

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

**Caçapava do Sul  
2018**

**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
Geofísica da Universidade Federal do Pampa  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Geofísica.

Orientador: Vinicius de Abreu Oliveira

Co-orientadora: Andréa Cristina Lima dos Santos Matos

**Caçapava do Sul  
2018**

G216d Garcia, Patrick Rogger  
Desenvolvimento de Software livre para processamentos de dados magnetotelúricos / Patrick Rogger Garcia. – 2018.  
68p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2018.  
“Orientação: Vinicius de Abreu Oliveira; Coorientação: Andréa Cristina Lima dos Santos Matos”.

1. Magnetotelúrico. 2. Python3. 3. Software Livre. 4. Processamento Robusto. I. Título.

**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
Geofísica da Universidade Federal do Pampa  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica Espacial,  
Geofísica de *Software*

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30 de novembro de 2018.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Vinicius de Abreu Oliveira

Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Éverton Frigo

UNIPAMPA



---

Dr. Marcelo Banik de Pádua

INPE

*Dedico este trabalho, bem como todas as demais conquistas da minha vida, a minha esposa – Fernanda –, minha mãe – Cláudia –, minha irmã – Thairine – e minha avó – Suzana –.*

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pampa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de estudos.

Gostaria de agradecer a minha irmã – Thairine Garcia – por tornar possível os últimos 4 anos. A minha mãe Cláudia Valéria, pelo exemplo e amor que me deu.

Obrigado minha amada e mais do que tudo minha grande amiga – Fernanda Melo – por todas as horas ao meu lado, por todo o apoio e por todos os momentos desde a chuva de meteoros de novembro de 2014.

A meu grande amigo, Paulo Roberto, que conquistei ao longo destes 4 anos. Agradeço por todas as horas de conversas, principalmente sobre furos de sondagem e prospecção de ouro.

Aos meus professores pelos conhecimentos passados, principalmente ao professor Éverton Frigo, que me apresentou o mundo da programação e pelo seu carinho ao Curso da Geofísica, onde sempre esteve pronto para nos ajudar.

Também gostaria de agradecer a minha coorientadora, Andréa Matos por me apresentar o Magnetotélúrico e a todo o Grupo GEOMA do INPE. Em especial agradeço a Marcelo Banik e a Marcos Banik que concederam os programas e todo o auxílio para o desenvolvimento do PampaMT.

Ao meu orientador e amigo, Vinicius Oliveira, agradeço por sempre me ajudar e pelas ótimas sugestões nesse último ano.

Á Lenon Ilha, Matheus Cruz e Welynton Ramos, agradeço pela amizade e a disposição para os testes alfa do PampaMT.

A todos meus amigos, Fátima Nunes, Sr. Ney, a Banda Municipal Dr. Cyro Carlos de Melo, Godinho (Filipi) e meu irmão (Vinicius Geriulli) que direta ou indiretamente me ajudaram nos 4 anos da minha graduação.

E a minha avó – Suzana Simões – pelo seu amor e pelas horas de sabedoria ao telefone.

*“Most good programmers do programming not because they expect to get paid or get adulation by the public, but because it is fun to program”.*  
– (Linus Torvalds)

## RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento do *Software* PampaMT. Este programa foi desenvolvido para auxiliar e otimizar o processamento de dados do método geofísico Magnetotelúrico (MT). O método MT utiliza fontes eletromagnéticas naturais do planeta Terra para investigar a distribuição da condutividade elétrica em subsuperfície. A faixa de frequência utilizada pelo MT compreende de  $10^{-4}$  Hz a  $10^4$  Hz, possibilitando a investigação geofísica até 100 metros a 200 quilômetros de profundidade. O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python sob a licença de software Livre. O programa une inúmeros programas e rotinas, de uso livre, consagrados no processamento de dados magnetotelúrico. A utilização do programa será realizada através de uma interface gráfica amigável (GUI), facilitando assim, as etapas de processamentos para novos usuários. O que se contra põe aos programas e rotinas disponíveis atualmente para o processamento de dados que utilizam apenas linhas de comando e procedimentos excessivamente manuais para iniciantes. Tais fatores, muitas vezes torna-se exaustivo o treinamento de novos usuários e adiam a produção de resultados trabalhando com dados MT. A validação da eficiência do programa, em termos de tempo e usabilidade, foi realizada através do processamento de dados reais, localizados na região nordeste do Brasil, executados por usuários que possuem familiaridade com processamento MT, junto com testes realizados com usuários sem qualquer familiaridade. Os testes possibilitam a validação da eficiência do programa e a comparação com as técnicas já consolidadas no processamento de dados MT.

Palavras-chave: Magnetotelúrico. Python3. Software Livre. Processamento Robusto.

## ABSTRACT

This work deals with the development of PampaMT Software. This program was developed to assist and optimize the data processing of the Magnetotelluric (MT) geophysical method. The MT method uses natural electromagnetic sources from planet Earth to investigate the distribution of electrical conductivity in subsurface. The frequency range used by the MT comprises from  $10^{-4}$  Hz to  $10^4$  Hz, enabling geophysical investigation up to 100 meters to 200 kilometers deep. The program was developed using the Python programming language under the Free software license. The program unites numerous programs and routines, of free use, consecrated in the magnetotelluric data processing. The use of the program will be performed through a graphical user interface (GUI), thus facilitating the processing steps for new users. What sets it apart from the programs and routines currently available for data processing that use only command lines and excessively manual procedures for beginners. Such factors often become exhausting training for new users and delay the production of results working with MT data. The validation of the program's efficiency, in terms of time and usability, was performed through the processing of real data, located in the northeastern region of Brazil, executed by users who are familiar with MT processing, along with tests performed with users without any familiarity. The tests make it possible to validate the efficiency of the program and compare it with the techniques already consolidated in the MT data processing.

Keywords: Magnetotelluric. Python3. Free Software. Robust Processing.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Arranjo para obter a resistividade elétrica . . . . .  | 20 |
| Figura 2 – Tabela de resistividade elétrica para materiais geológicos. . . . .  | 20 |
| Figura 3 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT. . . . .   | 21 |
| Figura 4 – Gráfico do <i>skin-depth</i> . . . . .   | 25 |
| Figura 5 – Arranjo para Aquisição de dados MT. . . . .  | 27 |
| Figura 6 – Exemplo de Série Temporal dos Dados MT. . . . .  | 28 |
| Figura 7 – Aquisição de Dados Discretos. . . . .  | 29 |
| Figura 8 – Fluxograma de Pré-processamento. . . . .   | 30 |
| Figura 9 – Saída Gráfica Gerada pelo <i>script: plot-cmp-tf</i> (PÁDUA; PÁDUA, 2018),<br>utilizando o GMT. . . . .                  | 35 |
| Figura 10 – Tela Inicial PampaMT . . . . .  | 37 |
| Figura 11 – Seleção das Estações . . . . .  | 38 |
| Figura 12 – Tela de Configuração para o EMTF . . . . .  | 38 |
| Figura 13 – Tela Principal PampaMT . . . . .  | 39 |
| Figura 14 – Integração com Outros Programas . . . . .   | 40 |
| Figura 15 – Seleção dos Períodos . . . . .  | 41 |
| Figura 16 – Mapa Geológico . . . . .  | 44 |
| Figura 17 – Conversão de Dados Utilizando o PampaMT . . . . .   | 45 |
| Figura 18 – Preparação das Configurações Utilizando o PampaMT . . . . .   | 46 |
| Figura 19 – Criação e Processamento EMTF – PampaMT . . . . .  | 46 |
| Figura 20 – Plotagem utilizando o <i>script plot-cmp-tf</i> para a estação bor603b com a<br>seleção dos melhores períodos . . . . . | 47 |
| Figura 21 – Tempo Comparando o Tempo de Pré-processamento – Usuário 1 . . . . .   | 48 |
| Figura 22 – Tempo Comparando o Tempo de Pré-processamento – Usuário 2 . . . . .   | 49 |
| Figura 23 – Modelo de Regressão para Tempo de Processamento . . . . .   | 49 |
| Figura 24 – Tempo de Processamento – Teste Alfa . . . . .   | 51 |
| Figura 25 – Manual – bor603b . . . . .  | 57 |
| Figura 26 – Manual – bor604a . . . . .  | 57 |
| Figura 27 – Manual – bor604b . . . . .  | 58 |
| Figura 28 – Manual – bor605a . . . . .  | 58 |
| Figura 29 – Manual – bor605b . . . . .  | 59 |
| Figura 30 – Manual – bor606a . . . . .  | 59 |
| Figura 31 – Manual – bor606b . . . . .  | 60 |
| Figura 32 – Manual – bor607a . . . . .  | 60 |
| Figura 33 – Manual – bor607b . . . . .  | 61 |
| Figura 34 – Manual – bor608a . . . . .  | 61 |
| Figura 35 – Manual – bor608b . . . . .  | 62 |
| Figura 36 – Manual – bor608c . . . . .  | 62 |
| Figura 37 – PampaMT – bor603b . . . . .   | 63 |
| Figura 38 – PampaMT – bor604a . . . . .   | 63 |
| Figura 39 – PampaMT – bor604b . . . . .   | 64 |
| Figura 40 – PampaMT – bor605a . . . . .   | 64 |
| Figura 41 – PampaMT – bor605b . . . . .   | 65 |
| Figura 42 – PampaMT – bor606a . . . . .   | 65 |
| Figura 43 – PampaMT – bor606b . . . . .   | 66 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 44 – PampaMT – bor607a . . . . . | 66 |
| Figura 45 – PampaMT – bor607b . . . . . | 67 |
| Figura 46 – PampaMT – bor608a . . . . . | 67 |
| Figura 47 – PampaMT – bor608b . . . . . | 68 |
| Figura 48 – PampaMT – bor608c . . . . . | 68 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |  |
|-------|--|
| ASCII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i><br>– Código Padrão Norte-americano para Intercâmbio de Informações |
| API   | <i>Application Programming Interface</i><br>– Interface de Programação de Aplicações   |
| CNPq  | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  |
| EMTF  | <i>Electromagnetic Transfer Function</i>   |
| FFT   | <i>Fast Fourier Transform</i>  |
| GEOMA | Grupo de Geomagnetismo   |
| GMT   | <i>Generic Mapping Tools</i>   |
| GUI   | <i>Graphical User Interface</i><br>– Interface Gráfica do Utilizador   |
| INPE  | Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais   |
| MT    | Magnetotelúrico  |
| PIBIC | Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica   |
| SIG   | Sistema de Informação Geográfica   |
| TS    | <i>Time Series</i>   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| $\delta$ <i>Skin-depth</i>                     | $i$ Intensidade da Corrente Elétrica  |
| $\varepsilon$ Permissividade Elétrica          | $\vec{J}$ Vetor Densidade de Corrente |
| $\mu$ Permeabilidade Magnética                 | $\vec{k}$ Vetor de Onda               |
| $\kappa$ Modulo do Vetor de Onda               | $R$ Resistência Elétrica              |
| $\rho$ Resistividade Elétrica                  | $t$ Tempo                             |
| $\rho_a$ Resistividade Elétrica Aparente       | $T$ Período                           |
| $\rho$ Densidade de Carga Elétrica             | $Z$ Impedância Eletromagnética        |
| $\sigma$ Condutividade Elétrica                | $i$ Unidade Imaginária                |
| $\phi$ Fase de Onda                            | $\Delta l$ Comprimento                |
| $\omega$ Frequência Angular                    | $\Delta U$ Diferença de Potencial     |
| $A$ Área                                       | $\nabla$ Gradiente                    |
| $\vec{B}$ Vetor Campo Magnético                | $\nabla \times$ Rotacional            |
| $\vec{D}$ Vetor Campo de Deslocamento Elétrico | $\nabla \cdot$ Divergente             |
| $\vec{E}$ Vetor Campo Elétrico                 | $\nabla^2$ Laplaciano                 |
| $f$ Frequência                                 | $\Im$ Componente Imaginária           |
| $\vec{H}$ Vetor Campo Magnetizante             | $\Re$ Componente Real                 |

## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>15</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Objetivo Geral</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Objetivos Específicos</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>3</b>   | <b>FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO</b>                  | <b>19</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Resistividade Elétrica dos Materiais</b>                   | <b>19</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Origem das Correntes Telúricas</b>                         | <b>21</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Resposta do Método Magnetotelúrico</b>                     | <b>21</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Impedância Eletromagnética</b>                             | <b>25</b> |
| <b>4</b>   | <b>AQUISIÇÃO DE DADOS, DEPENDÊNCIAS E PROCESSAMENTO MT</b>    | <b>27</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Aquisição de Dados MT</b>                                  | <b>27</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Processamento de Dados MT</b>                              | <b>29</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Formatos de Arquivos de Dados MT</b>                       | <b>30</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Processamento Robusto – EMTF</b>                           | <b>33</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE</b>         | <b>34</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Construtor Gráfico – Kivy</b>                              | <b>35</b> |
| <b>5</b>   | <b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT</b>                | <b>37</b> |
| <b>6</b>   | <b>EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PAMPAMT</b>                        | <b>43</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Área de Estudo e Contexto Geológico</b>                    | <b>43</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Processamento dos Dados</b>                                | <b>43</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                   | <b>51</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Desenvolvimentos Futuros para o PampaMT</b>                | <b>52</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>53</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PAMPAMT</b>                      | <b>55</b> |
|            | <b>APÊNDICE B – PROCESSAMENTO USANDO O MÉTODO TRADICIONAL</b> | <b>57</b> |
|            | <b>APÊNDICE C – PROCESSAMENTO USANDO O PAMPAMT</b>            | <b>63</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O método geofísico magnetotelúrico (MT) surge da interação de eventos naturais de origem espacial com a Terra. No caso, a interação do vento solar com a magnetosfera terrestre, e as altas ocorrências de tempestades equatoriais geram ondas eletromagnéticas, que por sua vez penetram e propagam-se por todo o interior da Terra. A indução gerada pela propagação das correntes (correntes telúricas) formam o sinal analítico do método geofísico magnetotelúrico – MT (PARKINSON, 1983). As aplicações do método giram em torno da prospecção de petróleo e estudos crustais. Essas aplicações justificam-se pela profundidade de investigação do método, que varia de 100 metros a 200 quilômetros.

No entanto, os programas desenvolvidos para as aplicações do MT e para o processamento do mesmo, agregam um alto valor comercial devido aos poucos núcleos de desenvolvimento. Já as aplicações desenvolvidas pelo meio acadêmico são em sua maioria manipuladas via linhas de comandos. Tais fatores criam um ambiente, onde novos usuários que desejam trabalhar com tal método, tenham que desprender horas de estudos adicionais de programação para que possam produzir resultados.

Para o usuário que deseja trabalhar com os programas livres e de uso acadêmico, pode encontrar na comunidade MTnet (MTnet, 2018), uma vasta biblioteca de programas e pesquisadores na área do MT, a comunidade reúne as aplicações destinadas aos processamentos de dados, tais como: *softwares* de pré-processamento, inversão, tratamento estatísticos, dentre outros. Os programas alocados no MTnet são de uso livre, como comentado anteriormente, e são destinados exclusivamente a comunidade acadêmica. Portando a proposta deste trabalho visa unir os programas livres alocados na comunidade em uma única plataforma gráfica, fazendo uso de uma GUI (*Graphical User Interface*) simples, agindo como intermediária entre o usuário e os programas já desenvolvidos por toda a comunidade.

No Brasil, a metodologia adotada pelos grupos de pesquisas na área do MT, faz uso principalmente do programa EMTF para a obtenção das matrizes de impedância eletromagnética (seção 3.4), tal elemento é fundamental para o processamento de dados MT. O programa desenvolvido no âmbito do trabalho seguirá a metodologia adotada pelos grupos de pesquisas do Brasil e manterá todo o arcabolso de processamento adotados por eles.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um *software* livre, visando integrar e facilitar o processamento de dados MT.

### 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem os seguintes itens:

- Criar novos algoritmos escritos em *Python*, tanto para a GUI quanto para otimizar o tempo de processamento dos dados;
- Atualizar algoritmos já existentes usando novas tecnologias;
- Testar e comparar a eficiência do programa desenvolvido em relação a técnicas consolidadas no processamento, através de dados reais processados por diferentes perfis de usuários.

### 3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Proposto por TIKHONOV (1950) e CAGNIARD (1953) o método magnetotelúrico usa fontes passivas<sup>1</sup> eletromagnéticas do planeta Terra para estudar e mapear a distribuição de condutividade elétrica em subsuperfície.

Nesta secção será mostrado sucintamente a origem do sinal MT. Entretanto, antes de demonstrar as bases teóricas do método, será descrito brevemente os conceitos de resistividade elétrica aplicada para o meio geológico. O estudo da resistividade elétrica no meio geológico é essencial para as interpretações dos dados resultantes do método MT.

#### 3.1 Resistividade Elétrica dos Materiais

O método MT usa a resistividade elétrica ( $\rho$  [ $\Omega m$ ]) ou o seu inverso, a condutividade elétrica ( $\sigma$  [ $S$ ]), para distinguir e estudar a distribuição dos elementos geológicos em subsuperfície.

A resistividade elétrica é um parâmetro físico intrínseco a cada material. Ela pode ser definida pela oposição do fluxo de corrente elétrica em um material, ou seja, a resistividade elétrica é igual ao campo elétrico sobre a densidade de corrente (HAYT; BUCK, 2013):

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (3.1)$$

onde,  $E$  é a magnitude do campo elétrico em [ $V/m$ ] e  $J$  é a magnitude da densidade de corrente em [ $A/m^2$ ].

Se o campo elétrico e a densidade de corrente elétrica forem constantes, eles podem assumir os seguintes valores:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (3.2)$$

$\Delta U$  → Diferença de potencial [V]

$\Delta l$  → Comprimento do condutor [m]

e ainda,

$$J = \frac{i}{A} \quad (3.3)$$

$i$  → Corrente Elétrica [A]

$A$  → Seção transversal do condutor [ $m^2$ ]

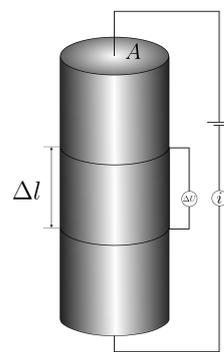
<sup>1</sup> São fontes de sinal que não dependem de instrumentos artificiais para gerá-la, ou seja, sinais naturais do planeta.

Substituindo as equações [3.2] e [3.3] na equação [3.1], obtém-se:

$$\rho = \frac{\Delta U}{i} \frac{A}{\Delta l} \quad (3.4)$$

Utilizando a equação [3.4], pode-se estimar a resistividade elétrica de um material geológico experimentalmente, a partir do arranjo mostrado na Figura 1.

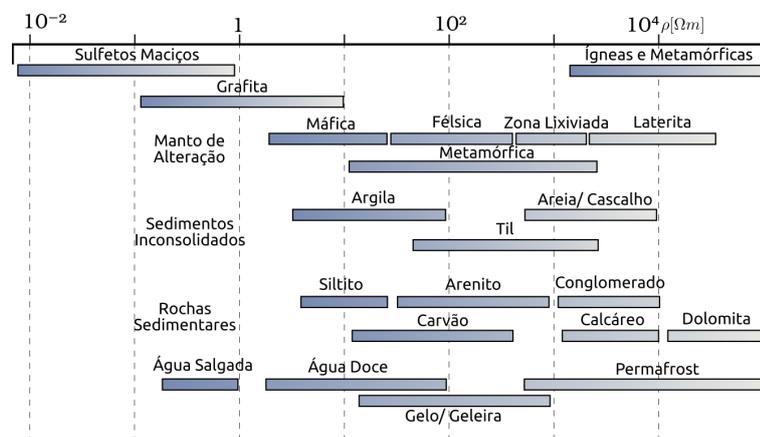
Figura 1 – Arranjo para obter experimentalmente a resistividade elétrica de um material geológico.



