A; Philipp, R; Lugão, P. et al., 2014) como sendo o sistema de falhas São Francisco de Assis (SFSFA). Após, entre as estações 13 e 19 está o sistema de falhas Piratini (SFP). Seguindo a NE, entre as estações 20 e 23, ocorre o sistema de falhas Jaguari - Mata (SFJM) e entre as estações 27 e 28 esta o sistema de falhas Encruzilhada do Sul (SFES). Já na borda NE do domo, foi caracterizado o sistema de falhas Jacuí (SFJ), entre as estações 35 e 36. Seguindo em direção NE, inicia-se os sistemas de falhas que contém relação íntima à geologia estrutural da Bacia do Paraná, e o primeiro deles a ser caracterizado no perfil PSI-I ocorre entre as estações 47 e 48, e foi caracterizado como sendo o sistema de falhas Santo Ângelo – Canoas (SFSAC). Após, entre as estações 51 e 52, localiza-se o sistema de falhas Lajeado – Estreito (SFLE). Entre as estações 54 e 56 está o sistema de falhas Não Me Toque – Capão da Canoa (SFNCC).



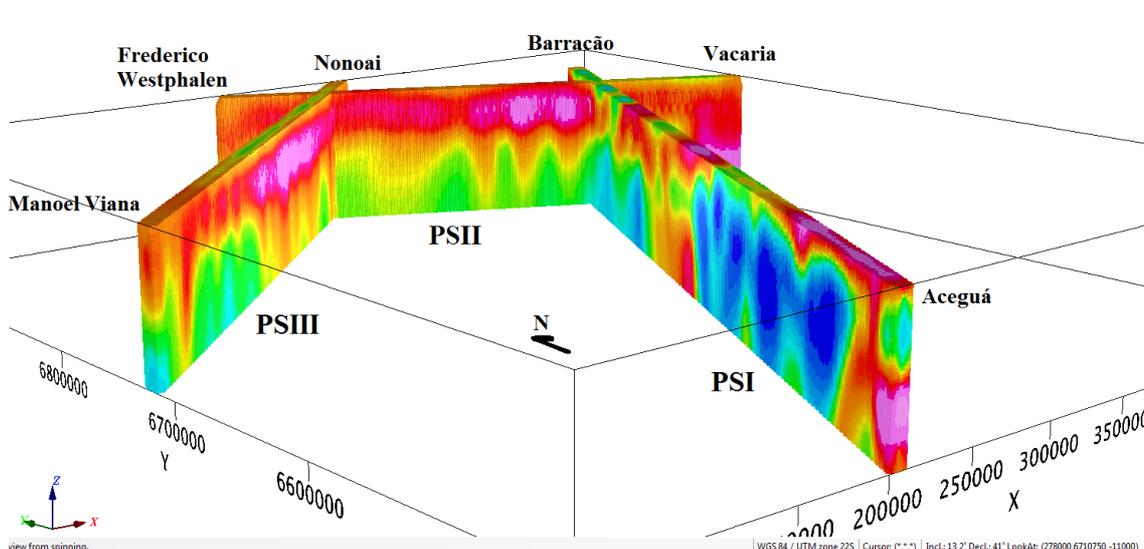
**Figura 22.** Modelamento 2D do perfil PS-I, com delimitação litológica e sistemas de falhas (em preto) e com a geometria do Arco de Rio Grande e a Sinclinal de Torres (em branco).

Seguindo a NE, sobre os derrames vulcânicos da Fm. Serra Geral, temos o sistema de falhas Três Passos – Arroio do Sal (SFTPAS), entre as estações 58 e 59. Entre as estações 62 e 63 temos o sistema de falhas Torres-Posadas (SFTP), que compõe o lineamento Torres-Posadas, que atravessa o estado inteiro, e é o principal indicativo da orientação da Sinclinal de Torres (Soares et al. 2015). Por último, no extremo NE do perfil PS-I, ocorre o sistema de falhas Gaurama – Jaquirana (SFGJ), entre as estações 64 e 66. O perfil PS-I com a interpretação estrutural, sistemas de falhas e localização da Sinclinal de Torres e do Arco de Rio Grande é mostrado na figura 22.

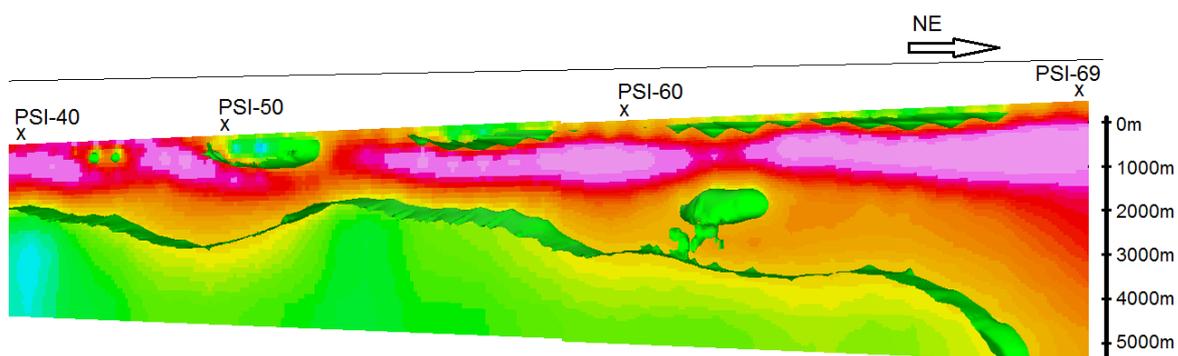
#### 4.4. Modelamento 3D

Após o modelamento 2D ter sido feito e analisado, é possível fazer o modelamento 3D usando o software Geosoft. Desta forma podemos integrar os três perfis 2D, georreferenciá-los e analisá-los no mesmo mapa. Assim, o ponto de intersecção entre os três perfis fica visível, e desta forma temos a noção tridimensional do comportamento da resistividade, e como consequência também obtemos compreensão do comportamento 3D do embasamento, da bacia sedimentar e da cobertura vulcânica da Bacia do Paraná. Além da compreensão de continuidade que observamos nas intersecções entre os perfis, temos uma visão lateral da resistividade obtida pelos perfis que não é possível visualizar no