Fonte: Adaptado (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Devido a complexidade físico-química dos materiais geológicos, a resistividade elétrica é representada por um intervalo de valores. A Figura 2 mostra esses intervalos de valores para alguns tipos de materiais geológicos. Entretanto vale ressaltar que os valores podem ser alterados dependendo do contexto geológico.

Figura 2 – Tabela de resistividade elétrica para materiais geológicos.



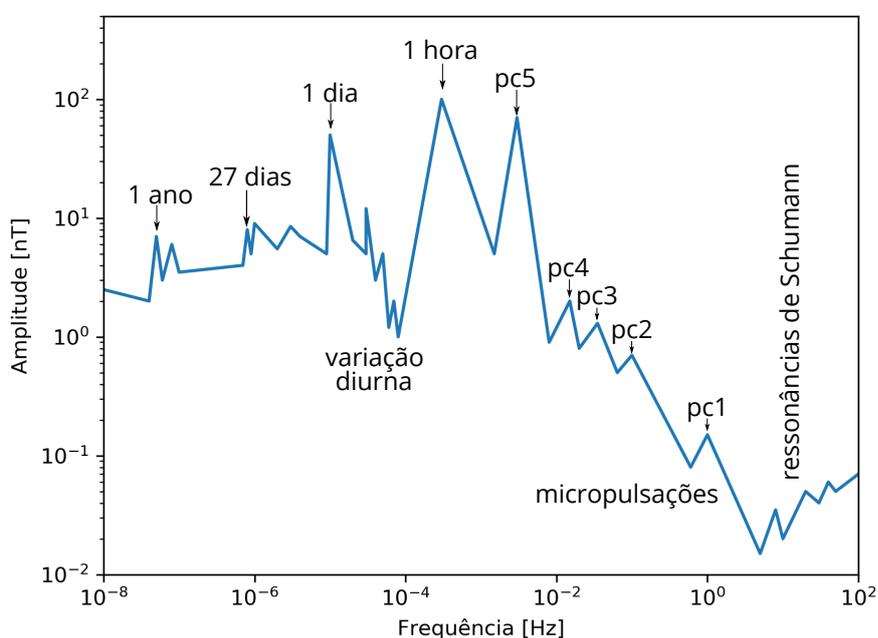
Fonte: Adaptado (PALACKY; WEST, 1991).

### 3.2 Origem das Correntes Telúricas

O método MT utiliza-se de um amplo espectro do campo eletromagnético natural terrestre ( $10^{-4}$  a  $10^4$  Hz) para as sondagens geofísicas. Essa característica permite que a sondagem magnetotelúrica alcance centenas de quilômetros.

O sinal MT tem sua origem nas ressonâncias de Schumann, nas micropulsações e nas variações diurnas (PÁDUA, 2004). A figura 3 mostra a contribuição de cada mecanismo no espectro MT.

Figura 3 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT.



Fonte: Adaptado (PÁDUA, 2004).

As ressonâncias de Schumann tem sua origem principalmente nas tempestades equatoriais contribuindo para a fonte do sinal MT acima de 1 Hz. Frequências a baixo desse valor, tem origem na interação do vento solar com a magnetosfera, que geram ressonâncias Terra-Ionosfera. A contribuição de parte do espectro MT, também pode ser explicada pela distorção do formato do campo magnético terrestre causado pelo Sol durante o dia, no processo denominado variação diurna que contribui com a faixa de frequência de  $10^{-5}$  a  $10^{-4}$  Hz.

### 3.3 Resposta do Método Magnetotelúrico

No caso do magnetotelúrico assim como nos casos de outros métodos geofísicos eletromagnéticos, que fundamentam-se nas Leis de Maxwell [Equações 3.5 – 3.8], pode-se partir das

equações:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.8)$$

Onde,

$\vec{E}$  → Vetor Campo Elétrico [V/m]

$\vec{B}$  → Vetor Campo Magnético [T]

$\vec{H}$  → Vetor Campo Magnetizante [A/m]

$\vec{J}$  → Vetor Densidade de Corrente [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{D}$  → Vetor Campo de Deslocamento Elétrico [C/m<sup>2</sup>]

$\rho$  → Densidade de Carga [C/m<sup>3</sup>]

$t$  → Tempo [s]

estimar os parâmetros físicos para a investigação MT.

Para os estudos magnetotelúricos são feitas as seguintes afirmações, que auxiliam e simplificam o desenvolvimento:

I) A Terra comporta-se como um condutor ôhmico e um semi-espaco isotrópico.

Podemos utilizar, partindo dessas características e atrelado a um campo eletromagnético pouco intenso, as seguintes relações constitutivas:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.9)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.10)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.11)$$

$\mu$  → Permeabilidade Magnética [H/m]

$\varepsilon$  → Permissividade Elétrica [F/m]

$\sigma$  → Condutividade Elétrica [S/m]

Cada coeficiente das relações constitutivas funcionam como tensores, variantes no tempo, para meios anisotrópicos. Para o estudo abordado e seguindo a afirmação, onde a Terra torna-se

um meio isotrópico, isso implica que os tensores,  $\mu$  e  $\varepsilon$  são estáticos e assumem os valores referência para o vácuo:

$$\begin{aligned}\mu &= 1,2566 \times 10^{-6} \text{ H/m} \\ \varepsilon &= 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}\end{aligned}$$

Utilizando as equações constitutivas podemos reescrever as equações 3.5 e 3.6:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; & \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\end{aligned}\tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; & \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\tag{3.13}$$

Na faixa da sondagem MT a Terra comporta-se como um condutor ôhmico, isso implica que o meio não possui cargas livres, logo  $\rho \simeq 0$ .

Para os campos pode ser assumida uma dependência temporal harmônica dada por  $e^{-i\omega t}$ , que pode ser decomposta em vários harmônicos pela transformada de Fourier, onde  $t$  é o tempo e  $\omega$  a frequência angular.

Portando as equações: 3.12, 3.13, 3.7 e 3.8, podem ser reescritas como:

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu\vec{H}\tag{3.14}$$

$$\nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{E}\tag{3.15}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0\tag{3.16}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0\tag{3.17}$$

Aplicando o rotacional na equação 3.15, obtemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}\tag{3.18}$$

Comparando a equação 3.18 com a equação 3.14, pode-se reescreve-la como:

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= (\omega\epsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}; & \nabla \times \vec{E} &= \omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \nabla \times \vec{H} &= \omega\mu(\omega\epsilon + \sigma)\vec{H}\end{aligned}\quad (3.19)$$

Pode-se expressar a equação 3.19 usando a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla\nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2\vec{A} \quad (3.20)$$

Portanto:

$$\begin{aligned}\nabla\nabla \cdot \vec{H} - \nabla^2\vec{H} &= \omega\mu(\omega\epsilon + \sigma)\vec{H} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2\vec{H} &= \vec{H}[\omega\mu(\omega\epsilon + \sigma)] \xrightarrow{\kappa^2} \\ \nabla(\cancel{\nabla \cdot \vec{H}}) - \nabla^2\vec{H} &= \kappa^2\vec{H} \xrightarrow{0} \\ \nabla^2\vec{H} + \kappa^2\vec{H} &= 0; \quad \kappa^2 = \omega\mu(\omega\epsilon + \sigma)\end{aligned}\quad (3.21)$$

Considerando um condutor ôhmico ( $\sigma \gg \omega\epsilon$ ), assim:

$$\kappa^2 = \omega\mu\sigma \quad (3.22)$$

Onde,  $\kappa^2$  é o módulo do vetor de onda ( $\vec{k}$ ).

A equação 3.22 pode ser expressa seguindo a definição, como:

$$\begin{aligned}\kappa &= \sqrt{i\omega\mu\sigma}; \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} \sqrt{e^{i\frac{\pi}{2}}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} e^{i\frac{\pi}{4}}; \quad e^{i\frac{\pi}{4}} = \sqrt{1/2}(1 + i) \\ \kappa &= \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}(1 + i) \\ \kappa &= \frac{(1 + i)}{\delta}\end{aligned}\quad (3.23)$$

Onde,

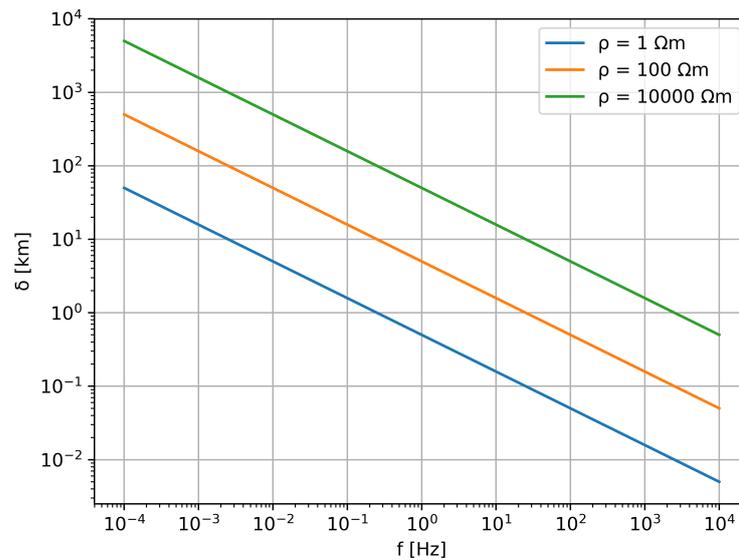
$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \longrightarrow \delta_f \approx 500\sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (3.24)$$

A equação 3.24 é chamada de *skin-depth* (espessura pelicular), e representa a profundidade de penetração da onda eletromagnética em um meio condutor. A partir da equação são mapeadas as litologias em subsuperfície. Porém a resistividade ( $\rho$ ) representa todo o pacote de

rochas em subsuperfície, portanto, adota-se o termo resistividade aparente ( $\rho_a$ ) para a mesma. A resistividade efetiva ( $\rho$ ) pode ser obtida a partir do processo de inversão geofísica (não tratado neste trabalho).

O meio geológico influencia diretamente a profundidade de investigação. A Figura 4 mostra que para uma mesma frequência, pode representar valores diferentes de profundidade, variando o meio em subsuperfície, isso é representado por  $\rho$ . Os meios mais resistivos geram profundidade maiores, já meios condutivos diminuem a profundidade. Esse fenômeno é importante porque, ao interpretar as seções lito-geofísicas, é comum estudar contextos de bacias sedimentares (meio condutivo) em contato com contextos cristalinos (meio resistivo), a atenção deve-se voltar para o fato de que um mesmo período em função de  $\rho$  pode representar duas profundidades diferentes, estando a estação em cima do contexto sedimentar ou em cima do contexto cristalino.

Figura 4 – Gráfico do *skin-depth* em função da frequência [Hz], variando a resistividade do meio



Fonte: O autor, 2018.

### 3.4 Impedância Eletromagnética

Baseado na fundamentação teórica apresentada na seção anterior, o MT busca obter a resistividade aparente em função da profundidade. A partir da solução da equação 3.21 e da sua análoga para o campo  $\vec{E}$ , onde são dadas por:

$$\vec{H}_{(\vec{r})} = \vec{H}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (3.25)$$

$$\vec{E}_{(\vec{r})} = \vec{E}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (3.26)$$

Substituindo a equação 3.25 e 3.26 em 3.15, temos:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} &= (\omega\varepsilon + \sigma)\vec{E}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}; \quad \sigma \gg \omega\varepsilon \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} &= \sigma\vec{E}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}; \quad \sigma = \frac{\kappa^2}{\omega\mu} \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} &= \frac{\kappa^2}{\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}\end{aligned}\quad (3.27)$$

Usando as identidades:

$$\nabla(e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}) = -e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}\vec{k} \quad (3.28)$$

$$\nabla \times \vec{C}(f(\vec{r})) = -\vec{C} \times \nabla f(\vec{r}) \quad (3.29)$$

Pode-se reescrever a equação 3.27:

$$\begin{aligned}-\vec{H} \times (-e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}\vec{k}) &= \frac{\kappa^2}{\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}} \\ e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}(\vec{H} \times \vec{k}) &= e^{-\vec{k}\cdot\vec{r}}\frac{\kappa^2}{\omega\mu}\vec{E} \\ \vec{E} &= \frac{\omega\mu}{\kappa^2}\vec{H} \times \vec{k} \\ \vec{E} &= \frac{\omega\mu}{\kappa}\vec{H} \times \frac{\vec{k}}{\kappa}\end{aligned}\quad (3.30)$$

A relação  $\vec{k}/\kappa$  é o versor de  $\vec{k}$  ou  $\hat{k}$ , representando a ortogonalidade entre  $\vec{H}$  e  $\vec{E}$ .

A partir da equação anterior pode ser definido que  $Z = \omega\mu/\kappa$ , esta definição é conhecida como impedância intrínseca do meio ou impedância eletromagnética, também pode ser representada da seguinte forma:

$$Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{\omega\mu}{\kappa} = \sqrt{\omega\mu\rho}e^{\frac{\pi}{4}} \quad (3.31)$$

A impedância eletromagnética ( $Z$ ) pode ser decomposta em função das componentes de  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ , representada na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

O método MT, então, obtém a resistividade aparente a partir da impedância eletromagnética e atribui a ela uma profundidade, que pode ser definida pela função de *skin-depth* (Equação 3.24).

## 4 AQUISIÇÃO DE DADOS, DEPENDÊNCIAS E PROCESSAMENTO MT

Neste capítulo será discutido como é realizada a aquisição de dados MT e quais as técnicas atualmente utilizadas para o processamento dos dados. Também será mostrado quais as dependências que foram necessárias para a construção do *software*, dentre elas estão: Kivy, EMTF (Dnff e TranMT) e conversores de dados.

### 4.1 Aquisição de Dados MT

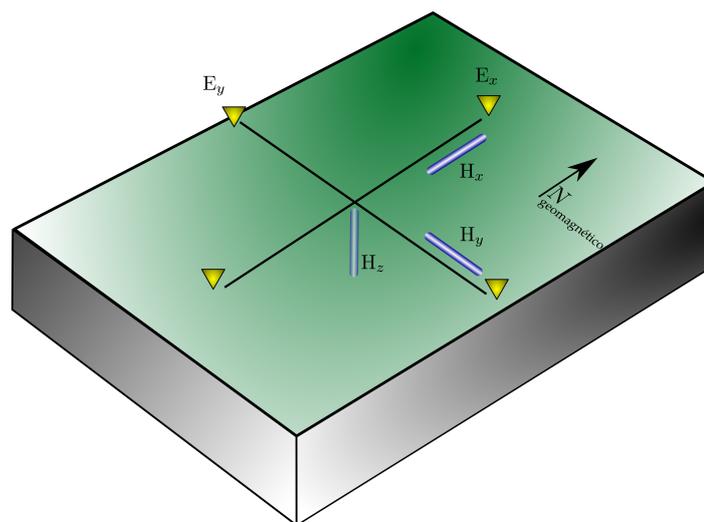
A aquisição de dados MT consiste na obtenção dos campos elétricos ( $E_x$  e  $E_y$ ) e magnéticos por meio dos campos magnetizantes ( $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ), esses são os parâmetros essenciais para o cálculo da impedância ( $Z$ ), Equações 3.30 e 3.32.

Devido a sensibilidade do sinal das sondagens MT, os sensores devem proporcionar uma alta relação sinal/ruído e alta capacidade de ampliar o sinal medido.

O arranjo amplamente adotado para aquisição consiste de três magnetômetros distribuídos cada um paralelo a um eixo cartesiano, responsáveis pelas medidas dos campos magnéticos. Para os campos elétricos são distribuídos dois arranjos de eletrodos não polarizados, acoplados horizontalmente, no sentido  $x$  e  $y$ . A Figura 5 mostra a disposição dos sensores na superfície.

Vale ressaltar que o eixo  $x$  da composição cartesiana deve estar paralelo a direção do fluxo magnético terrestre, ou seja, direcionado ao polo magnético terrestre<sup>1</sup>.

Figura 5 – Arranjo para Aquisição de dados MT.

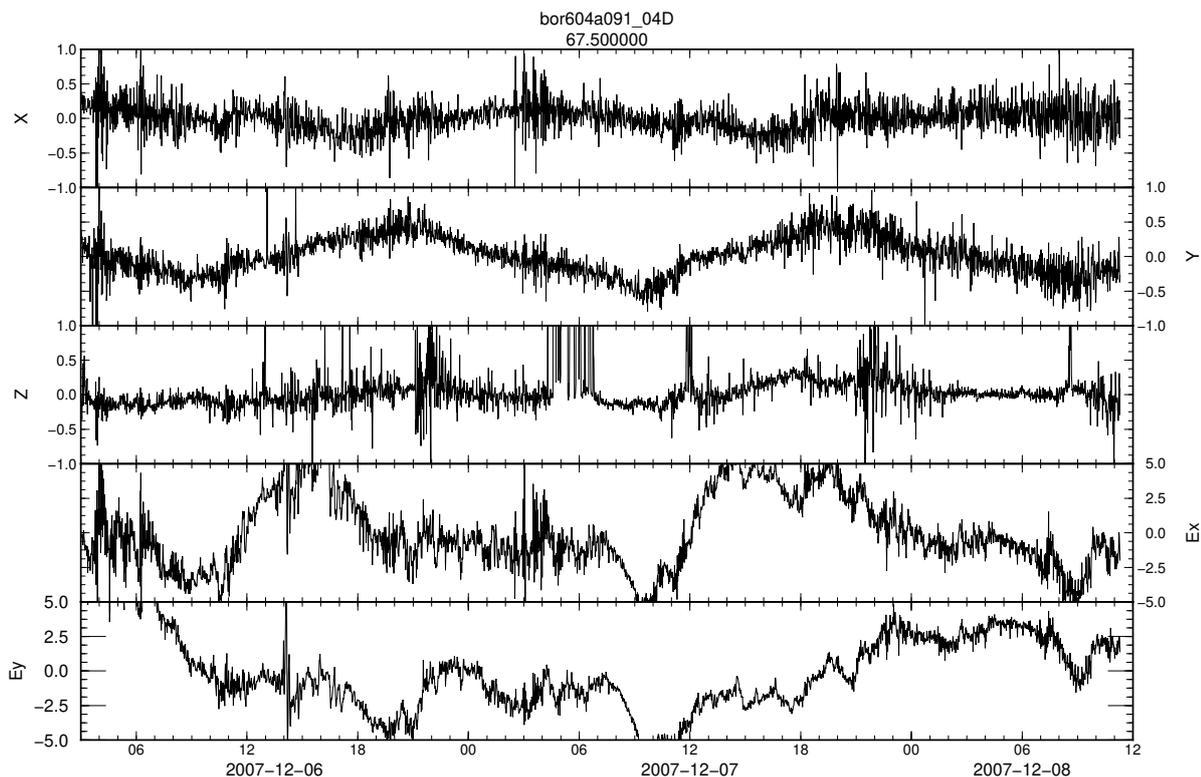


Fonte: O autor, 2018.