modelamento 2D (fig. 23). Outra ferramenta útil no Geosoft, é a possibilidade de demarcar iso-superfícies. No caso do perfil PSI, deixamos apenas o modelamento 2D visível no geosoft e escolhemos apenas determinado valor de resistividade para aparecer tridimensionalmente, e dessa forma poder isolar o comportamento de determinada camada. Neste caso (fig. 24), foi selecionado um valor de resistividade que corresponde ao limite entre a porção sedimentar da Bacia do Paraná e o embasamento. Esta escolha foi feita com o intuito de isolar e salientar apenas o comportamento da feição estrutural que melhor evidencia a geometria da Sinclinal de Torres.



**Figura 23.** Modelamento 3D do PSI, PSII e PSIII no Geosoft. Cores frias representam alta resistividade e cores quentes representam baixa resistividade.



**Figura 24.** Modelamento 2D do perfil PS-I, com iso-superfície 3D da resistividade correspondente ao limite entre a porção sedimentar e o embasamento (superfície ondulada de cor verde) focando a porção norte, onde é possível ver a calha principal da Sinclinal de Torres marcada pela iso-superfície.

#### 4.5. Orientação da Sinclinal de Torres

Na literatura, a Sinclinal de Torres é caracterizada como tendo orientação NW, com azimute (az) de aproximadamente  $315^\circ$  descrito por autores com Zalan, (1990) e Soares, Machado, Hasui (2012), sendo a mesma orientação do lineamento Torres-Posada, suposta evidência em superfície da Sinclinal de Torres.

Para corroborar o método MT na caracterização da Sinclinal, faz-se necessário a correlação com outros métodos. Para a diferenciação litológica e a definição de limites estratigráficos, os testemunhos de sondagem, mapas geológicos e afloramentos em campos são os principais meios usados para a correta interpretação dos perfis de MT. Porém no que se refere à orientação da Sinclinal, temos de correlacionar com mapas que usem outras propriedades geofísicas, buscando padrões que possam evidenciar a orientação da Sinclinal. Neste trabalho, foi utilizado um mapa gravimétrico e um mapa de fluxo geotérmico da região com o intuito de localizar padrões de propriedades geofísicas que corroborem a orientação com Az.  $315^\circ$  já documentada.

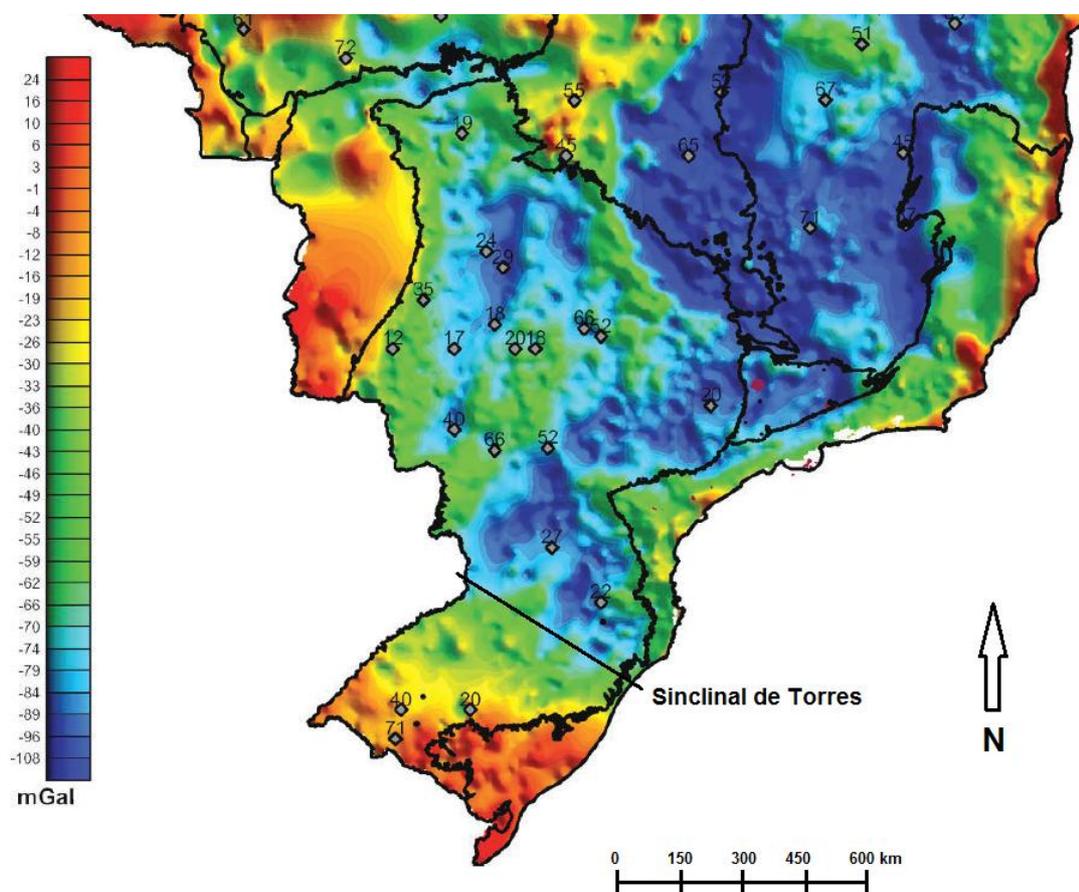
##### Mapa gravimétrico:

Como está evidente no mapa de Anomalia Bouguer (fig. 25), a região da Sinclinal de Torres encontra-se em uma região de anomalia negativa, típico de regiões com espessa camada sedimentar (Menezes; 1986). Toda a extensão por onde ocorre a calha principal da Sinclinal de Torres segundo a bibliografia atual, tem um valor relativamente constante, entre -80 a -60 MGal, reforçando a hipótese da homogeneidade de um corpo sedimentar espesso e corroborando que a orientação da Sinclinal de fato é o que está registrado bibliograficamente, que é com azimute em torno de  $315^\circ$  (Zalan et al; 1990).

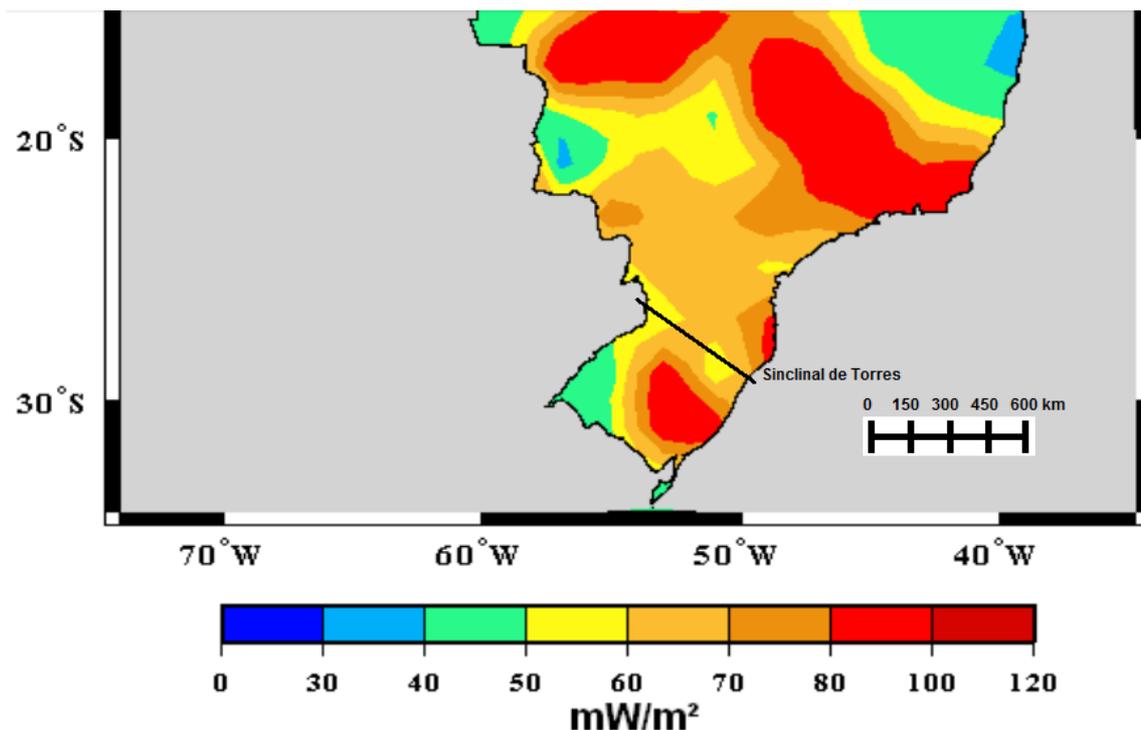
##### Mapa de fluxo geotérmico:

Neste mapa (fig. 26), é possível ver que na região da Sinclinal de Torres, o valor de fluxo geotérmico segue um *trend* constante, cujo valor fica entre 50 a 70 mW/m<sup>2</sup>. Este valor é relativamente baixo, algo típico a espessas camadas sedimentares, onde a porosidade da rocha torna-a uma condutora ineficiente do calor geotermal (Hamza; 2010). Assim como o mapa de Anomalia Bouguer, o mapa de fluxo geotérmico reforça a hipótese de a Sinclinal de Torres ter uma orientação de Az.  $315^\circ$  a partir da cidade de Torres. Seria precipitado assumir que a Sinclinal

tem essa orientação apenas pelo fato de haver isócronas nesta orientação de acordo com o mapa de Anomalia Bouguer e com mapa de fluxo geotérmico, porém é extremamente razoável usá-los como métodos de corroboração de hipóteses embasadas em estudos anteriores, principalmente no que se refere aos estudos do lineamentos de Torres-Posadas (Cordani e Vandomos; 1967 e Vitorello e Padilha; 2000) e da sua orientação ser paralela ao Arco de Rio Grande e de Ponta Grossa (Almeida 1983, Zalán 1990, Machado et al; 2012).