<sup>1</sup> Ponto na superfícies terrestre, onde, a inclinação magnética do modelo matemático para o campo geomagnético é  $+90^\circ$

Os sensores registram a variação da amplitude do sinal em função do tempo. Esses registros são chamados de series temporais e são considerados os dados brutos do método (Figura 6).

Figura 6 – Exemplo de Série Temporal dos Dados MT.

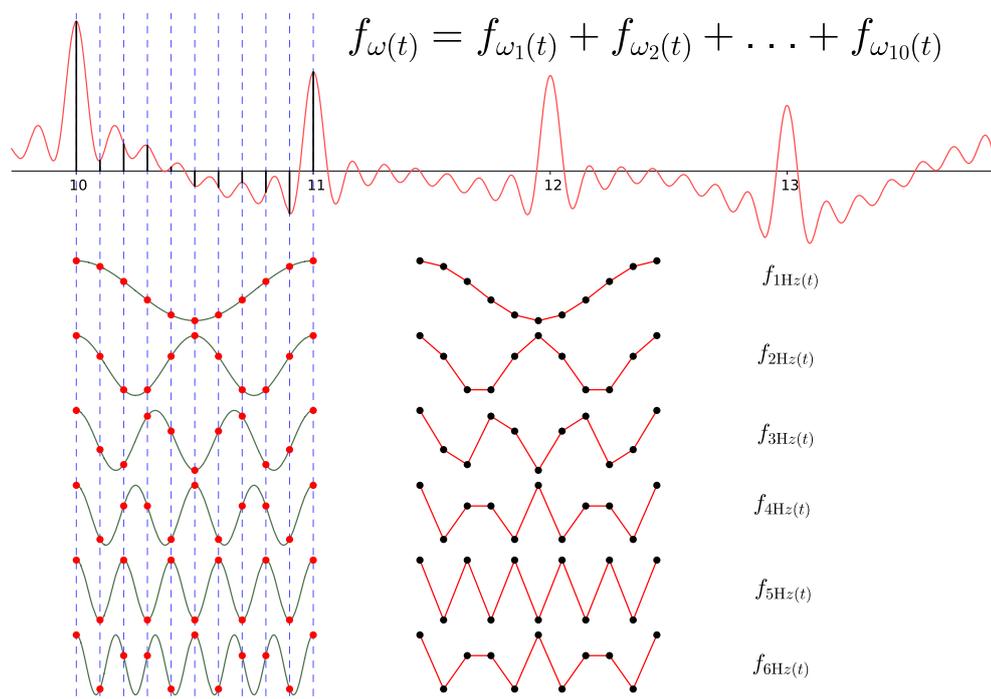


Fonte: O autor, 2018.

Devido ao grande intervalo do espectro eletromagnético que é coletado nas sondagens MT ( $10^{-4}$  Hz a  $10^4$  Hz), são configuradas varias taxas de aquisições diferentes. Para cada escolha de taxa de aquisição é considerada a representatividade do sinal respeitando a frequência de Nyquist (NYQUIST, 1928). A representatividade é muito importante, pois, o sinal medido pelos sensores é a composição de várias ondas com frequências angulares diferentes. Se a taxa de aquisição for menor que duas vezes a frequência da onda, ela não pode ser representada fielmente.

A Figura 7 exemplifica o conceito apresentado no paragrafo anterior, No exemplo é mostrado a composição de um onda com 10 frequências diferentes ( $f_{\omega(t)}$ ), variando de 1 a 10 Hz. Se atribuirmos à ela uma taxa de aquisição de 10 Hz pode-se perceber que a frequência de 6 Hz não é representada corretamente. Já para a frequência de 1 Hz ela é super representada, isso acaba aumentando o tamanho dos arquivos de aquisição. A escolha da taxa de aquisição deve conciliar da melhor forma possível esses dois fatores.

Figura 7 – Aquisição de Dados Discretos.



Fonte: O autor, 2018.

As taxas de aquisições comumente utilizadas são estimadas por potências de 2, o que facilita na decomposição das frequências pela transformada de Fourier. Cada taxa de aquisição é chamada de *Banda* e varia de nome para cada equipamento utilizado.

## 4.2 Processamento de Dados MT

Assim como outros métodos geofísicos, para relacionar o parâmetro físico estudado em função da profundidade, é realizado o processo de inversão. Porém para dados MT faz-se necessário antes das técnicas de inversão, uma primeira etapa de processamento.

A primeira etapa do processamento consiste, sucintamente, em realizar processamentos de filtragem, tratamentos estatísticos, conversão de dados, mudança de domínios e mesclagem de arquivos. Inicia-se o processamento com a conversão dos arquivos de binários para ASCII. Embora seja um processo opcional para alguns equipamentos suportados nativamente pelo pacote EMTF, a boa prática é realizada para melhorar a legibilidade por parte dos usuários sobre os dados ou para tornar compatível com a entrada de dados do pacote EMTF.

Após a conversão são utilizadas técnicas de filtragem, mudança do domínio dos dados de tempo para frequência angular, e cálculo do tensor impedância ( $Z$ ). Esse processo será demonstrado mais detalhadamente no seção 4.4, cuja a técnica recebe o nome de processamento Robusto, EMTF (EGBERT; BOOKER, 1986). Atualmente, esta é a técnica mais confiável e amplamente utilizadas no meio acadêmico para tratamento dos dados.

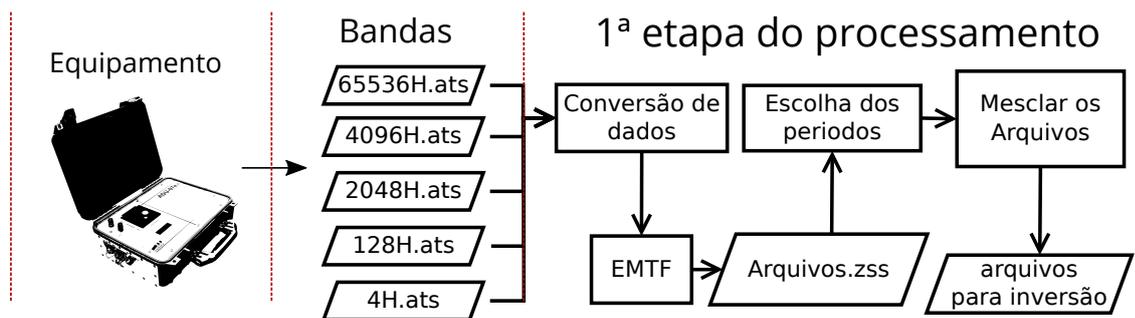
Como comentado na seção anterior, devido as limitações dos equipamentos, os dados são coletados separadamente para cada banda. Utilizando o processamento Robusto, é gerado um arquivo com extensão *.zss*, *.zrr* ou *.zmm*. Nesses arquivos estão armazenados os tensores de impedância, ou seja, cada componente da matriz  $Z$  para cada período.

A etapa seguinte do processamento consiste em escolher, dentro de todos arquivos, a melhor composição dos períodos para todo o espectro de estudo. Esse processo é minucioso e depende da experiência do usuário. Nesta etapa, deve-se plotar cada arquivo e verificar a sua coerência dentro do conjunto total dos dados.

O último estágio do processamento antecessor a inversão é mesclagem dos períodos escolhidos em um único arquivo, que irão conter todas as informações necessárias para realizar os processos de inversão.

A Figura 8 ilustra as etapas do pré-processamento.

Figura 8 – Fluxograma de Pré-processamento.



Fonte: O autor, 2018.

### 4.3 Formatos de Arquivos de Dados MT

Parte das funções do *software* desenvolvido será a simplificação no processo de conversão de dados. Atualmente os formatos mais utilizados, são<sup>2</sup>:

*Z-file* → *Z (Impedance Tensor) File (.zss)*  
*J-format* → *Jones Format (.dat)*

Os arquivos gerados pelos equipamentos variam de formato dependendo do fabricante do equipamento, os arquivos são utilizados para registrar as series temporais, nos quais são armazenadas as amplitudes registradas pelos sensores em função do tempo. A grande parte dos equipamentos tem como saída padrão arquivos em formato ASCII, porém para a série de equipamentos ADU, desenvolvidas pela Metronix faz uso de um formato binário para tais arquivos.

<sup>2</sup> O formato EDI (*Electrical Data Interchange*) não será discutido neste trabalho, porém, o programa esta preparado para trabalhar com os mesmo. Mais detalhes podem serem encontrados em (WIGHT, 1988).

Esses arquivos podem ser convertidos para ASCII e em um formato compatível com o EMTF através do comando – **ats2asc** – (PÁDUA; PÁDUA, 2018).

Os arquivos contendo as séries temporais após realizar a transformada de Fourier e o cálculo do tensor impedância, não são mais necessário. Os arquivos gerados após esse processo contem todas as informações das series temporais, associadas aos tensores de impedância. A partir do tensor impedância é possível estimar todos os parâmetros associados a cada período, tais como:  $\rho_a$ ,  $\phi$  e as componentes do próprio tensor:  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$  e  $Z_{yy}$ , as componentes do tensor são importantes para a interpretação da adimensionalidade dos dados.

Obtidos os tensores impedância, através do **TranMT** (Programa adotado para os cálculos do tensor impedância – EMTF), são gerados os arquivos *.zss*, *.zrr* ou *.zmm* dependendo do tipo de processo escolhido, mas todos seguem a mesma estrutura principal. Esses arquivos são estruturados na forma de blocos, onde, cada bloco representa um período e nele contém o próprio tensor impedância, a matriz de covariância inversa e a matriz de covariância residual.

Exemplo de arquivo Z:

```

**** IMPEDANCE IN MEASUREMENT COORDINATES ****
***** WITH FULL ERROR COVARINCE*****
Robust Single station
station      :ufb104a091_03B
coordinate  -10.47560  -38.43750  declination  -23.00
number of channels  5    number of frequencies  16
orientations and tilts of each channel
    1      0.00      0.00 ufb104a  Hx
    2     90.00      0.00 ufb104a  Hy
    3      0.00      0.00 ufb104a  Hz
    4      0.00      0.00 ufb104a  Ex
    5     90.00      0.00 ufb104a  Ey
period : 1.116071E-03    decimation level  1    freq. band from
1600 to  1984
number of data point  29853  sampling freq.  4.096000E+03 Hz
Transfer Functions
  3.7279E-03  5.5604E-03 -1.2527E-03 -4.9609E-03
  5.7064E+01  1.7047E+01  3.1437E+02  2.1458E+02
-2.6267E+02 -1.9591E+02 -3.2340E+01 -1.3460E+00
Inverse Coherent Signal Power Matrix
  1.3513E+05  0.0000E+00
-1.3265E+04  1.9036E+03  1.5955E+04  0.0000E+00
Residual Covariance
  3.2219E-11  0.0000E+00
  6.8311E-10 -1.4571E-10  1.4028E-04  0.0000E+00
  1.2952E-10  2.3198E-10 -7.8350E-07 -1.5203E-07  1.3332E-04  0.0000E+00

```

A partir dos arquivos Z (*.zss*), pode-se calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) usando a

seguinte equação (EGBERT, 1998):

$$\rho_a = \frac{T|Z_{ij}|^2}{5} \quad (4.1)$$

$T$  → Período [s]

$Z_{ij}$  → Componente do tensor  $Z$  [ $\Omega$ ]

e para se obter a fase ( $\phi$ ), é utilizada a seguinte relação:

$$\phi = \frac{180}{\pi} \arctan \left[ \frac{\Im(Z_{ij})}{\Re(Z_{ij})} \right] \quad (4.2)$$

$\Im(Z_{ij})$  → Componente imaginária de  $Z$  [ $\Omega$ ]

$\Re(Z_{ij})$  → Componente real de  $Z$  [ $\Omega$ ]

Os erros associados a cada componente podem ser obtidos a partir das matrizes de covariância, assim como os erros para  $\rho_a$  e  $\phi$ .

Os arquivos  $J$ , análogo aos arquivos  $Z$ , armazenam as informações do tensor, porém, a estrutura é mais sintetizada. Os arquivos são estruturados em dois blocos, um destinado as informações da estação MT, tais como: localização, elevação, nome da estação e azimute. O segundo bloco é destinado aos dados (JONES, 1994).

Uma das versões de estrutura base utilizada para dados é a composição de seis sub-blocos. Quatro representam cada uma das componentes do tensor e dois sub-blocos destinados ao *Tipper* (PÁDUA, 2004). O sub-bloco é dividido em cinco colunas, onde assumem respectivamente a seguinte ordem:

|                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| Zij SI units (ohms) | < componente         |
| n                   | < número de períodos |
| perodo(n)           | Real                 |
|                     | Imaginario           |
|                     | Erro                 |
|                     | Peso                 |

Os arquivos  $J$  recebem a extensão *.dat*, e comumente utilizados para as etapas de inversão, podendo ser convertidos facilmente para o formato EDI. A adoção deste formato para esta etapa, se dá pela fácil leitura dos períodos e por armazenar toda a sondagem em um único arquivo. Ele armazena a mesclagem de todas as diferentes janelas resultantes do processamento EMTF.

Exemplo de arquivo  $J$ :

```
>STATION    =bor608b
>AZIMUTH    =    -23.0000
>LATITUDE   =    -8.72768
>LONGITUDE  =   -37.84493
>ELEVATION  =    664.0000
bor608b -23.0
```

```

ZXX SI units (ohms)
2
    1.1161e-04   -6.6462e-02   -1.0728e-01   1.7715e-03   1
    1.5625e-04    7.7005e-04   -1.0442e-01   2.9007e-03   1
ZXY SI units (ohms)
2
    1.1161e-04    2.5648e+00    1.2953e+00    2.5613e-03   1
    1.5625e-04    2.4467e+00    1.4059e+00    5.9294e-03   1
ZYY SI units (ohms)
2
    1.1161e-04   -2.3499e+00   -1.1104e+00    1.6657e-03   1
    1.5625e-04   -2.3904e+00   -1.2251e+00    3.0355e-03   1
ZYY SI units (ohms)
2
    1.1161e-04    7.1532e-02    3.1711e-02    2.4082e-03   1
    1.5625e-04    5.9528e-02    3.7107e-02    6.2053e-03   1
TZX
2
    1.1161e-04   -2.5245e-02    2.0055e-03    5.9072e-04   1
    1.5625e-04   -4.7611e-02   -1.3914e-02    1.0110e-03   1
TZY
2
    1.1161e-04    1.3879e-02    1.7406e-02    9.1885e-04   1
    1.5625e-04    5.1640e-03    1.9010e-02    1.4921e-03   1

```

#### 4.4 Processamento Robusto – EMTF

O pacote EMTF (EGBERT, 1997) desenvolvido por Gary D. Egbert, é um conjunto de programas escrito em *Fortran 77* que realizam processamentos tais como: mudança de domínio, cálculo do tensor impedância, plotagem e alguns tipos de conversores de dados.

O processamento dos dados parte primeiramente da análise espectral das séries temporais, na qual primeiro faz-se necessário a mudança do domínio do tempo para a frequência angular e em seguida a filtragem, remoção de tendências e de dados ruins.

A mudança do domínio do tempo para frequência angular é realizado pelo programa **Dnff**, contido no pacote. Esse programa realiza a troca do domínio através da FFT (*Fast Fourier Transform*) mesclando com processos de *Cascade Decimation* (WIGHT; BOSTICK, 1980 apud PÁDUA, 2004). Antes de realizar os processos da transformada de Fourier discreta, são aplicados as series temporais janelas. Limitando as séries temporais, esse processo previne o vazamento da energia da serie durante o processo.

Concluído o processo do **Dnff**, é iniciado o processo **TranMT** onde é responsável pelo cálculo do tensor impedância e o *Tipper*. Esse processo utiliza de uma forma mais aprimorada da técnica dos mínimos quadrados, incrementando à ela um termo que atribui o desvio de toda a série. Mais detalhes podem serem obtidos em (EGBERT; BOOKER, 1986)

#### 4.5 Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE

O grupo GEOMA do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) oferece treinamentos para alunos e colaboradores. O grupo dispõe de um série de *scripts* e programas para auxiliar na manipulação do processamento MT (GEOMA, 2018).

Os *scripts* oferecidos para o processamento MT foram desenvolvidos, em grande parte, pelo Dr. Marcelo Banik de Pádua e pelo Me. Marcos Banik de Pádua. Tais programas foram idealizados como a primeira interface de uso com os usuários, facilitando a utilização dos programas contidos no MTnet.

Os programas desenvolvidos pelo GEOMA vão desde conversores de dados até interfaces avançadas de processamento, como inversão geofísica por diversos tipos de programas. Visando a produtividade, pela alta demanda de processamento e a metodologia já utilizada, os programas foram desenvolvidos para o ambiente Linux rodando em base Debian, e utilizados via linhas de comando.

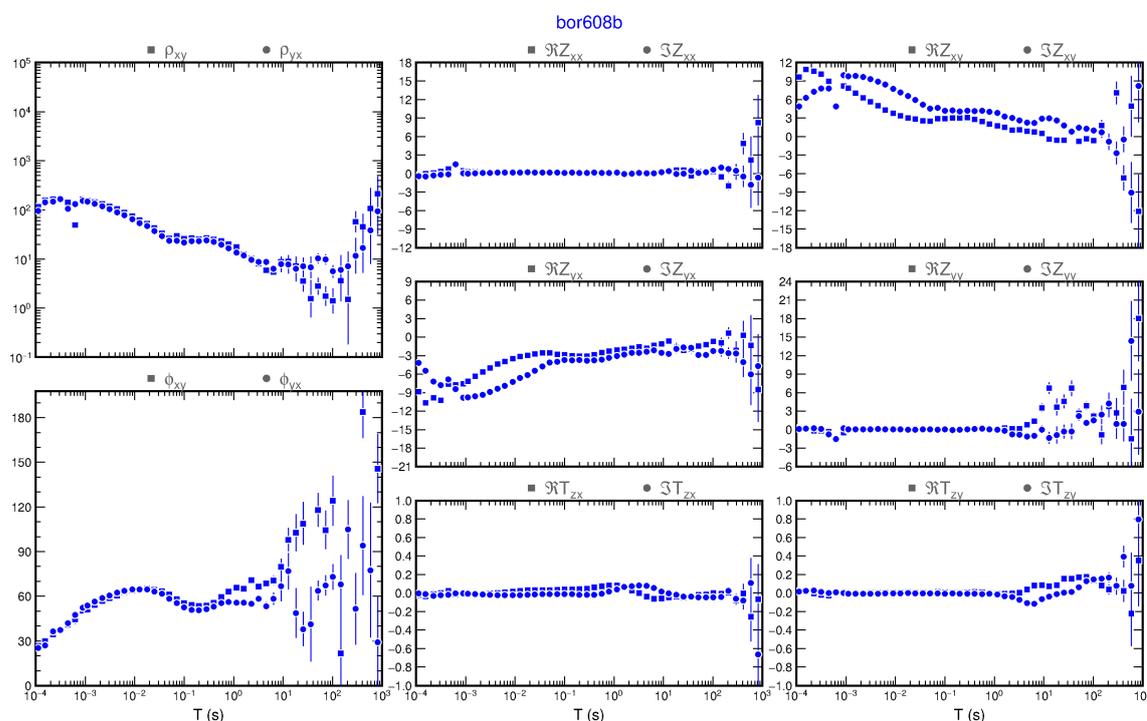
O grupo Geoma é a maior referência no Brasil nos trabalhos com magnetotelúrico, portanto a base de desconstrução do programa usará as metodologias adotadas pelo grupo, bem como o apoio teórico para o desenvolvimento.