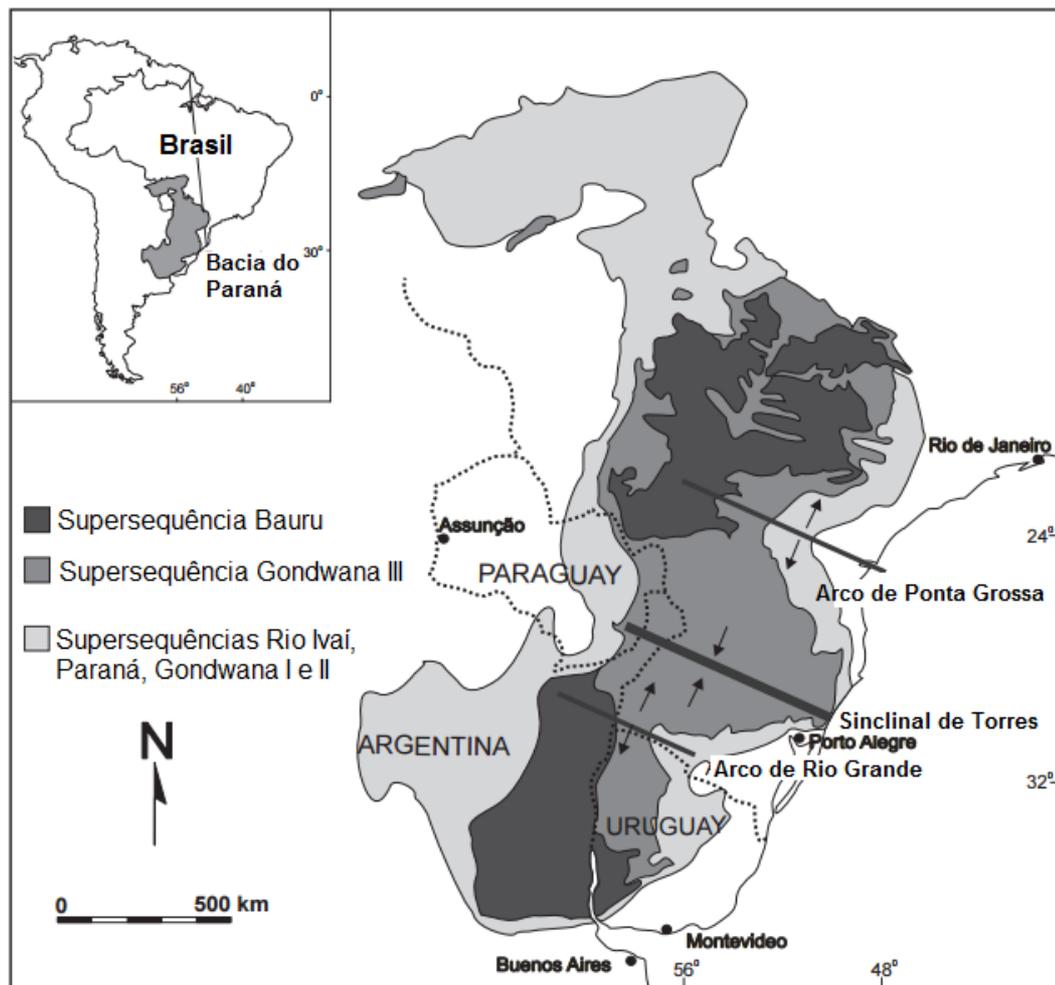
**Figura 25.** Mapa de anomalia Bouguer da região Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil, com destaque para a Sinclinal de Torres traçada em preto. (Modificado de Ussami et al; 2013).



**Figura 26.** Mapa do fluxo geotérmico na região Sul e Sudeste do Brasil, com destaque para a Sinclinal de Torres traçada em preto (modificado de Hamza; 2010).

#### 4.6. Discussões

Através do perfil PS-I foi possível a caracterização da geometria da Sinclinal de Torres na região central e norte do RS, porém a direção precisa da mesma não é possível através de apenas um perfil. Sabemos que a Sinclinal tem orientação SE-NW, porém o azimute exato não é evidenciado pelo perfil PS-I. Existe duas hipóteses principais da orientação da Sinclinal na literatura, a mais antiga e utilizada é a de Zalan et al; (1990) (fig. 4), que é corroborado por trabalhos como Soares, Machado, Hasui; (2012) e Magalhães; (2009), que indica a Sinclinal como tendo um azimute aproximado de  $315^\circ$  a partir da cidade de Torres, orientado com o lineamento Torres-Posada de Az.  $317^\circ$  (Cardozzo; 2011), que seria a principal evidência visível em superfície da Sinclinal. Porém, um trabalho recente, de Waichel et al; (2011) (fig. 27), sugere que a Sinclinal teria Az.  $295^\circ$  a partir da cidade de Torres.



**Figura 27.** A Sinclinal de Torres com uma orientação discretamente diferente da usual, com um azimute aproximadamente de  $295^\circ$  (Modificado de Waichel et al; 2011).

Embora a divergência seja de apenas  $20^\circ$  entre as duas suposições, dada a extensão da Sinclinal de Torres, a diferença final na extremidade NW da mesma se torna consideravelmente grande, se for comparada as suposições destes autores. Neste quesito os dados de MT tem muito a colaborar, pois o perfil PS-III, que está paralelamente alinhado com o PS-I, não registra feição significativa da Sinclinal de Torres, indicando que a calha principal da Sinclinal está mais ao norte da primeira estação da PS-III, próximo a cidade de Nonoai, no norte do RS. Na suposição de que a Sinclinal segue o Az.  $315^\circ$ , então de fato ela não passará por esta região do estado, já estando no estado de Santa Catarina na longitude da cidade de Nonoai, justificando a ausência de feições da Sinclinal no perfil PS-III. Porém, na suposição de Waichel; (2011), onde o Az. da Sinclinal é aproximadamente  $295^\circ$ , então teoricamente a Sinclinal cruzaria o perfil PS-III, e se este fosse o caso, é esperado

que teríamos a feição da calha principal da Sinclinal de forma similar ao perfil PS-I. Dada a ausência destas feições, os dados de MT reforçam a orientação da Sinclinal proposta nos trabalhos de Zalan et al; (1990), com Az. aproximado de  $315^{\circ}$  a partir da cidade de Torres.