O programa desenvolvido faz uso dos *scripts* do grupo GEOMA, como “ponte” entre a interface e o programa EMTF, como também os *scripts* para os conversores de dados. Um exemplo de uso é a API *processamentoZ* que prepara os dados e extraí os parâmetros necessários para as rotinas **Dnff** e **TranMT**.

Para as plotagens dos dados o grupo usa o programa GMT (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, 2018), Figura 9. Embora o programa aqui desenvolvido tenha a sua própria saída gráfica, foi desenvolvida uma extensão que exporta as figuras utilizando o *Kernel* do GMT. Essa extensão visa aumentar a familiaridade de usuários já experientes no processamento MT e também ampliar as possibilidades de exportação de imagens.

Os programas do grupo GEOMA podem ser encontrados em GEOMAMT (2018) e são necessários como requisito para a instalação do programa desenvolvido.

Figura 9 – Saída Gráfica Gerada pelo *script: plot-cmp-tf* (PÁDUA; PÁDUA, 2018), utilizando o GMT.



Fonte: O autor, 2018.

#### 4.6 Construtor Gráfico – Kivy

O Kivy é um *framework* desenvolvido em Python com trechos escritos em Cython<sup>3</sup>, utilizado para o desenvolvimento da interface gráfica do programa (KIVY ORGANIZATION, 2018a).

O Kivy é um construtor gráfico que utiliza a API OpenGL (OPENGL, 2018) para o processamento dos elementos visuais impressos na tela. Isso significa que todo o processamento dos elementos são executados nativamente no chip gráfico do computador.

A escolha do Kivy também pode ser justificada pela simplicidade de implementação, visto que o mesmo permite o desenvolvimento através de uma linguagem própria, a *Kvlang* (KIVY ORGANIZATION, 2018b). Essa linguagem permite a construção dos elementos, através de uma linguagem de marcação e indentada, ou seja, a hierarquia dos elementos estão sempre na indentação mais a direita. A linguagem *Kvlang* é integrada ao código Python, isso permite o acesso do mesmo elemento nas duas estruturas de código.

<sup>3</sup> Linguagem que permite a conversão de códigos escritos com a mesma sintaxe do Python para códigos nativos em C (CYTHON, 2018)

## 5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT

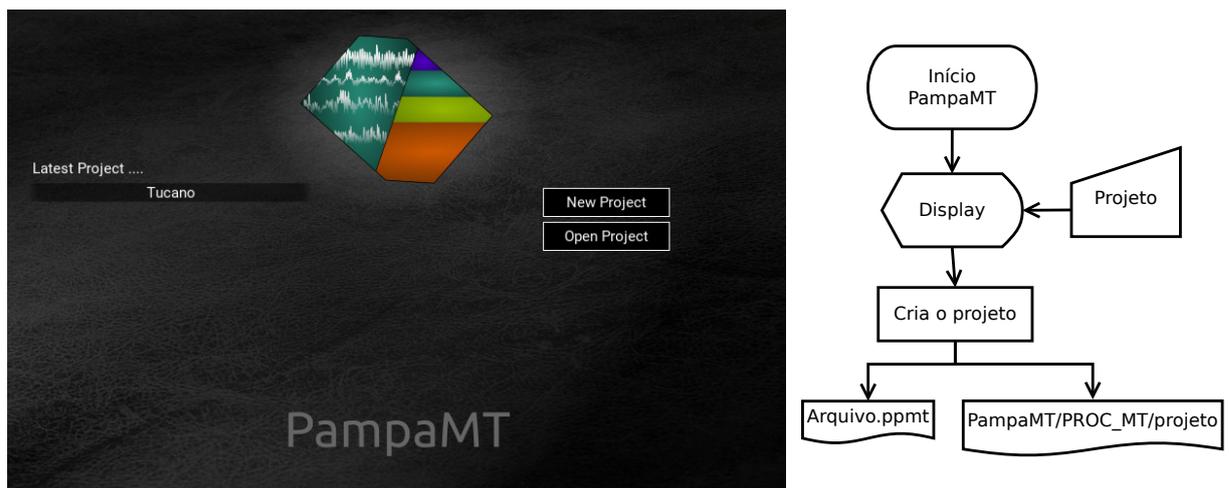
O *software* desenvolvido recebeu o nome de PampaMT, em homenagem a Universidade Federal do Pampa. O desenvolvimento iniciou-se em janeiro de 2018, com o primeiro protótipo de codinome RiMT, visando testar os conceitos e a viabilidade das funções para o programa. Em junho de 2018 o código foi reestruturado e reescrito, atentando para os problemas e adicionando novas funções baseando no protótipo. A principal mudança foi a construção do *software* em módulos, facilitando a adição e manutenção de novas funções.

No apêndice A pode ser encontrado o caminho para o código fonte do programa, junto com as informações para a instalação. O PampaMT foi desenvolvido para ambiente Linux rodando em base Debian. O código foi escrito em *Python*, com alguns trechos escritos em *Shell* para instalação e comunicação da interface com os executáveis dos programas **Dnff** e **TranMT**.

O PampaMT foi dividido em duas etapas de processamento: a primeira destinada a criação do projeto; escolha dos arquivos a serem processados e a processamento EMTF. Já a segunda parte foi destinada a escolha das melhores rodadas e períodos. Esse processo destina a maior interação com o usuário e representa a principal justificativa para o desenvolvimento do *software*.

A Figura 10 mostra a primeira tela ao executar o PampaMT, nela pode-se escolher criar um novo projeto ou abrir um já existente.

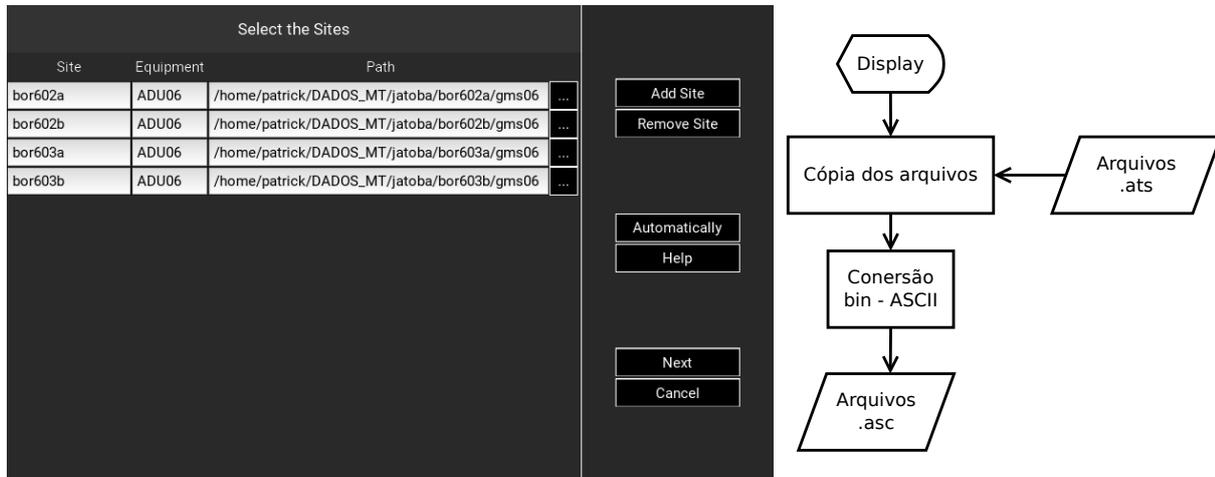
Figura 10 – Tela Inicial PampaMT



Fonte: O autor, 2018.

Após a escolha do diretório para um novo projeto, o usuário é direcionado a escolha dos arquivos *TS*. Nele o usuário pode escolher entre três equipamentos: ADU-06, ADU-07 e LiMS, a seleção pode ser automática ou adicionada cada estação individualmente (Figura 11).

Figura 11 – Seleção das Estações

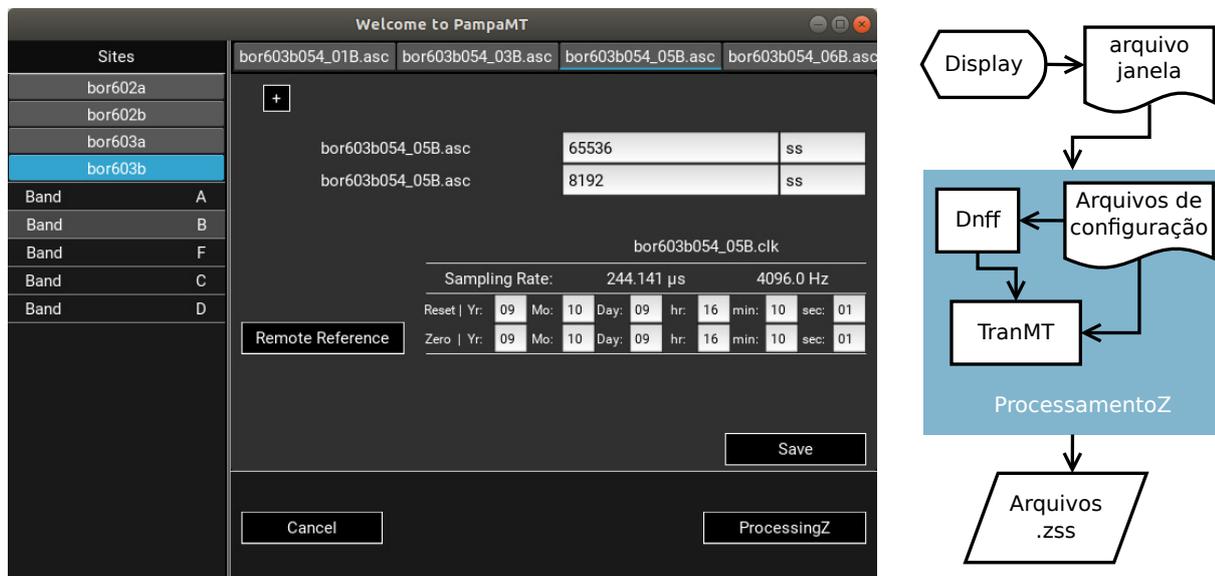


Fonte: O autor, 2018.

Após a seleção, os dados são copiados para o diretório: **DADOS\_MT/projeto**. Esse processo é realizado para prever eventuais perdas dos arquivos. Os dados então são convertidos e salvos no diretório: **PROC\_MT/projeto**

O usuário será levado a tela do processamento EMTF. O processo já estabelece algumas configurações padrão, entretanto o usuário pode alterar qualquer configuração, tais como, escolher uma nova janela ou alterar o horário do relógio dos dados (Figura 12).

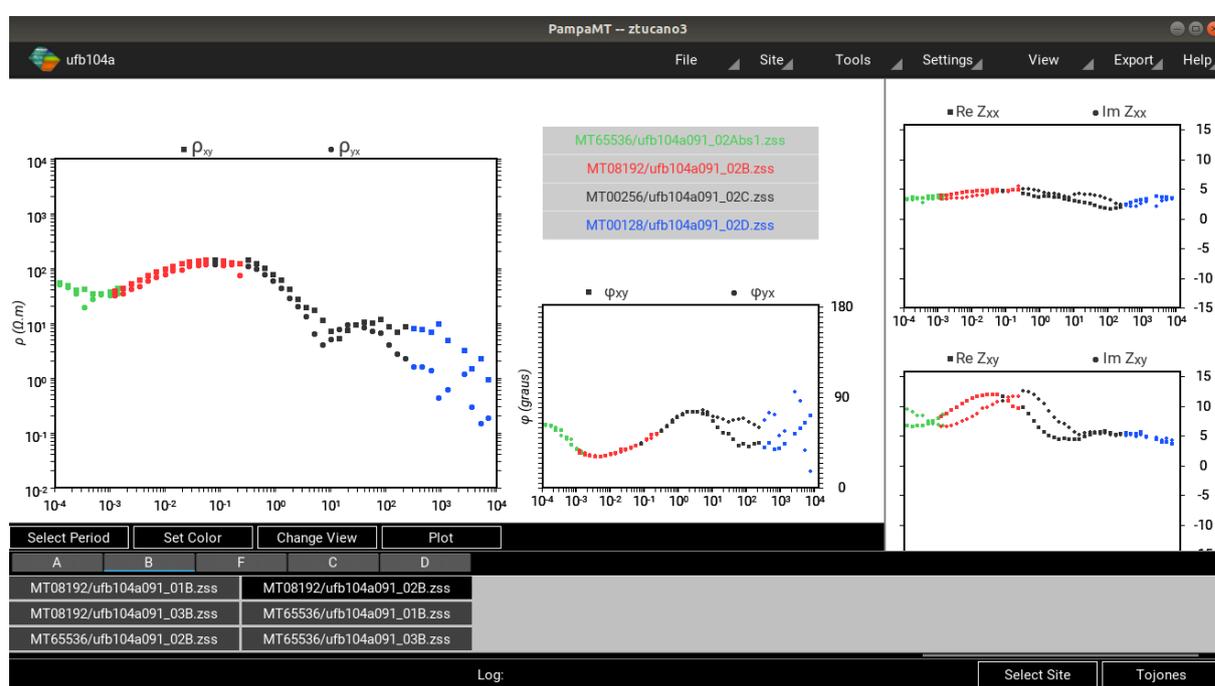
Figura 12 – Tela de Configuração para o EMTF



Fonte: O autor, 2018.

O processo EMTF tende a demorar um tempo considerável, cerca de 1 a 2 minutos para cada estação. Para um levantamento típico de 30 estações por perfil esse processo pode demorar de 20 a 30 minutos, visto a grande quantidade de recursos do computador que ele consome. Finalizado o processo EMTF a janela é fechada e inicia-se o tela principal do PampaMT (figura 13).

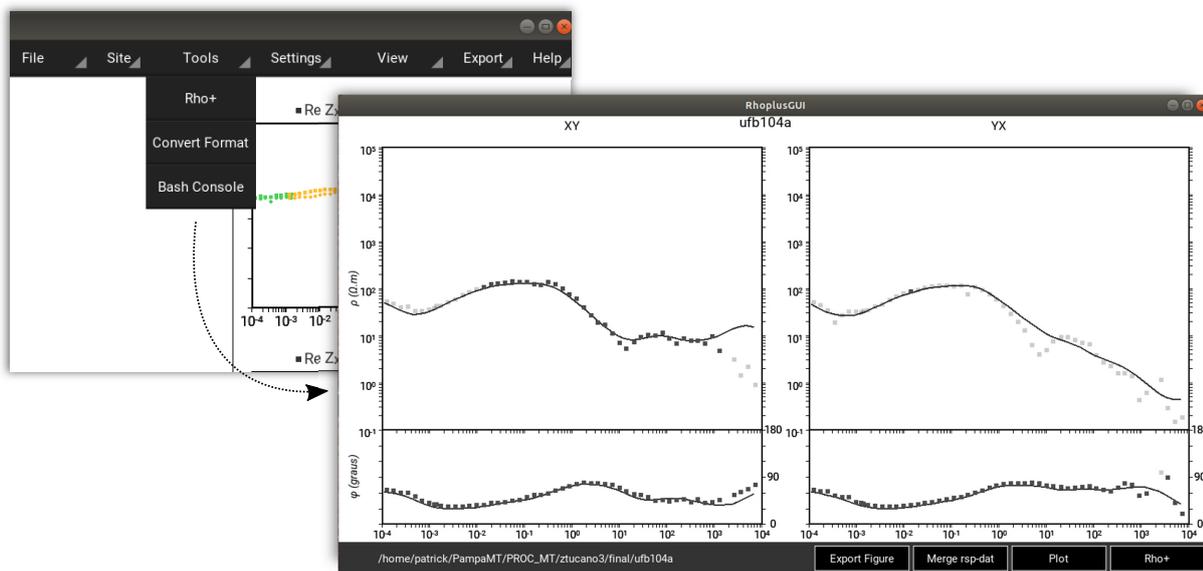
Figura 13 – Tela Principal PampaMT



Fonte: O autor, 2018.

A tela principal contém todas as funcionalidades do PampaMT, incluindo a etapa de criação de um novo projeto. O carácter modular do PampaMT ajuda na adição de novas funcionalidades, como por exemplo, integração por programas SIG, integração com visualizados de dados, como o GMT, dentre outros. Um exemplo notável é a adição do programa RhoplusGUI em desenvolvido pelo autor, para o projeto PIBIC/INPE/CNPq “Desenvolvimento de Interface Gráfica Amigável para Validação de Dados Magnetotelúrico a Partir do Processamento Rho+”. Esse programa auxilia na manipulação de dados para o processamento Rho+ (PARKER; BOOKER, 1996), onde foi necessário adicionar poucas linhas de código para incluí-lo no PampaMT (Figura 14).

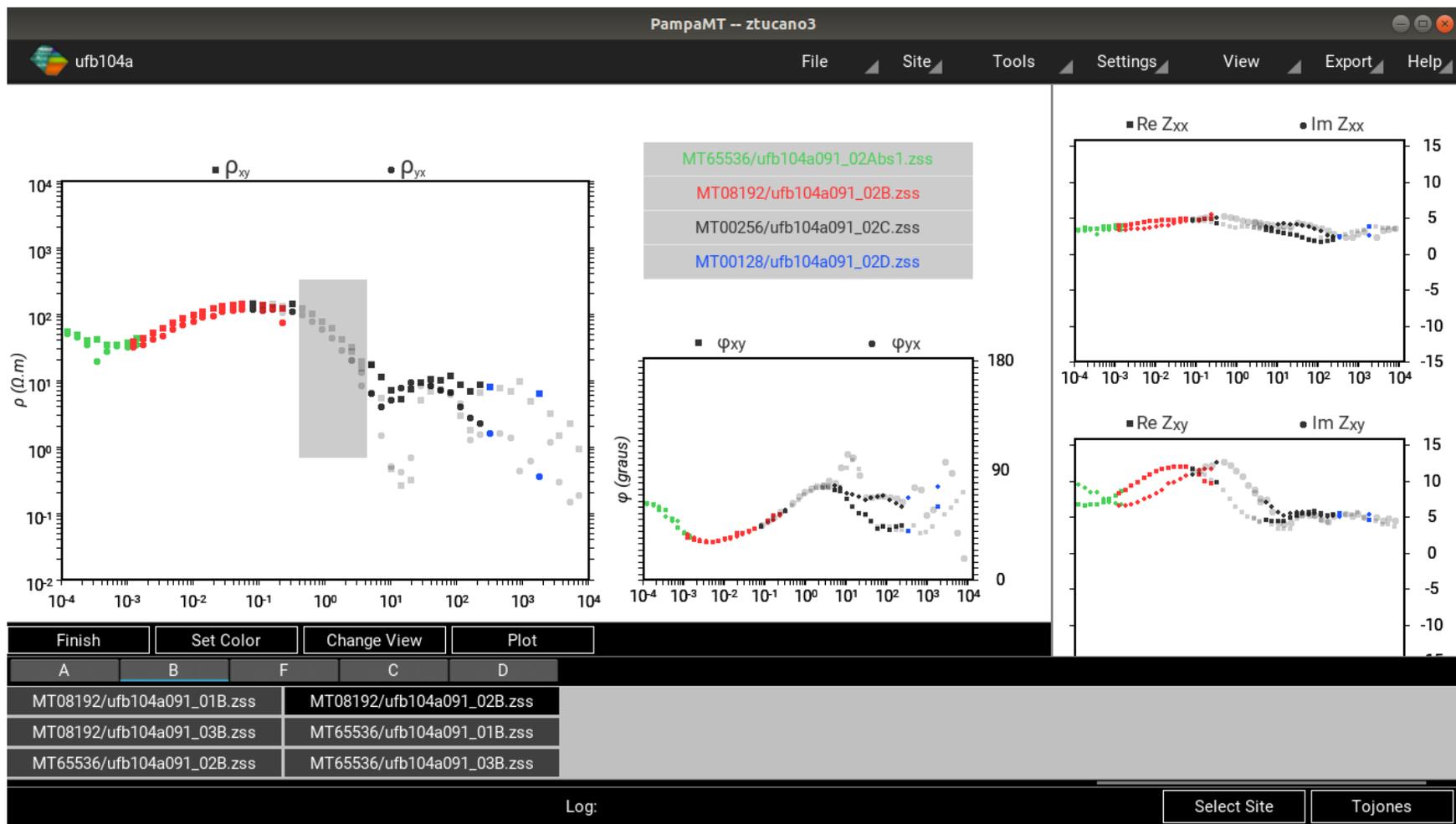
Figura 14 – Integração com Outros Programas



Fonte: O autor, 2018.