Outra questão levantada pelas dados MT adquiridos pelos perfis, refere-se a profundidade do embasamento na Bacia do Paraná. Segundo a literatura (Fig. 3, Milani; 1997), é suposto que o embasamento na região do perfil PS-I, onde foi caracterizada a geologia estrutural da Sinclinal de Torres, teria no máximo 3000m de profundidade. Porém, o valor mostrado pelo perfil PS-I, na porção mais profunda da Sinclinal de Torres no extremo NE do perfil, chega a 5300m. A diferença de valor é considerável, e os dados obtidos através do MT tiveram extrema precisão até a profundidade onde os testemunhos de sondagem da região estudada alcançaram, que foi em torno de 2900m. É esperado que tal precisão fosse mantida mesmo em profundidades mais elevadas, considerando que os dados de MT facilmente adquirem informações de resistividade de rochas a 20 km de profundidade. Existe então a hipótese de a Sinclinal de Torres atingir profundidades antes desconhecidas nos registros bibliográficos, ou, a espessura da Bacia do Paraná como um todo, foi subestimada, uma hipótese que já foi levantada anteriormente (Ussami et al; 2008), que através de dados adquiridos por satélite da Anomalia Bouguer na Bacia, sugeriu que a espessura seria maior do que o dobro do que se supõe atualmente, devido a intrusões gabróicas na base da Bacia durante o evento vulcânico Paraná-Etendeka que teriam sido desconsideradas até então. Sendo esta uma questão que requer posterior estudo, onde os levantamentos geofísicos terão um papel determinante.

## 5. CONCLUSÕES

O MT surge como uma alternativa à sísmica e aos métodos eletro-resistivos de indução por diversos motivos (Rolim e Lugão; 2016). No caso da sísmica, além de levar mais tempo e ter maior custo para sua utilização em relação ao método MT, tem um fator limitante no caso do estudo da Bacia do Paraná, que é a espessa camada de rochas vulcânicas, que tendem a gerar uma velocidade sísmica muito maior que os pacotes sedimentares abaixo dessa camada e também em relação ao embasamento (Rosa et al; 1982). Dessa forma os sinais provenientes dos pacotes sedimentares e do embasamento cristalino chegam com pouca resolução, tornando incerta a definição de seus limites (Moritz e White; 2001). No caso dos métodos eletro-resistivos de indução, seu alcance se torna limitado e, portanto não oferece o alcance necessário para estudar questões estruturais que envolvem o embasamento cristalino e suas regiões inferiores no caso da Bacia do Paraná, pois em muitas porções desta o embasamento se encontra sob camadas muito espessas de rochas vulcano-sedimentares. Neste trabalho houve a confirmação de que o método MT pode ser usado como um substituto à sísmica neste caso específico na Bacia do Paraná.

O modelamento 2D dos perfis PS-I, PS-II e PS-III forneceram valiosas informações sobre a geologia da porção sudeste da Bacia do Paraná. Nos perfis PS-II e PS-III, com o auxílio de testemunhos de sondagem e de mapas geológicos, foi possível delimitar as litofácies com relativa precisão, sendo possível estimar as profundidades do embasamento, a espessura dos pacotes sedimentares e dos derrames vulcânicos. Porém, nestes dois perfis não havia feição significativa que indicasse a Sinclinal de Torres.

O perfil PS-I foi o mais esclarecedor dos três perfis no que concerne o foco deste trabalho, que é o arcabouço geológico-estrutural da Sinclinal de Torres. Através deste, foi possível não apenas delimitar as litofácies e estimar a profundidade do embasamento e espessura das camadas sedimentar e vulcânica como foi feito no PS-III e PS-II, mas também reconhecer as macroestruturas do Arco de Rio Grande e a calha principal da Sinclinal de Torres, além de determinar os principais sistemas de falhas correlacionados nestas grandes estruturas. Predominam as falhas de alto ângulo e sub-verticais. Na borda da Bacia do Paraná, em direção a calha principal da Sinclinal de Torres, ocorre diversas falhas

escalonadas, resultando num espessamento do pacote sedimentar em direção NE do perfil PS-I. O modelamento 3D do perfil PS-I contendo a iso-superfície do embasamento forneceu uma visualização privilegiada da calha principal da Sinclinal de Torres. A visualização dos três perfis integrados em 3D forneceu uma noção espacial e geológica da Bacia do Paraná totalmente nova literatura, com dados de profundidades que nenhum outro método havia adquirido até então.

Este trabalho serviu para corroborar a hipótese de trabalhos anteriores (Zalan 1990, Soares, Machado, Hasui 2012 e Magalhães 2009) no que se refere à orientação da Sinclinal de Torres, concluindo que a Sinclinal tem azimute aproximado de 315° a partir da cidade de Torres e está alinhada com o lineamento Torres-Posada. Além de levantar a importante questão sobre a profundidade do embasamento na porção sudeste da Bacia do Paraná, que segundo este trabalho pode chegar a 5300m, consideravelmente mais profundo do que consta nos mapas utilizados comumente (Milani 1997).

Este levantamento MT serve como uma importante base de dados para futuros estudos da Bacia do Paraná, principalmente pelo fato de ter adquirido informações em profundidades muito superiores a outros métodos. Dentre as principais pesquisas que podem ser feitas usando estes dados de MT como auxílio, está a pesquisa para potenciais depósitos não-convencionais de hidrocarbonetos, pois a caracterização tectônica de terrenos Mesozóicos e Paleozóicos é fundamental na investigação de estruturação de ambientes com potencial para geração de reservatórios não convencionais (Rolim et al. 2016). O Magneto-Telúrico (MT) é uma alternativa aos métodos sísmicos, principalmente pela grande quantidade de informações estruturais e litológicas de subsuperfície recuperadas de forma rápida e baixo custo. Neste trabalho, o método MT permitiu a caracterização de unidades abaixo da cobertura vulcânica da Formação Serra Geral com grande precisão. Desta forma, o arcabouço geológico-estrutural da Sinclinal de Torres foi definido na porção Norte do Estado do Rio Grande do Sul, servindo de base para futuros trabalhos de reavaliação do potencial para reservatórios não convencionais no sudeste da Bacia do Paraná.

## REFERÊNCIAS

Bologna, M. S.; Nunes, H. O.; Padilha, A. L.; Vitorello, I.; Padua, M. B., 2013. Anomalous electrical structure in the northwestern Parana Basin, Brazil, observed with broadband magnetotellurics. *JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS*; v. 68, n. 2, p. 231-242, JUN 2009. *Journal of South American Earth Sciences*; v.42 p. 74-82, MAR 2013.