A principal função que o usuário utilizará, será a escolha dos melhores períodos e rodadas. Esse processo vinha sendo executado, plotando cada arquivo *.zss* e contando manualmente a posição dos melhores períodos. Então, após a contagem, o usuário deve anotar os pontos que indicam os períodos, e finalmente executar o *script: ToJones*. Esse *script* mescla os arquivos *.zss* com os períodos escolhidos e converte-os para o formato *J (.dat)*. Esse processo foi incorporado no PampaMT com a escolha dos períodos sendo realizada com o cursor. O usuário habilita a função de seleção, e o programa plota todos os pontos possíveis para a rodada escolhida, por fim o usuário arrasta uma janela de seleção e todos os períodos contidos nessa janela são selecionados (Figura 15).

Figura 15 – Seleção dos Períodos



Fonte: O autor, 2018.

Após escolher os melhores períodos o usuário pode executar o *script*: **ToJones**, onde esse é realizado ao pressionar o botão no canto inferior esquerdo. O PampaMT abre uma caixa de diálogo para nomear o arquivo de saída, e executa o *script*, finalizando a última etapa do pré-processamento.

## 6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PAMPAMT

Nesse capítulo será demonstrado a aplicação do programa desenvolvido utilizando dados reais. Os dados foram processados utilizando o PampaMT e também a forma tradicional que vinha sendo realizada. Essa forma tradicional compreende processar utilizando os *scripts* e programas desenvolvidos pelo GEOMA, como comentado anteriormente.

A realização dos processamentos utilizando as duas técnicas simultâneas, foi realizada visando comparar o tempo e a dinâmica de processamento, bem como a influência sobre os períodos escolhidos para cada técnica.

### 6.1 Área de Estudo e Contexto Geológico

A área de estudo escolhida para esse teste de comparação são 12 estações magnetotélúricas de banda larga, localizadas no nordeste brasileiro dentro do contexto da Província Borborema (Figura 16). As estações MT fazem parte do projeto “Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil” /CNPQ (Projeto Milênio) e “Estudo da estrutura da litosfera do Nordeste do Brasil” /CNPQ (INCT – Tectônica), levantadas nos anos de 2007 e 2009.

Segundo ALMEIDA et al. (1981), a Província Borborema caracteriza-se como um complexo conjunto de blocos crustais reunidos por causa de processos geológicos que finalizaram na Orogenia Brasileira/Pan-africana (700 a 450 Ma). Devido à complexidade tectônica, diferentes estudos vêm sendo apresentados por distintos pesquisadores para explicar as características dessa estrutura (SCHMUS et al., 2008); (SANTOS, 2012); (SANTOS et al., 2014); (PADILHA et al., 2016); (BARBOSA, 2017). A Província Borborema limita-se a sul com o Cráton São Francisco; a oeste com a Bacia do Parnaíba (sedimentos Fanerozóicos); a norte e a leste com as bacias sedimentares costeiras e interiores do Nordeste do Brasil (bacias Potiguar, Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas, além da bacia Tucano-Jatobá que transpassa o limite da província com o Cráton São Francisco) – (MEDEIROS, 2004).

### 6.2 Processamento dos Dados

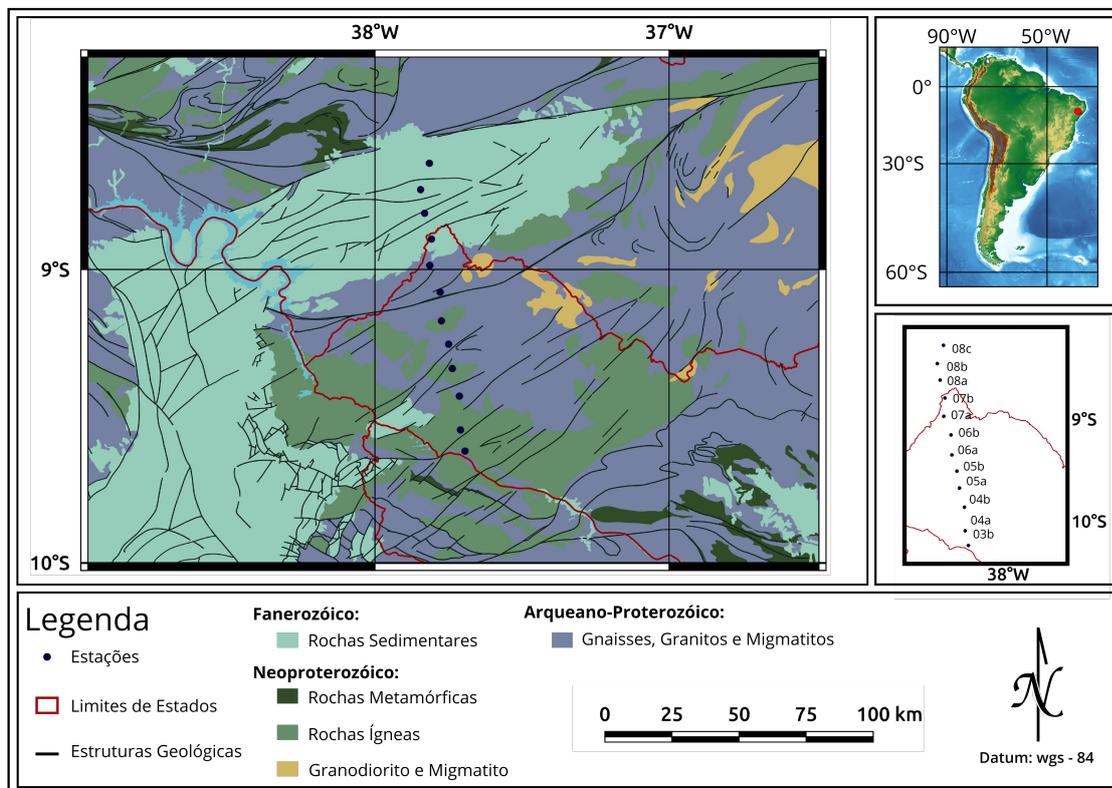
O processamento das 12 estações tem o carácter de comparar a eficiência do PampaMT na sua execução e o tempo de processamento necessários para todo o pré-processamento.

Como discutido anteriormente, o modo tradicional utiliza os *scripts* e programas desenvolvidos pelo grupo GEOMA. Esses *scripts* já foram desenvolvidos para melhorar a eficiência do pré-processamento de dados MT, isso significa que os resultados obtidos, comparados a um usuário que não possui esses *scripts*, sejam ainda maiores.

O processamento tradicional utiliza cinco programas principais, são eles:

- **ats2asc** → Converte os dados binários para ASCII;

Figura 16 – Mapa Geológico



Fonte: Adaptado – Base de dados (Brazil. Departamento Nacional da Produção Mineral; BRUNI, 1976)

- **processamentoZ** → API de comunicação com EMTF, escrita em *shell*;
- **plot-cmp-tf** → Plota os dados MT:  $\rho_a$ ,  $\phi$ ,  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ,  $Z_{yy}$ ,  $T_{xz}$  e  $T_{yz}$  em função do período;
- **ats\_coord\_tojones** → Extrai as coordenadas geográficas dos arquivos binários;
- **tojones** → Converte os arquivos *Z-file* (.zss) em *J-format* (.dat).

O processamento foi realizado por dois usuários distintos, sendo os dois experientes no processamento na forma tradicional, os computadores utilizados apresentam a mesma configuração de *hardware* e *software*, sendo compostos, basicamente, de um processador de quatro núcleos com 2,4 GHz cada e 8 Gb de memória ram. Nos apêndices B e C, podem ser encontrados os períodos selecionados para cada estação utilizando o método tradicional e com o PampaMT, respectivamente para um dos usuários.

Como discutido anteriormente a primeira etapa consiste em converter os dados de binários para ASCII, portanto foi utilizado o programa **ast2asc**, a forma tradicional procedeu da seguinte forma via terminal *shell*:

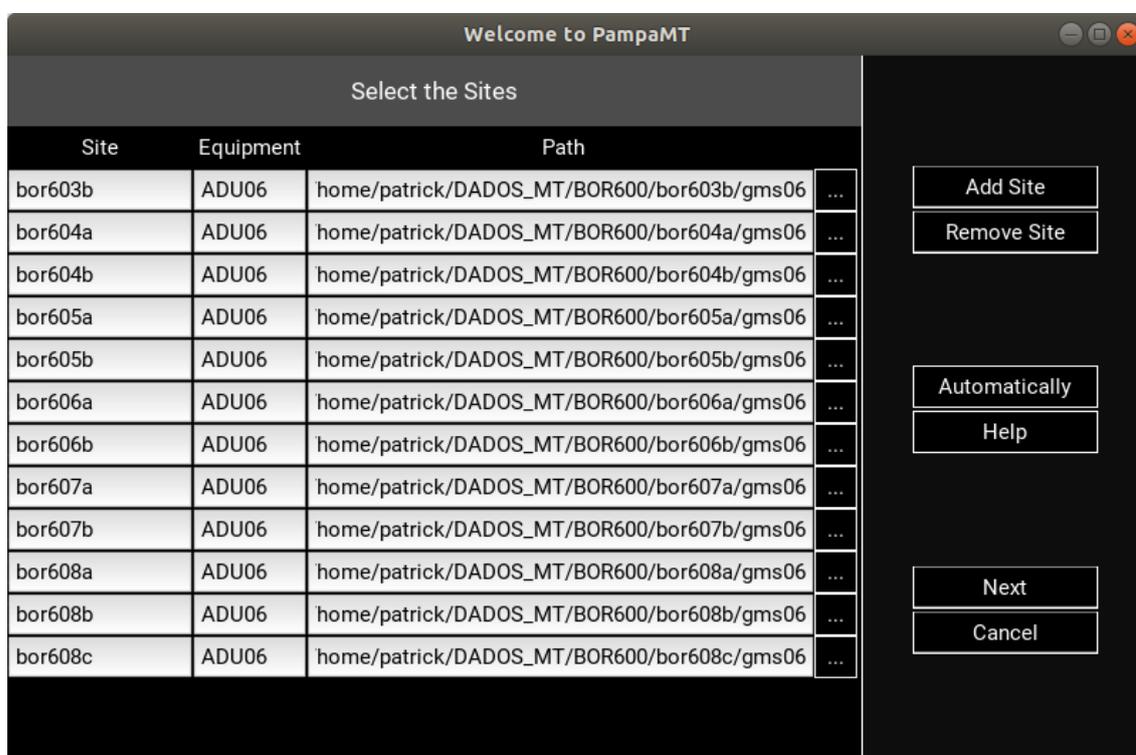
```

$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor603b $DADOS_ATS_bor603b
$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor604a $DADOS_ATS_bor604a
$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor604b $DADOS_ATS_bor604b
$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor605a $DADOS_ATS_bor605a
$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor605b $DADOS_ATS_bor605b
$PROJETO:$ ats2asc --site-name bor606a $DADOS_ATS_bor606a
...

```

Utilizando o PampaMT para a conversão (Figura 17):

Figura 17 – Conversão de Dados Utilizando o PampaMT



Fonte: O autor, 2018

A próxima etapa foi a preparação dos dados para o processamento EMTF, na forma tradicional prepara-se um arquivo com as configurações necessárias para a execução do EMTF pela API **processamentoZ**.

Arquivo de preparação:

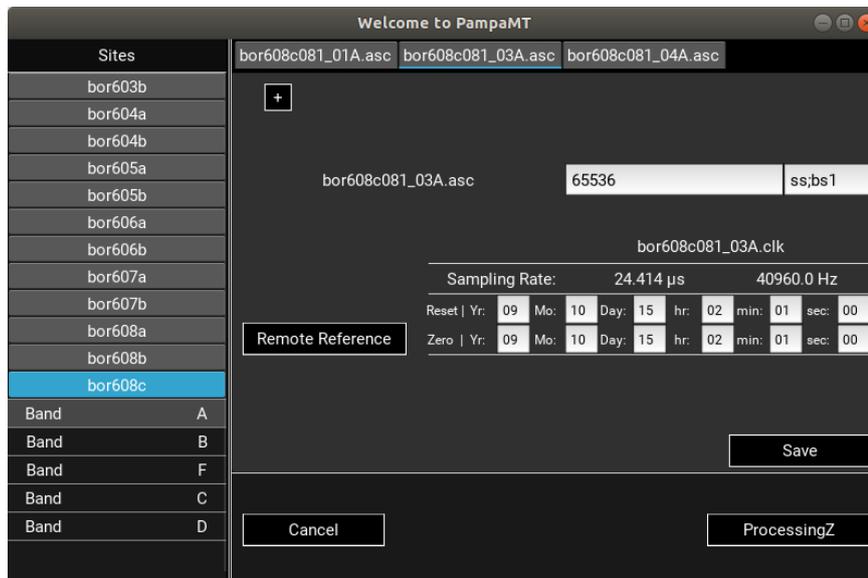
```

*A.asc 65536 ss;bs1
*B.asc 65536 ss
*B.asc 8192 ss
*C.asc 256 ss
*C.asc 128 ss
*D.asc 128 ss
*D.asc 64 ss

```

No arquivo de preparação são adicionados os arquivos a serem processados e qual janela aplicada para cada arquivo ASCII. Na utilização do PampaMT a configuração dos arquivos é realizada pela seguinte tela (Figura 18):

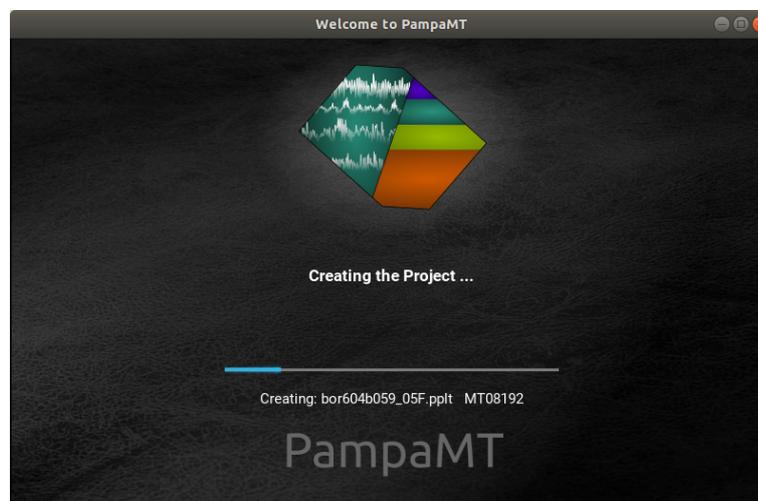
Figura 18 – Preparação das Configurações Utilizando o PampaMT



Fonte: O autor, 2018

Posteriormente é executado o comando `:$ processamentoZ arquivo_preparacao` para a forma tradicional e para o PampaMT é realizado o processamento ao pressionar o botão **ProcessingZ** (Figura 19).

Figura 19 – Criação e Processamento EMTF – PampaMT



Fonte: O autor, 2018

As etapas apresentadas anteriormente não apresentaram mudanças de tempo de processamento entre o método tradicional e o PampaMT, pois os tempos envolvidos dependem exclusivamente do poder de processamento do computador em que está sendo rodado. A mudança significativa foi a aprendizagem por parte de novos usuários sem conhecimento prévio de *shell script*, onde os mesmos não necessitaram recorrer a nenhum manual ou documentação, validando, assim, a amigabilidade da GUI.

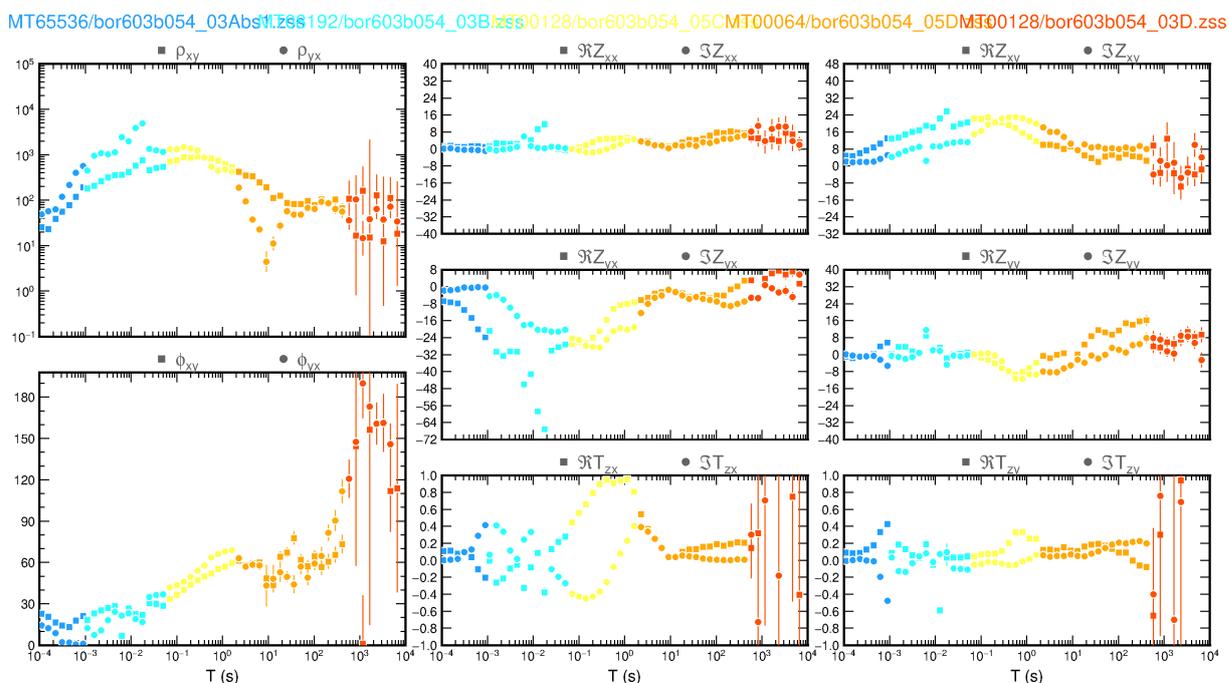
A etapa seguinte é a escolha das melhores rodadas, para uma estação e os melhores períodos dentro dessas rodadas. Para concluir esse processo, primeiro é extraído as coordenadas geográficas e armazenada em um arquivo que receberá também a seleção dos períodos, com o comando:

```
$PROJETO:$ ats_coord_tojones $DADOS_ATS_bor6030b > selecao_bor603b
```

Em seguida são plotados cada arquivo *Z-file* e contados os melhores períodos (Figura 20), com o comando:

```
$PROJETO:$ plot-cmp-tf MT65536/bor603b054_03Abs1.zss, [1-7] MT08192/
bor603b054_03B.zss, [1-12] MT00128/bor603b054_05C.zss, [1-10] MT00064
/bor603b054_05D.zss, [1-16] MT00128/bor603b054_03D.zss, [17-24] NDT=8
```

Figura 20 – Plotagem utilizando o *script plot-cmp-tf* para a estação bor603b com a seleção dos melhores períodos



Fonte: O autor, 2018

Portanto no final desse processo o arquivo de seleção assume o seguinte formato:

```
# coord -37.69384 -9.61962 186
MT65536/bor603b054_03Abs1.zss [1-7]
MT08192/bor603b054_03B.zss [1-12]
MT00128/bor603b054_05C.zss [1-10]
MT00064/bor603b054_05D.zss [1-16]
MT00128/bor603b054_03D.zss [17-24]
```

Ao final é executado o *script tojones* que converte todos os arquivos *Z-file* selecionados para um único arquivo *J-format*, com o comando: `tojones selecao_bor603b > bor603b.dat`. Assim é efetuado essas etapas para todas as estações e finalizado o pré-processamento no método tradicional.

A escolha dos períodos pelo PampaMT é realizada de forma interativa com cursor no mouse, o usuário inicia selecionando os arquivos *Z-file* através das abas de banda na parte inferior da tela. Após selecionar o usuário pressiona o botão **Select Period** e pode selecionar os períodos com uma caixa de seleção (Figura 15), por fim pressiona o botão **Tojones** para finalizar o processo. As coordenadas estão armazenadas no objeto do projeto e podem ser modificadas através da aba de ajustes da estação. Realiza-se então essas etapas de seleção para todas as estações, finalizando assim o pré-processamento com o PampaMT.

Comparando os dois processos, obteve-se uma grande diferença entre os tempo de processamento, como pode ser visto na Figura 21 e na Figura 22, também ocorreu a prevenção de vários erros comuns cometidos por usuários iniciantes no processamento de dados MT, como o erro na escolha de períodos duplicados para o **tojones** ou arquivos sem registro de coordenadas geográficas. O processo mais dinâmico beneficia a exaustão do pré-processamento, focando os esforços do usuário nas próximas etapas, como: inversão e modelagem lito-geofísico.

Figura 21 – Tempo Comparando o Tempo de Pré-processamento – Usuário 1

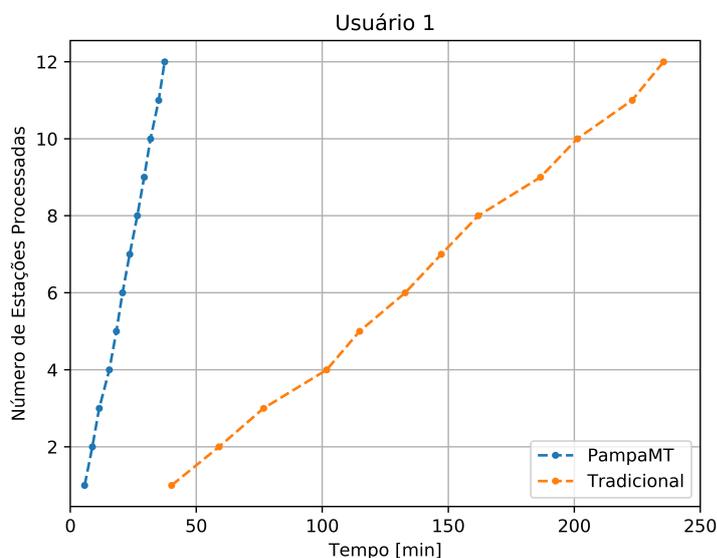
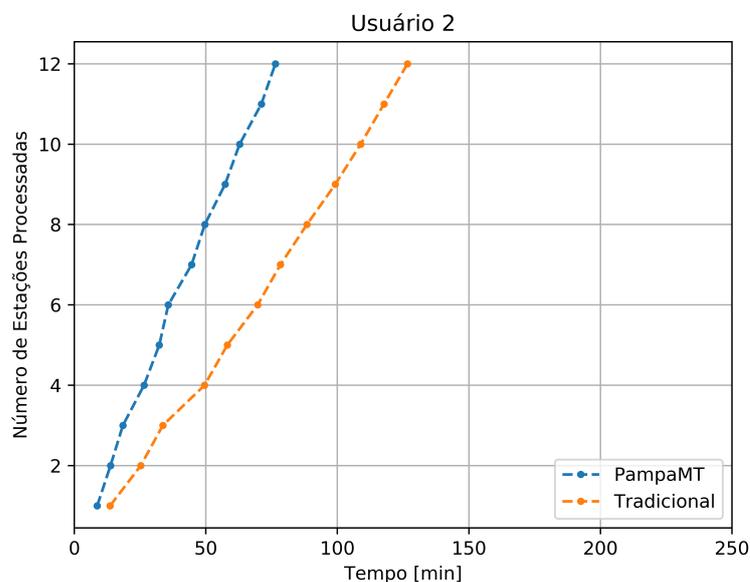


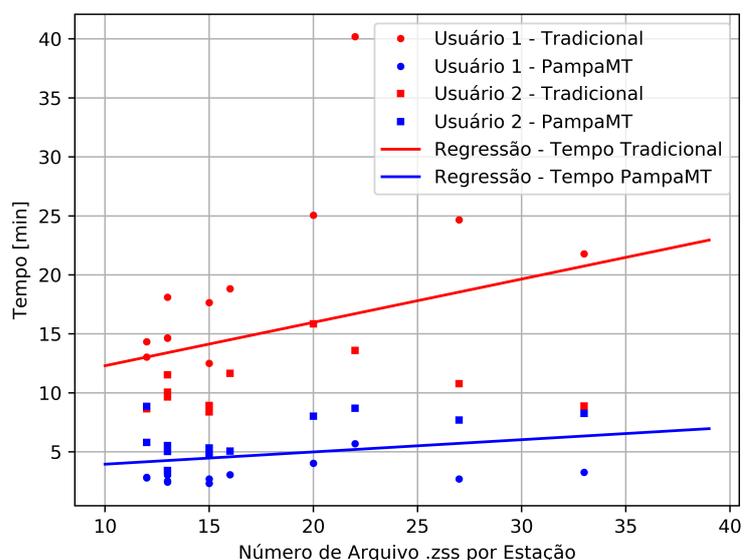
Figura 22 – Tempo Comparando o Tempo de Pré-processamento – Usuário 2



Fonte: O autor, 2018

Utilizando um modelo de regressão simples (Figura 23) a partir dos dados obtidos de tempo, pode-se estimar que para grandes projetos, com cerca de 100 estações magnetotelúricas, o tempo de pré-processamento pode ser reduzido de 25 horas para cerca de 6 horas utilizando o PampaMT, ou seja um processamento que pode levar até 3 dias pode ser reduzido para apenas um dia de trabalho, reforçando a eficiência no que diz respeito ao tempo do processamento.

Figura 23 – Modelo de Regressão para Tempo de Processamento



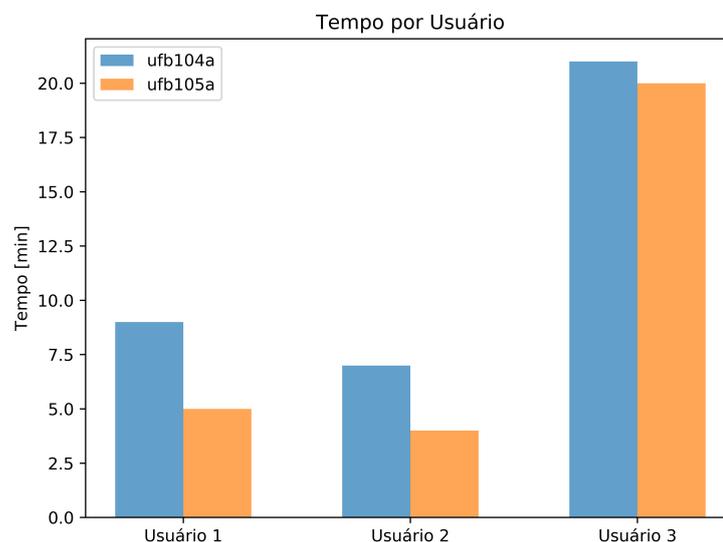
Fonte: O autor, 2018

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Expandindo os testes alfa do programa foi proposto o teste com usuários, que diferentes dos primeiros, não possuem nenhuma familiaridade com o terminal *shell* implicando em não possuírem familiaridade com o processamento de dados MT. Os testes aplicados sobre esses usuários procedeu, partindo de uma explicação de como é a metodologia de processamento de dados. Concluído a explanação de como é realizado o processamento, os usuários foram instruídos a processar duas estações magnetotelúricas reais contando apenas com a intuitividade da interface do PampaMT, os mesmos usuários foram avaliados no quesito de tempo e dificuldade para realizar tais processos.

Os resultados obtidos nesse segundo teste pode ser visto na figura 24, os três usuários testados obtiveram sucesso no processamento com um tempo hábil de em média 10 minutos para cada estação. No quesito de intuitividade os primeiros processos, como: conversão dos dados e o cálculo do tensor impedância, todos os usuários executaram sem qualquer dificuldade. Entretanto para a segunda parte, que consiste na escolha dos melhores períodos, os usuários necessitaram de uma segunda explicação de como procedia o processo. Esse fato pode ser resolvido com a implementação de tutoriais na seção de ajuda no programa, onde já está prevista tal implementação em versões futuras do programa.

Figura 24 – Tempo de Processamento – Teste Alfa



Fonte: O autor, 2018.

A partir dos resultados do segundo teste, provou-se que novos usuários que desejam trabalhar com dados MT consigam executar tal tarefa de forma fácil. Ao mesmo passo podem aprender como deve ser feito o processamento dos dados via terminal, habilitando a janela de visualização, onde são mostrados como são realizados os comandos internos no programa. Esse

fato propicia que o PampaMT seja aplicado para novos alunos de graduação, mestrado ou até mesmo doutorado, expandindo também para minicursos e pequenos treinamentos.

### **7.1 Desenvolvimentos Futuros para o PampaMT**

Após o desenvolvimento do PampaMT para o presente trabalho e também após a utilização do mesmo para processamentos efetivos, propôs-se o desenvolvimento de novas funções e ferramentas, bem como, técnicas que possam melhorar a eficiência na utilização. Portanto o desenvolvimento do programa será continuado, a seguir são apresentadas algumas funções ou ideias que serão implementadas com a continuidade do projeto.

- Ampliar a API de comunicação com o EMTF, visando extrair ao máximo as funções dele;
- Implementar novas técnicas de análises temporais, alternativas ao EMTF;
- Adicionar novos processamentos, como: inversão 1D; inversão 2D e 3D;
- Adicionar construtores de grades para os referidos processos de inversão;
- Distribuir programa para outros sistemas operacionais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. D. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 17, n. 1-2, p. 1–29, 1981.
- BARBOSA, A. N. **Estudo Magnetotelúrico na Região Centro-Sul da Província Borborema**. UNIPAMPA: [s.n.], 2017. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Brazil. Departamento Nacional da Produção Mineral; BRUNI, M. A. L. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Aracaju (Sc. 24)**. [S.l.]: O Departamento, 1976.
- CAGNIARD, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.
- CYTHON. 2018. Cython. Disponível em: <http://docs.cython.org/en/latest/#>. Acesso em: 23 out. 2018.
- EGBERT, G. D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. **Geophysical Journal International**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 130, n. 2, p. 475–496, 1997.
- EGBERT, G. D. **Errors Bars for Transfer Function Elements in Z-files**. [S.l.], 1998. Disponível em: <ftp://ftp.oce.orst.edu/dist/egbert/EMTF/EMTF.tar.gz>. Acesso em: 07 out. 2018.
- EGBERT, G. D.; BOOKER, J. R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, Wiley Online Library, v. 87, n. 1, p. 173–194, 1986.
- GEOMA. 2018. Grupo de Geomagnetismo. Disponível em: <http://www.dge.inpe.br/geoma/>. Acesso em: 9 dez. 2018.
- GEOMAMT. 2018. Geomamt. Disponível em: <https://github.com/mtgeoma/geomamt>. Acesso em: 8 dez. 2018.
- HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre, Brazil: AMGH Editora Ltda., 2013.
- JONES, A. G. **Magnetotelluric data file J-format: v2.0**. [S.l.], 1994. Disponível em: <http://mtnet.info/docs/jformat.txt>. Acesso em: 07 out. 2018.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy Documentation - Release 1.11.0.dev0**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://media.readthedocs.org/pdf/kivy/latest/kivy.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy Language - Release 1.0.0**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://kivy.org/doc/stable/api-kivy.lang.html>. Acesso em: 24 out. 2018.
- MEDEIROS, V. C. d. **Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da zona transversal, NE do Brasil**. Tese (Doutorado) — Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2004.
- MTnet. 2018. MTNet. Disponível em: <http://mtnet.info/main/index.html>. Acesso em: 19 set. 2018.

- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **The Generic Mapping Tools**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>. Acesso em: 07 out. 2018.
- NYQUIST, H. Certain topics in telegraph transmission theory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.
- OPENGL. 2018. OpenGL. Disponível em: <https://www.opengl.org/>. Acesso em: 23 out. 2018.
- PADILHA, A. L. et al. Deep magnetotelluric signatures of the early neoproterozoic cariris velhos tectonic event within the transversal sub-province of the borborema province, ne brazil. **Precambrian Research**, Elsevier, v. 275, p. 70–83, 2016.
- PÁDUA, M. B. d. **Estudos de indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do cráton de São Francisco**. Tese (Doutorado) — Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004.
- PÁDUA, M. B. d.; PÁDUA, M. B. d. **Programas do Grupo GEOMA**. [S.l.], 2018. (Obtido sob comunicação privada).
- PALACKY, G.; WEST, G. Airborne electromagnetic methods. In: **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1991. p. 811–880.
- PARKER, R. L.; BOOKER, J. R. Optimal one-dimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Elsevier, v. 98, n. 3-4, p. 269–282, 1996.
- PARKINSON, W. D. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983.
- SANTOS, A. C. et al. Deep structure of a stretched lithosphere: Magnetotelluric imaging of the southeastern borborema province, ne brazil. **Tectonophysics**, Elsevier, v. 610, p. 39–50, 2014.
- SANTOS, A. C. L. d. **Imageamento magnetotelúrico de estruturas da litosfera na porção SE da Província Borborema**. Tese (Doutorado) — Brasil. Universidade de Brasília (UNB), 2012.
- SCHMUS, W. V. et al. Proterozoic links between the borborema province, ne brazil, and the central african fold belt. **Geological Society, London, Special Publications**, Geological Society of London, v. 294, n. 1, p. 69–99, 2008.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. New York, USA: British Library Cataloguind, 1990.
- TIKHONOV, A. On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Dolk. Acad. Nauk. SSSR**, v. 73, p. 295–297, 1950.
- WIGHT, D.; BOSTICK, F. Cascade decimation—a technique for real time estimation of power spectra. In: IEEE. **Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'80**. [S.l.], 1980. v. 5, p. 626–629.
- WIGHT, D. E. **The SEG Standard for Magnetotelluric Data**. [S.l.], 1988. Disponível em: <http://www.complete-mt-solutions.com/mtnet/docs/ediformat.txt>. Acesso em: 10 nov. 2018.

## APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PAMPAMT

O programa PampaMT esta armazenado no servidor GitHub, atualmente o mesmo é a maior comunidade de códigos fontes, nela podemos encontrar o *Kernel Linux*, a plataforma SU (*Seismic Unix*), o pacote  $\text{abnT}_{\text{E}}\text{X}_2$ , dentre um vasto catálogo de outros projetos.

Repositório com o código fonte na data de entrega do trabalho de conclusão de curso.



$\langle$ <https://github.com/PatrickRogger/PampaMT> $\rangle$

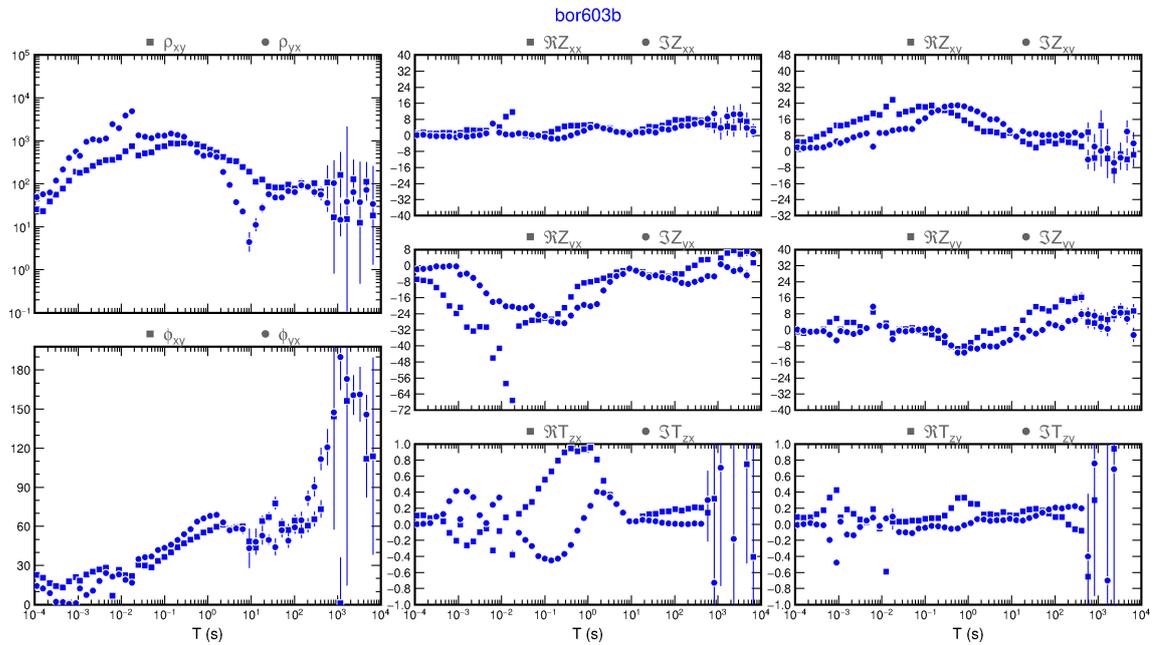
Repositório com o código fonte para desenvolvedores.