Cardozo, T. 2011. Caracterização do Arcabouço Estrutural da Bacia de Pelotas e da Área Emersa Adjacente. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011.

Colombo, D.; Keho, T.; Janoubi, E.; Aramco, S.; Soyer, W., 2011. Sub-basalt imaging with broadband magnetotellurics in NW Saudi Arabia. SEG San Antonio 2011 Annual Meeting.

Cagniard, 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting.

Constable S. C. et al. Occams' inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *GEOPHYSICS*, VOL. 52, NO. 3 (MARCH 1987): P 289-300,

Cordani U. G. et al. Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Ciência Técnica Petróleo*, p. 1-70, 1984.

Faccini U. F. et al. Caracterização estratigráfica-petrológica integrada da formação Sergi.

Holz M.; Kalkreuth W.; Rolim S. B. A. 2010. Extension of the Parana' Basin to offshore Brazil: Implications for coalbed methane evaluation. *Marine and Petroleum Geology*, v. 27, issue 5.

Jones A.G. 1998. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics*, v. 53, n. 7, p. 967-978, 1988.

Julià, J., Herrmann, R., Ammon, C., Akinci, A., 2004. Evaluation of deep sediment velocity structure in the New Madrid zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, 334–340.

Lima E. F.; Waichel B. L.; Rossetti L. M. M.; Viana A. R.; Scherer C. M.; Bueno G. V.; Dutra G. 2012. Morphologic and Petrographical Patterns of the pahoehoe and a'a' flows of Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul State, Brazil) *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42(4), p. 744-753.

Lopes R. C. et al. Projeto a borda leste da bacia do paraná: integração geológica e avaliação econômica. Congresso Brasileiro de Geologia (34:1986: Goiânia, GO) Anais. Goiânia: SBG, 1986.

- Magalhães A. 2009. Exumação tectônica e evolução associada do relevo no Arco de Ponta Grossa, Sul-Sudeste do Brasil
- Mariani, P; Braitenberg, C; Ussami, N; 2008. Explaining the thick crust in Paraná Basin, Brazil, with satellite GOCE gravity observations.
- Milani E. J. et al. 1997; Sequences and Stratigraphic Hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brasil.
- Menezes P. T. L. 1986. Uma nova abordagem na interpretação de anomalias gravimétricas em bacias sedimentares – Exemplo da Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil
- Menezes P. T. L.; Fundamentos do Método Magnetotelúrico na Exploração de Hidrocarbonetos; Rio de Janeiro: SBGf, 2013. 208 pp.
- Moritz, M.F., White, R.S., 2001. Seismic structure of basalt flows from surface seismic data, borehole measurements, and synthetic seismogram modelling. *Geophysics* 66 (6), 1925–1936
- Philipp, R.P. ET al. Estruturação do arco de rio grande e da sinclinalde torres, bacia do Paraná, RS: evidências por levantamentos magnetotelúricos.
- Renner L. C.; Hartmann L. A. 2010. Geoquímica dos Sills Basálticos da Formação Serra Geral, Sul do Brasil, com base em rocha total e micro-análise de minerais.
- Rocha, L. M. 2015. Modelo Geológico da Sub-bacia Guaritas (Bacia do Camaquã, RS, Brasil), com base no Método Geofísico Magnetotelúrico. Dissertação - (mestrado). Unisinos, Instituto de Geociências 2015.
- Rodi, W; Mackie, R. L.; 2001. Nonlinear conjugates gradients algorythm for 2-D magnetotelluric inversion, in press. *Geophysics* 66, 174-187.
- Rolim, S.B.A. Lugão, P.; 2012. Aquisição, Processamento e Inversão 2D dos Dados Magnetotelúricos (MT) de Referência Remoto, Projeto Paraná Sul Relatório Técnico. STRATAIMAGE. 63p.
- Rolim, S.B.A.; Lugão, P. 2016. Tectonic framework of the southern portion of the Paraná Basin based on magnetotelluric method: a contribution to the understanding of unconventional reservoirs. XLVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Anais de resumos. Porto Alegre, RS.
- Rolim, S. B. A; Auler, D; Lugão, P; 2016. Constrains about oil and gas exploration in the southern portion of Parana Basin: the Torres Sinclinal Structure. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica. Anais de resumos. Ouro Preto, MG.
- Rosa, A., Tassini, J., Backus, M., 1982. Seismic data quality in a basalt covered basin. 62th SEG meeting, expanded abstracts, Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa, USA, S5.5.

Rossetti, M. M.; Lima E. F. 2014. Arcabouço Estratigráfico da Formação Serra Geral no Vale Principal da Sinclinal de Torres.

Soares, A. V. Jr., Machado, F. B., Fernandes, M. A., Souza, I. A., Hasui, Y., Morales, N. 2012. Compartimentação estrutural do sinclinal de torres e espessura crustal da região entre os arcos de ponta grossa e rio grande a partir de gravimetria. In. 46º Congresso Brasileiro de Geologia, resumo.

Spratt, J.E.; Craven, J.; 2009. Imaging the Nechako Basin, British Columbia, using Magnetotelluric Methods. Frontiers+Innovation, 2009 CSPG CSGE CWLS Convention. Calgary, Alberta, Canada.

Vitarello, I., Padilha, A. L., 2000. Mapping of high electrical conductivity on the Torres Syncline hinge, southeastern Paraná Basin. Rev. Bras. Geociências, São Paulo. V. 30, n. 3, p. 535-537.

Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method. In: Nabighian, E. (Ed.), Electromagnetic methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, pp. 641–711.

Waichel et al., 2011. Stratigraphy and volcanic architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and it's role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province.