$\langle$ <https://github.com/PampaMT/PampaMT> $\rangle$

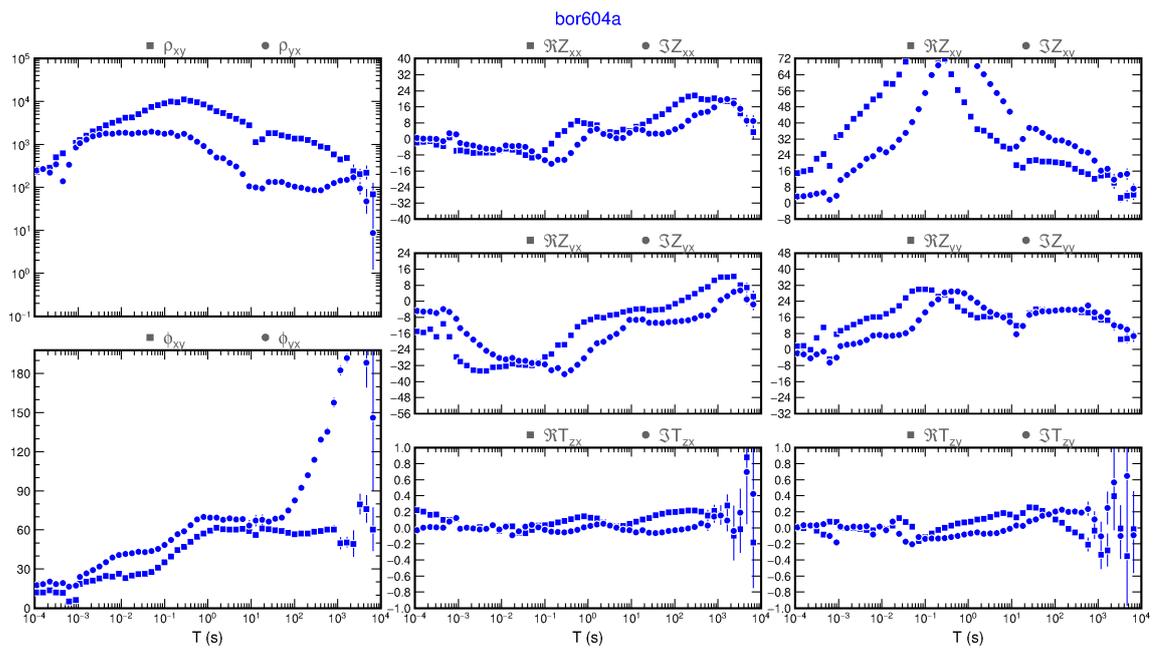
## APÊNDICE B – PROCESSAMENTO USANDO O MÉTODO TRADICIONAL

Figura 25 – Manual – bor603b



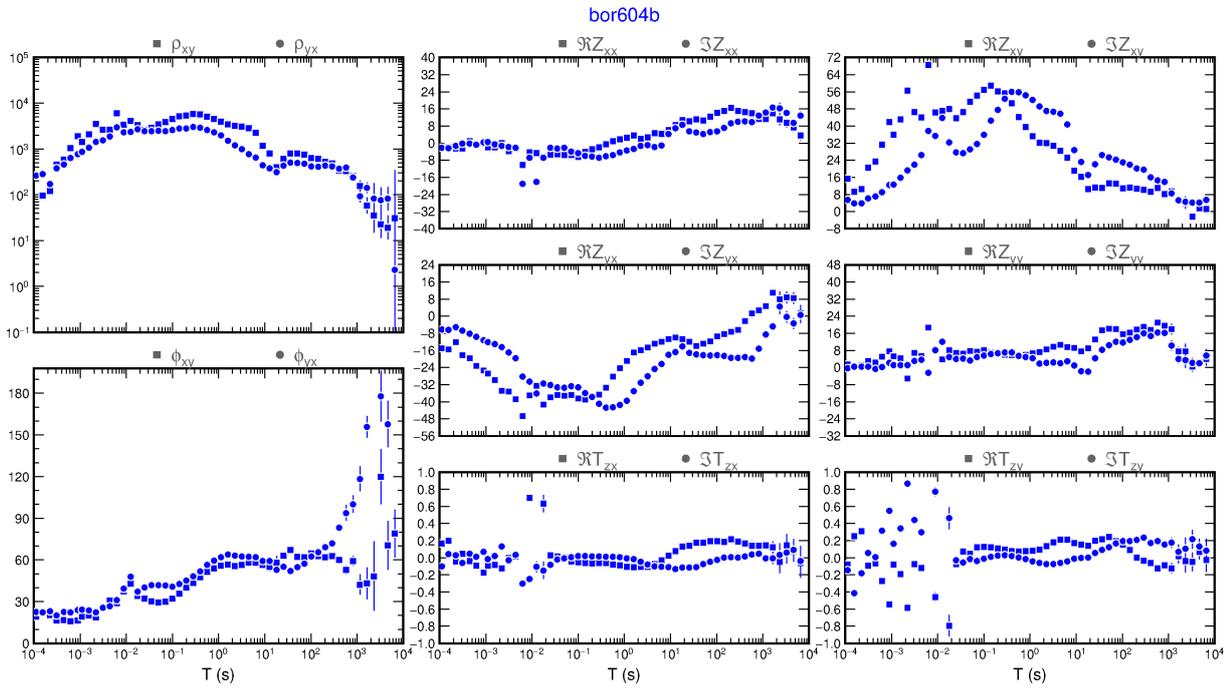
Fonte: O autor, 2018.

Figura 26 – Manual – bor604a



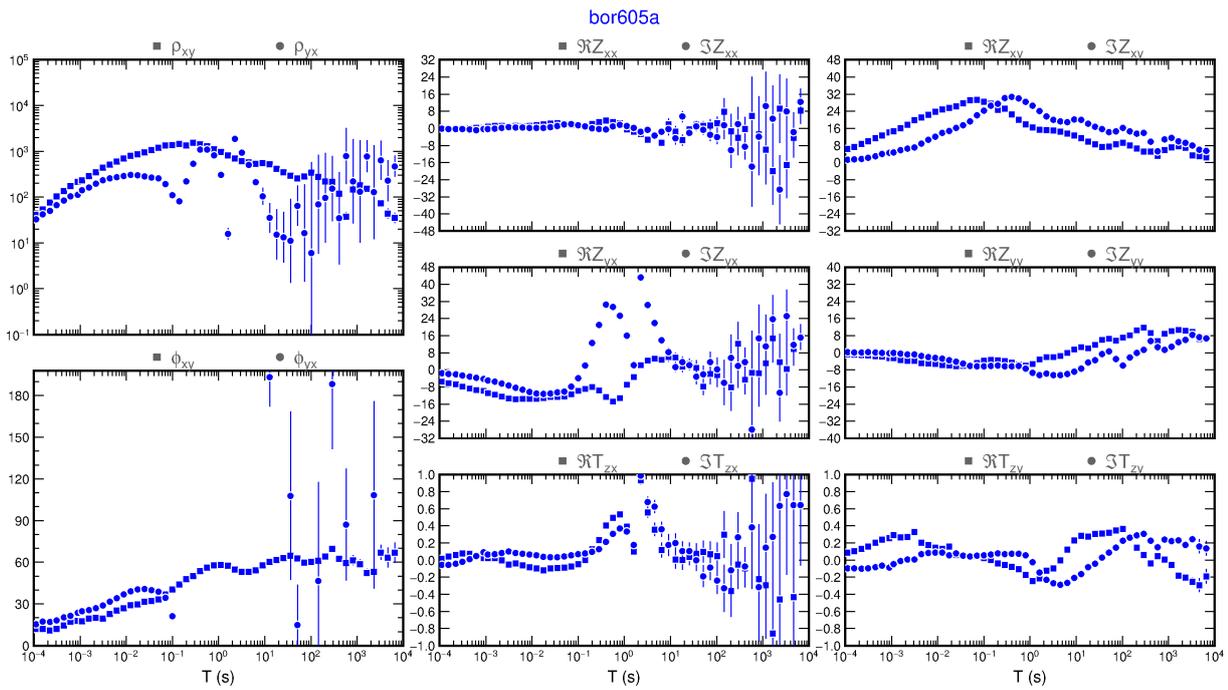
Fonte: O autor, 2018.

Figura 27 – Manual – bor604b



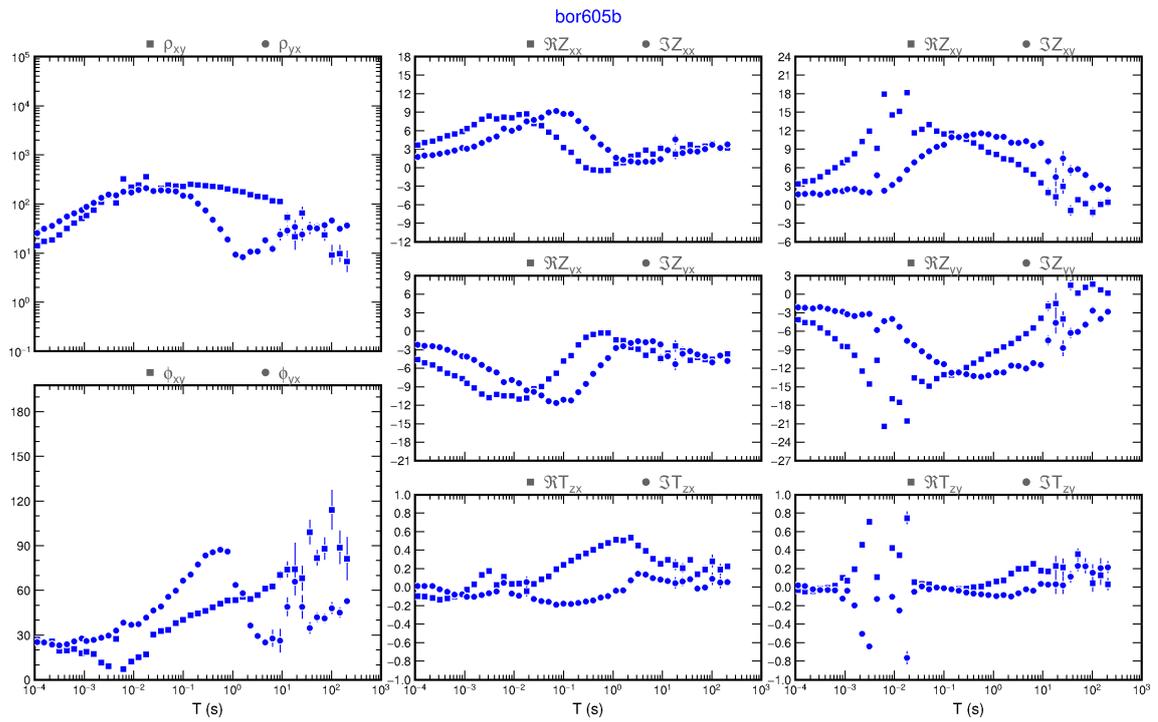
Fonte: O autor, 2018.

Figura 28 – Manual – bor605a



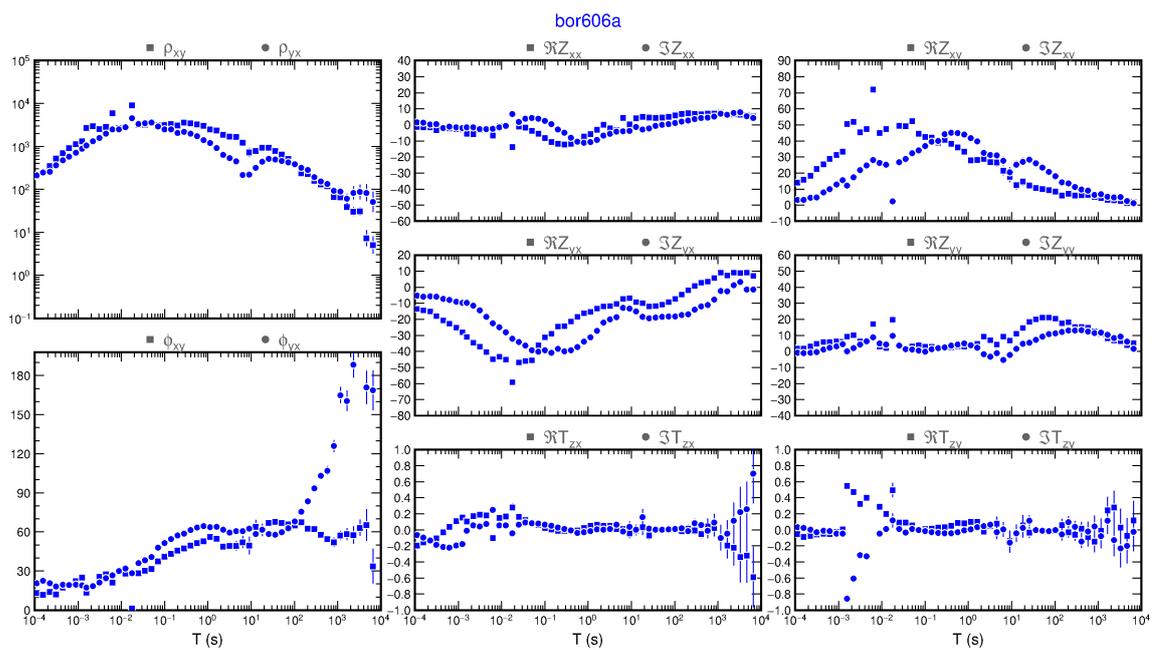
Fonte: O autor, 2018.

Figura 29 – Manual – bor605b



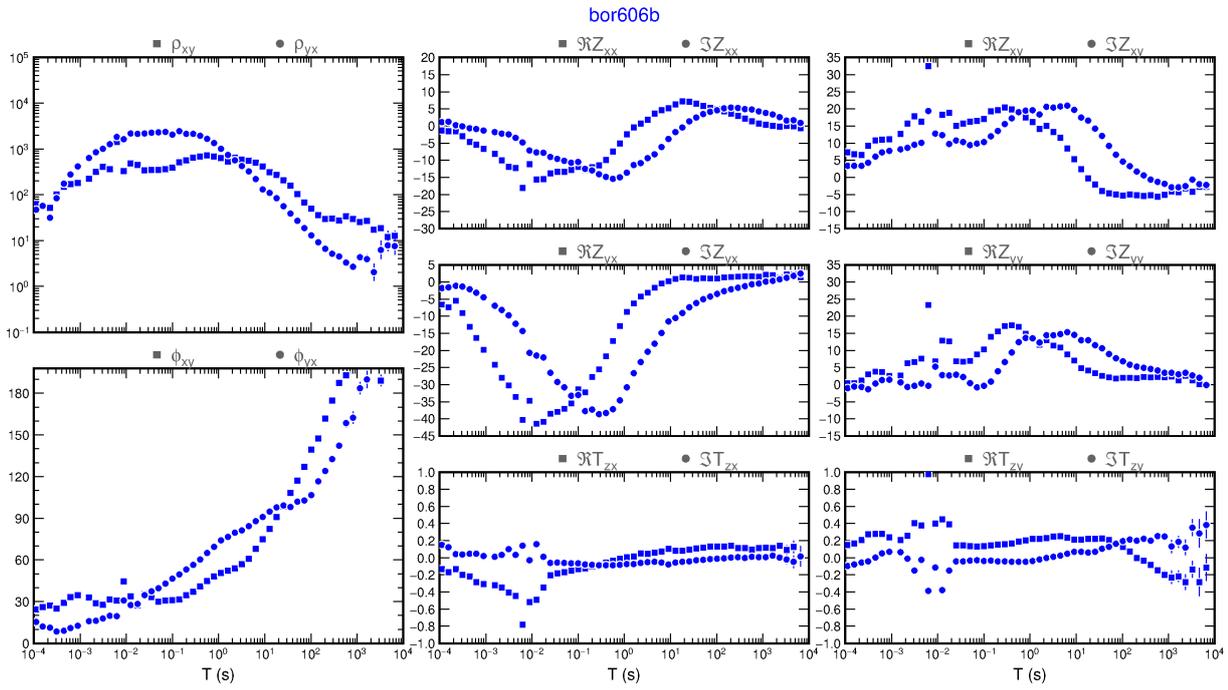
Fonte: O autor, 2018.

Figura 30 – Manual – bor606a



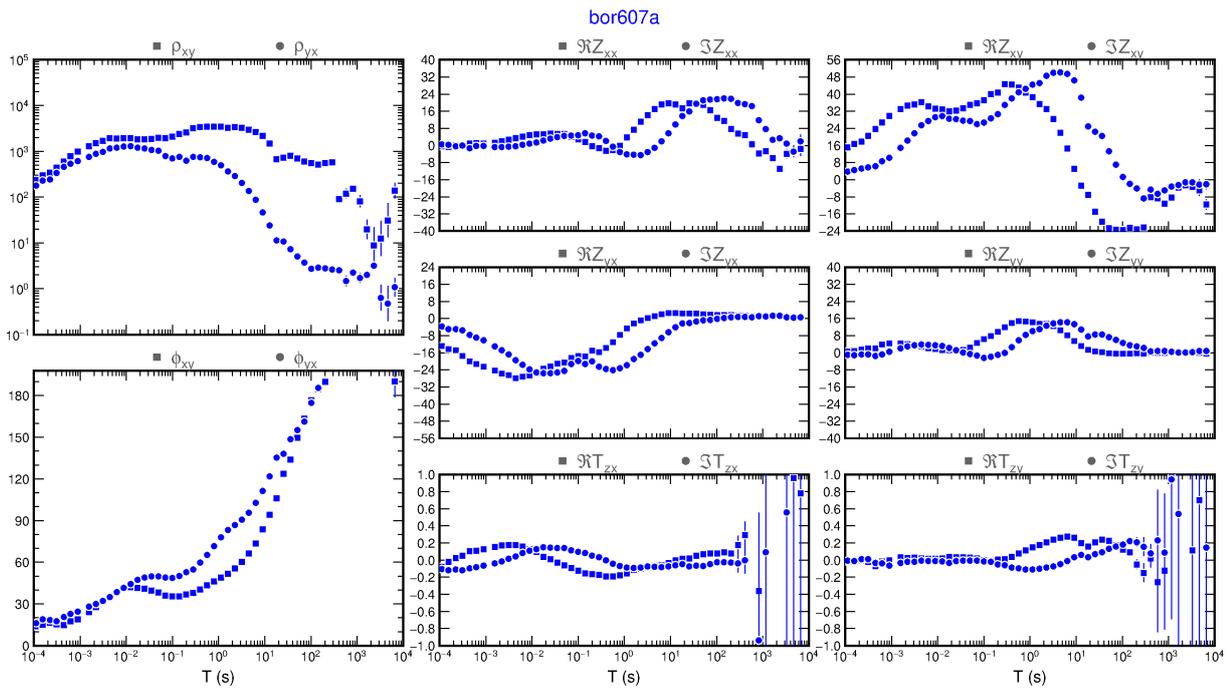
Fonte: O autor, 2018.

Figura 31 – Manual – bor606b



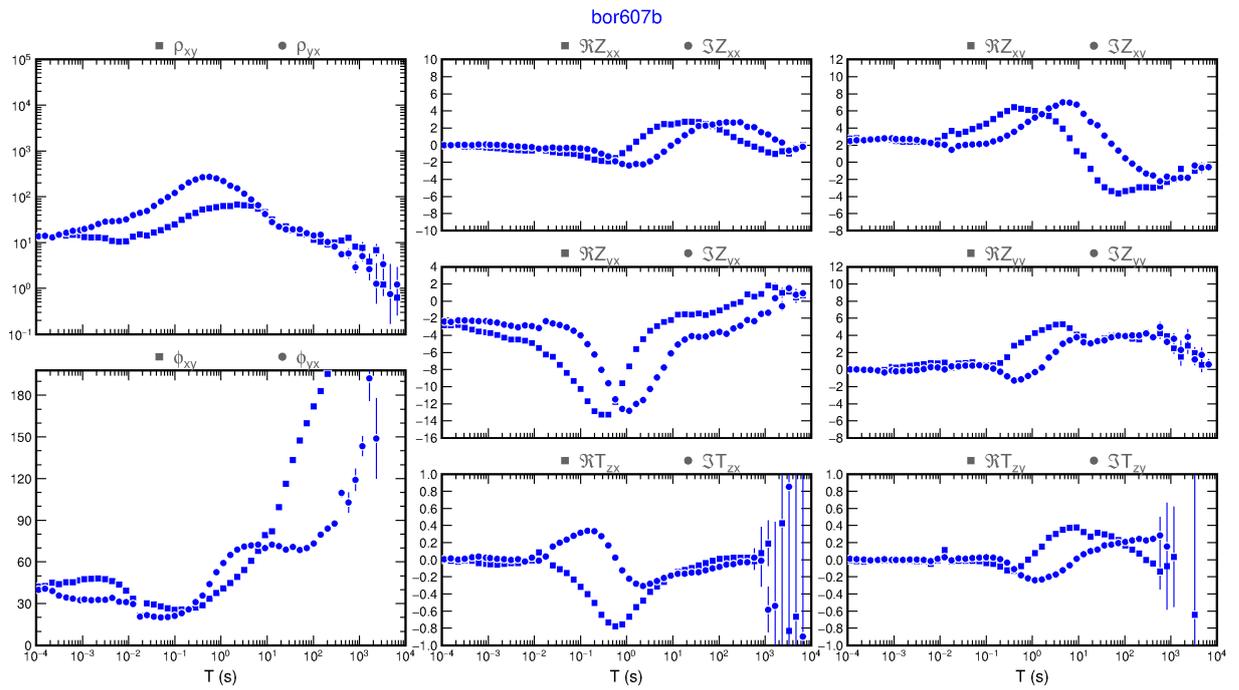
Fonte: O autor, 2018.