ZALAN, P. V., WOLFF, S., CONCEICAO, J. C., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T. Bacia do Parana. In: Raja Gabaglia, G. P.; Milani, E. J. (Coords.). Origem e evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRAS, Rio de Janeiro, p.135 – 164, 1990.

Zevallos, I.; Assumpcao, M.; Padilha, A. L.. 2009. Inversion of teleseismic receiver function and magnetotelluric sounding to determine basement depth in the Parana Basin, SE Brazil. JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS; v. 68, n. 2, p. 231-242, JUN 2009.

## ANEXOS

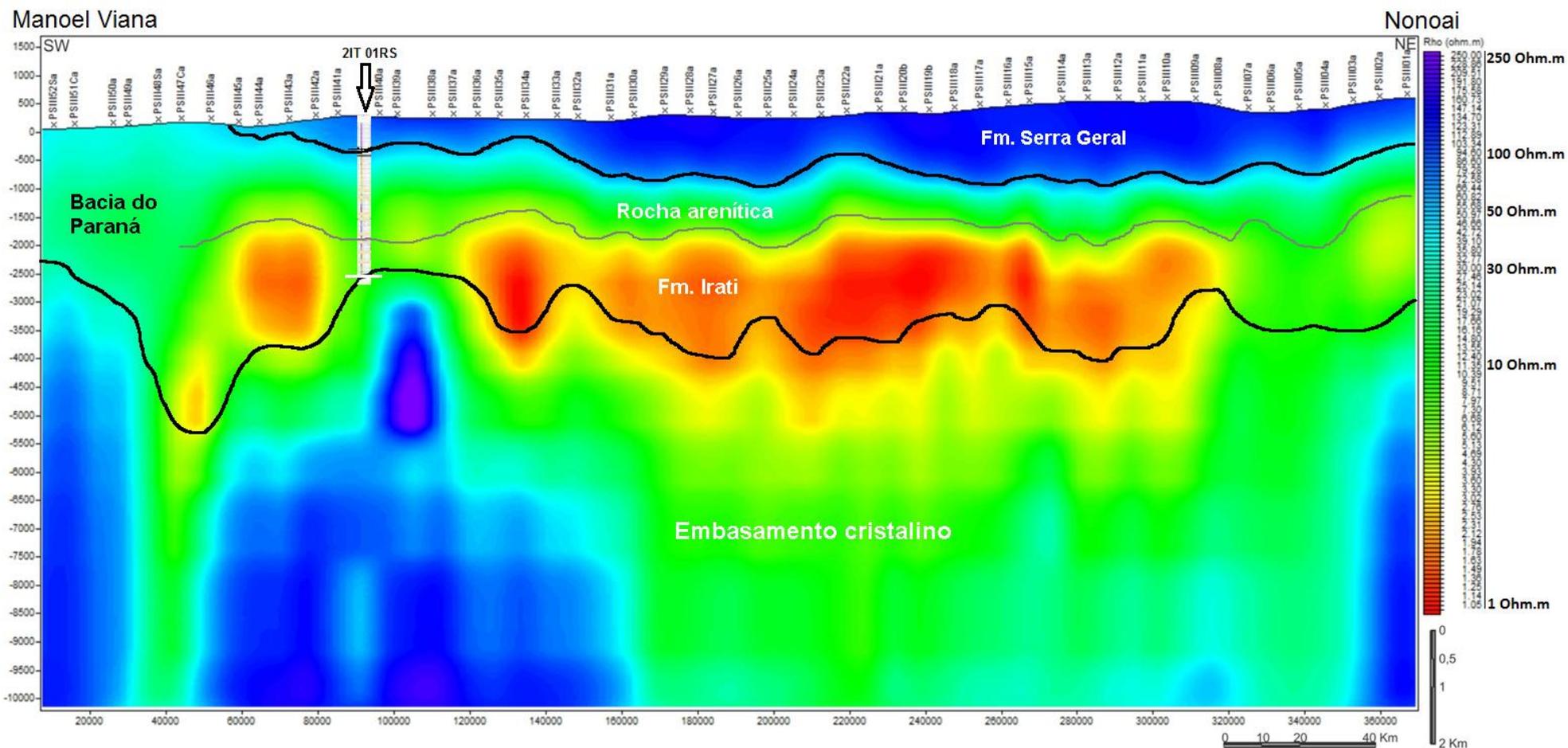


Figura 17. Perfil PS-III com a interpretação litológica e testemunho de sondagem.

Frederico Westphalen

Vacaria

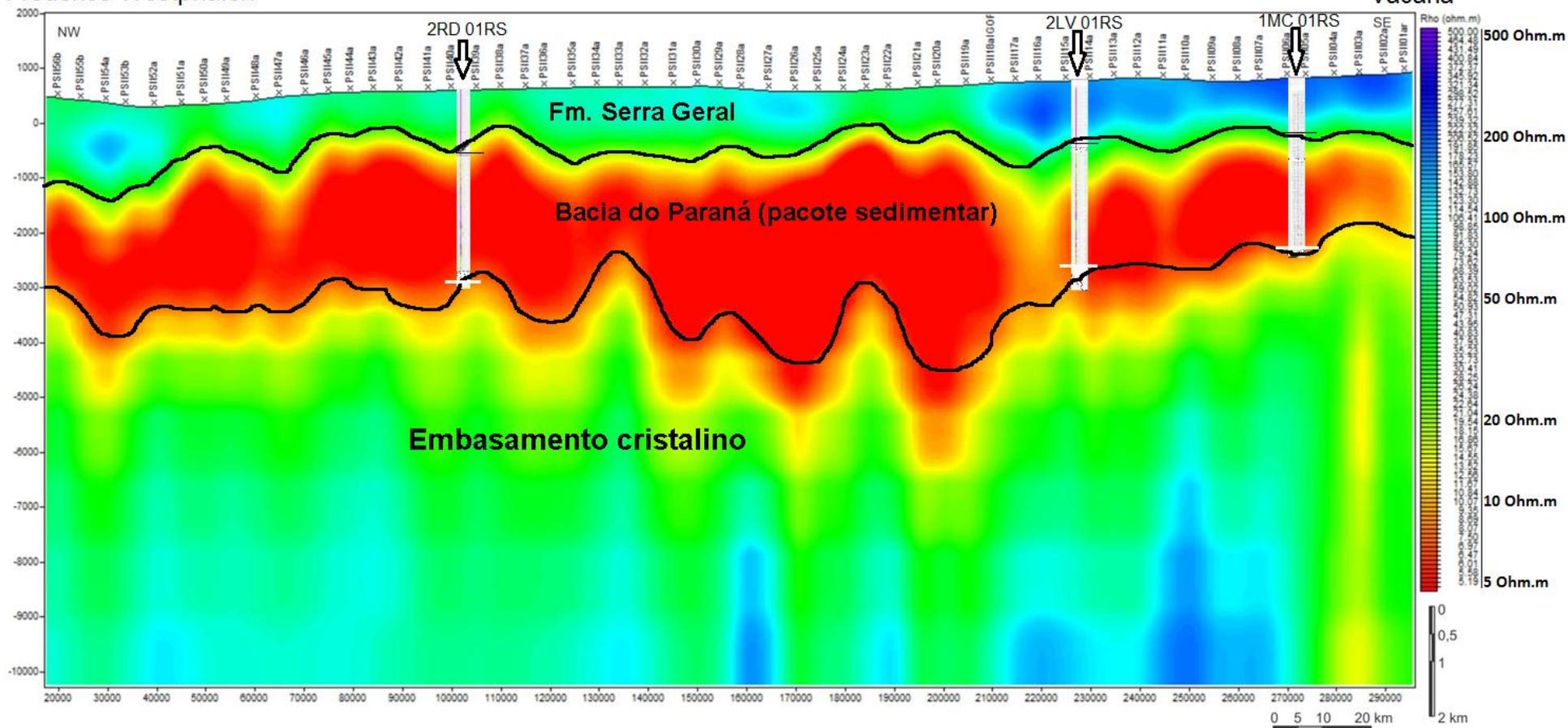
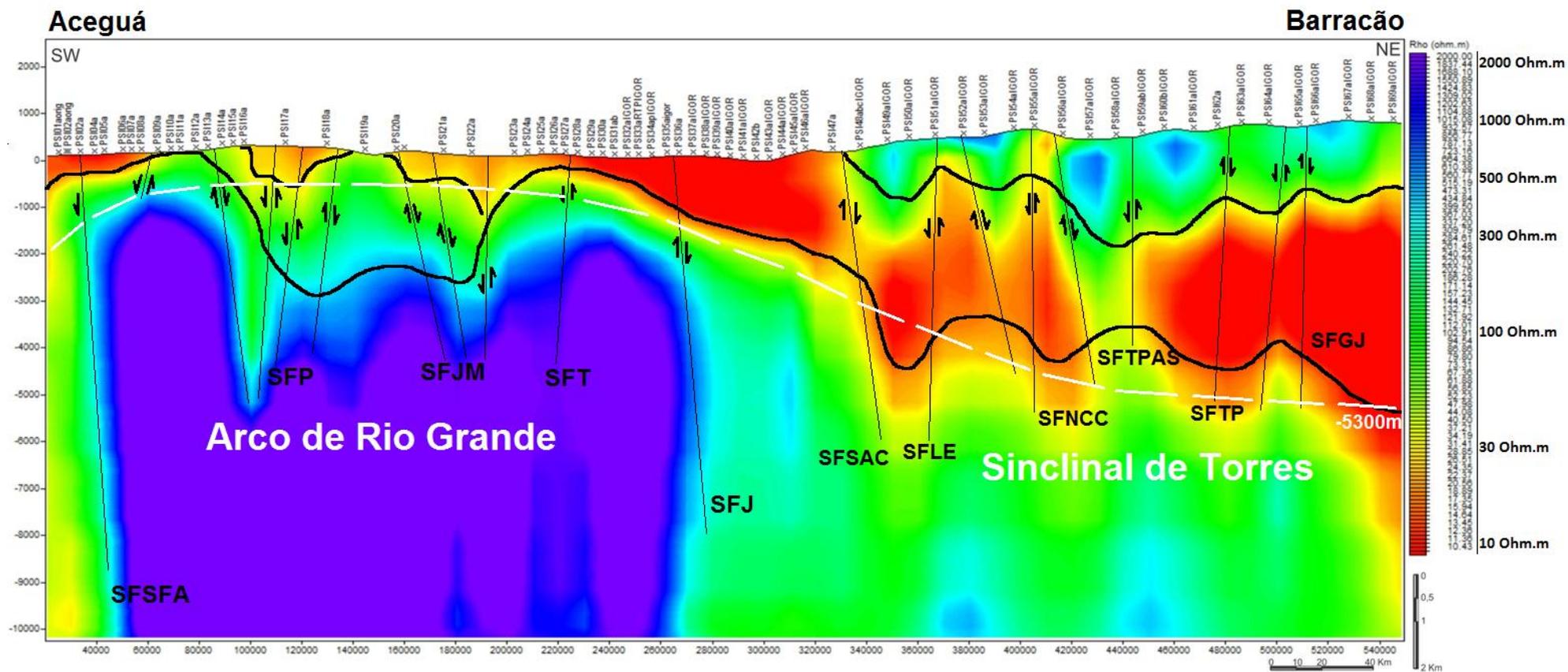


Figura 19. Perfil PS-II com a interpretação litológica e testemunhos de sondagem.





**Figura 22.** Modelamento 2D do perfil PS-I, com delimitação litológica e sistemas de falhas (em preto) e com a geometria do Arco de Rio Grande e a Sinclinal de Torres (em branco).