Figura 32 – Manual – bor607a



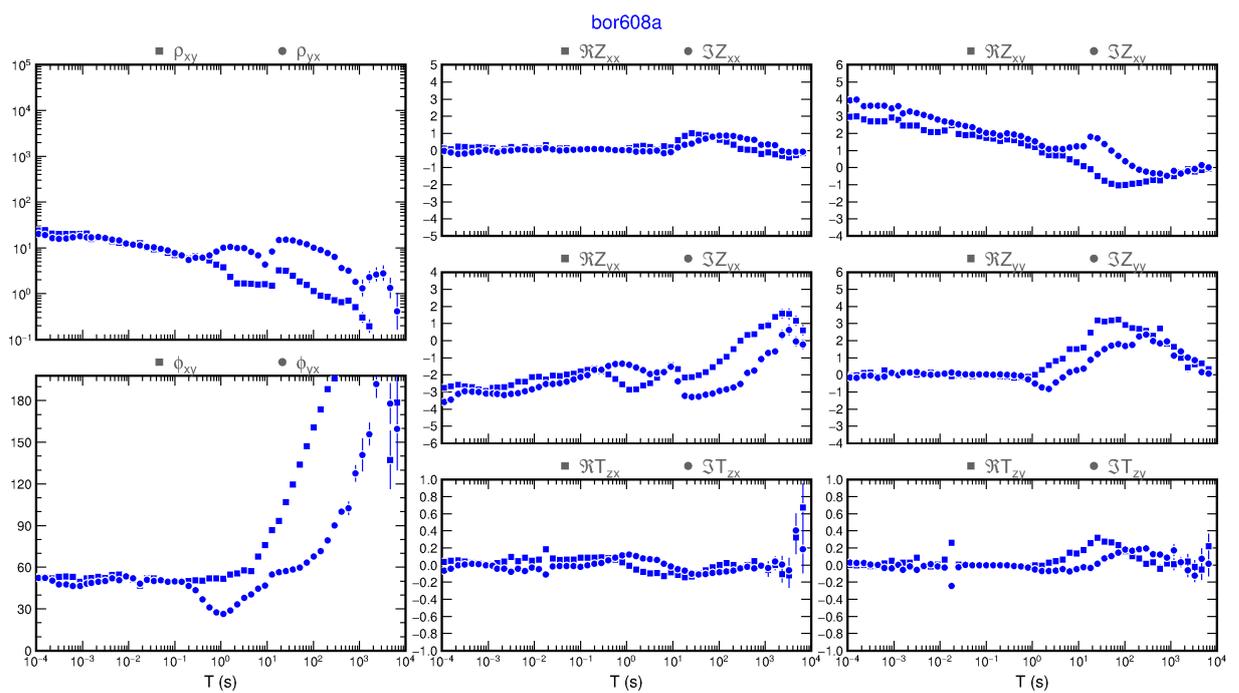
Fonte: O autor, 2018.

Figura 33 – Manual – bor607b



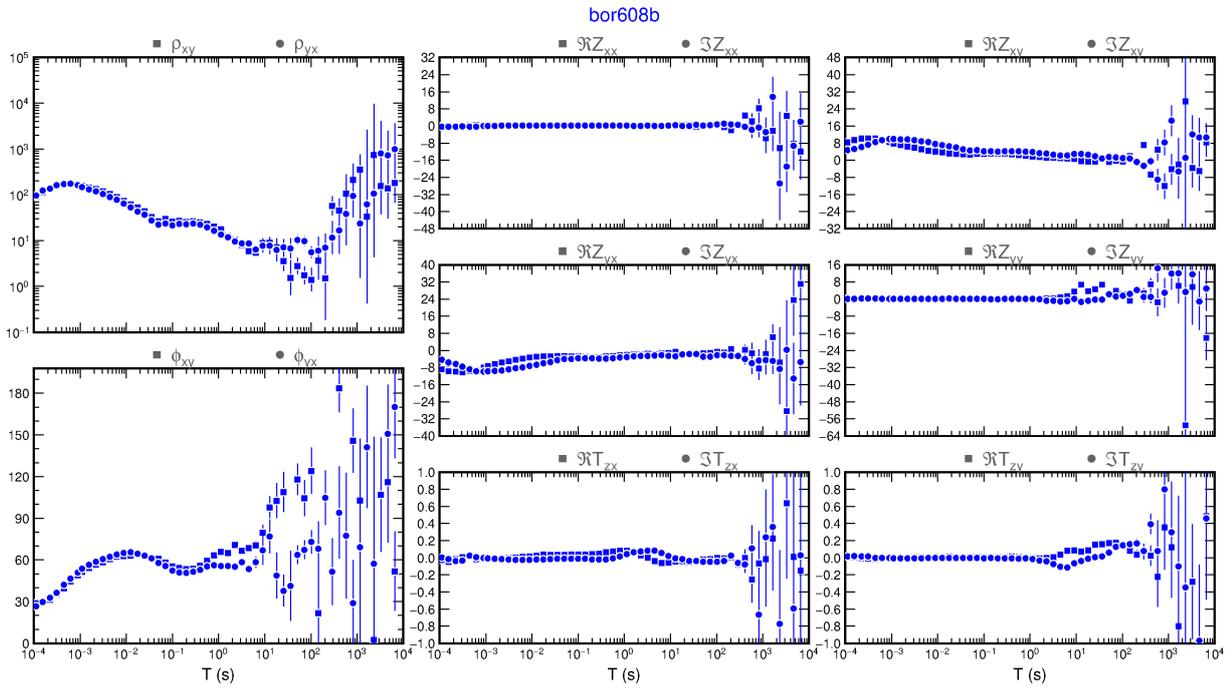
Fonte: O autor, 2018.

Figura 34 – Manual – bor608a



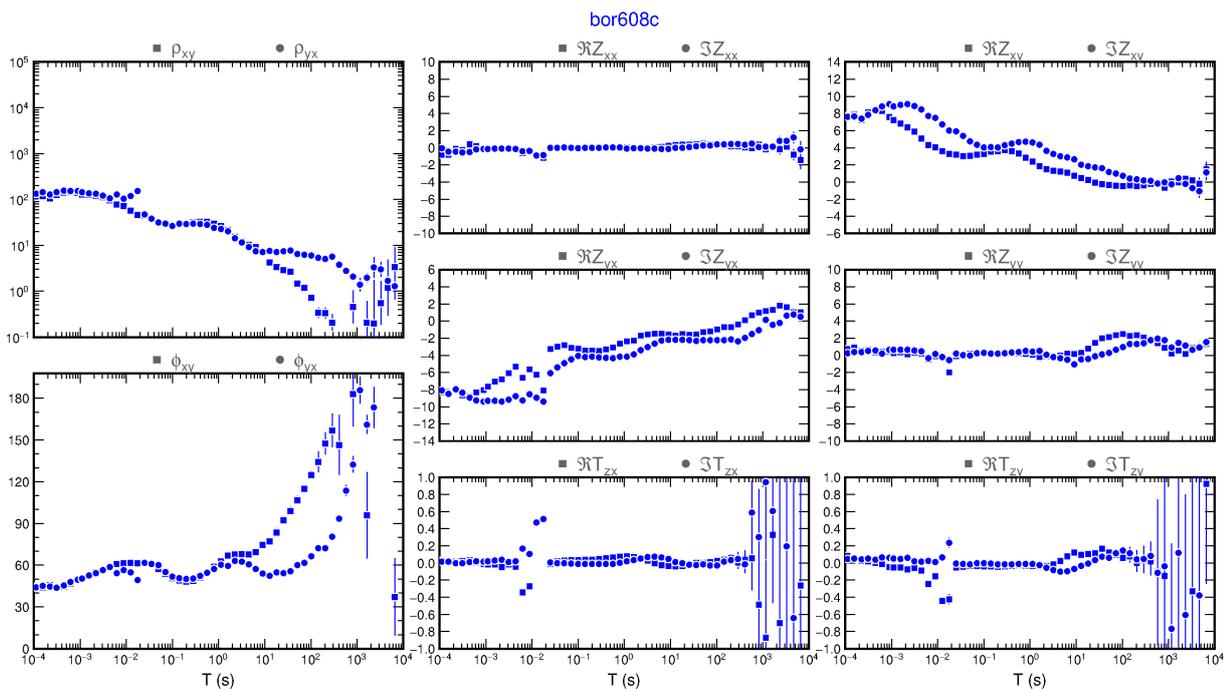
Fonte: O autor, 2018.

Figura 35 – Manual – bor608b



Fonte: O autor, 2018.

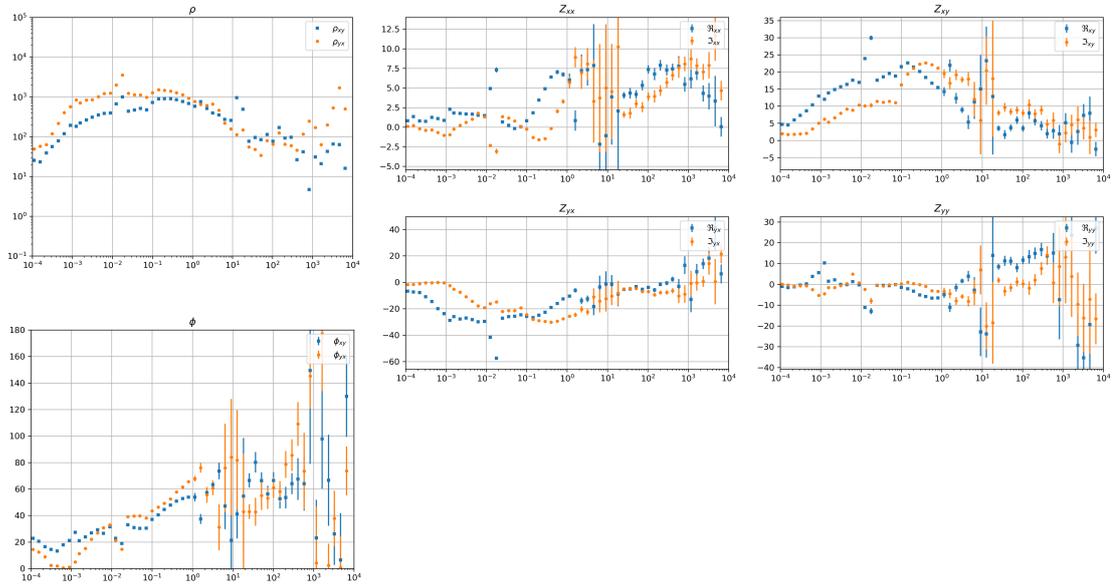
Figura 36 – Manual – bor608c



Fonte: O autor, 2018.

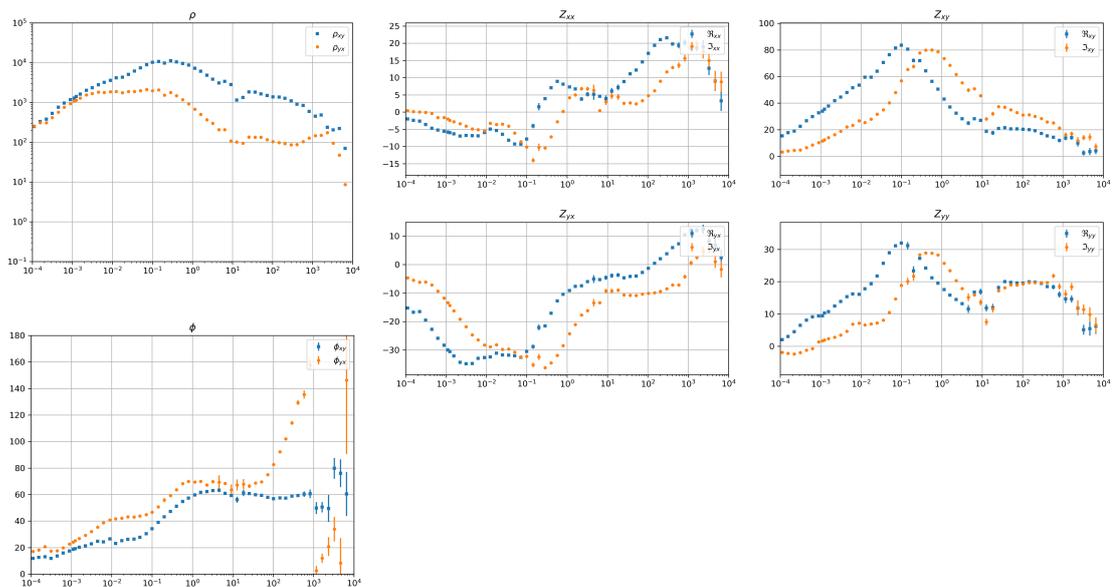
## APÊNDICE C – PROCESSAMENTO USANDO O PAMPAMT

Figura 37 – PampaMT – bor603b



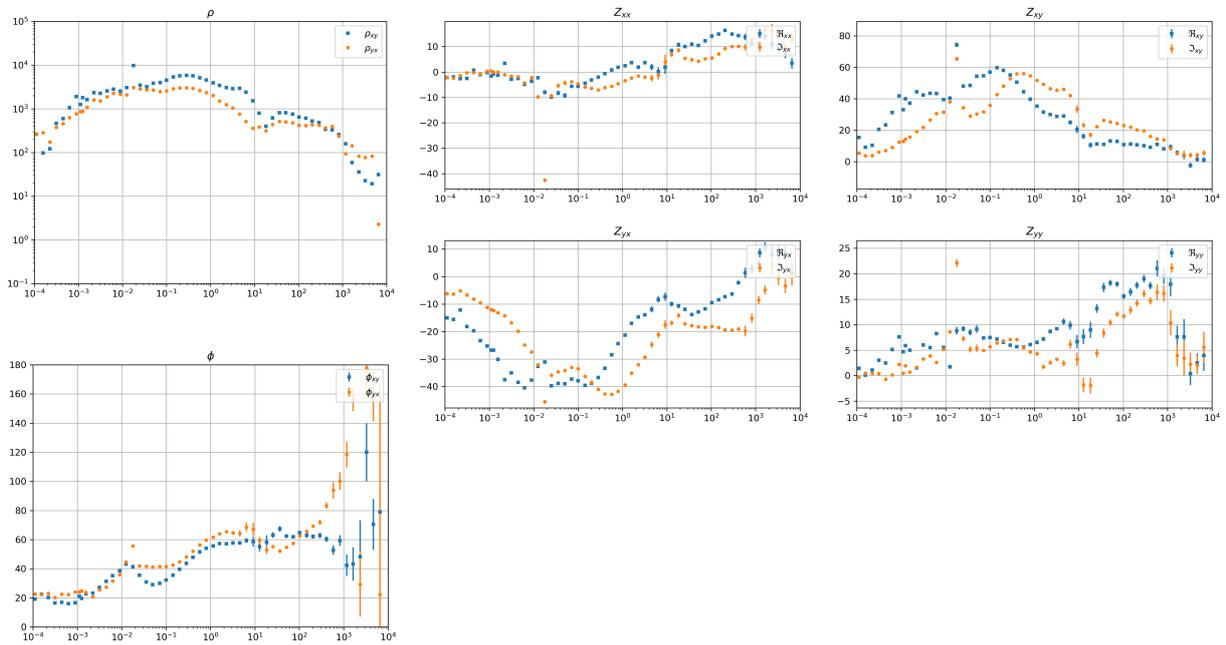
Fonte: O autor, 2018.

Figura 38 – PampaMT – bor604a



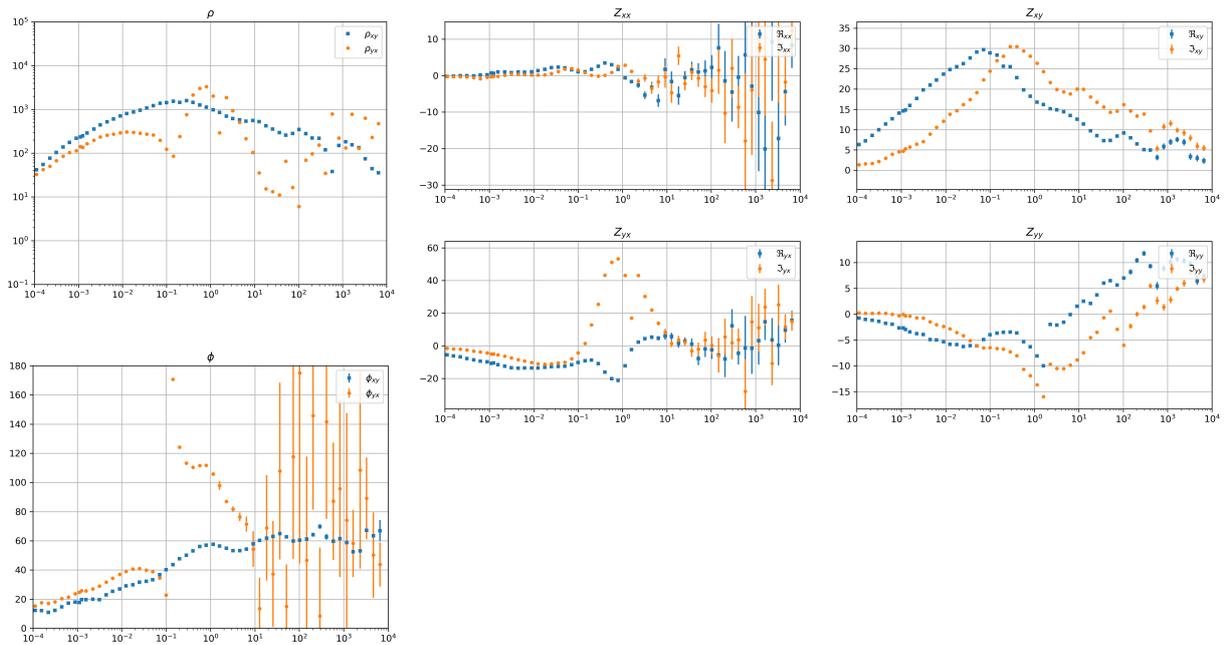
Fonte: O autor, 2018.

Figura 39 – PampaMT – bor604b



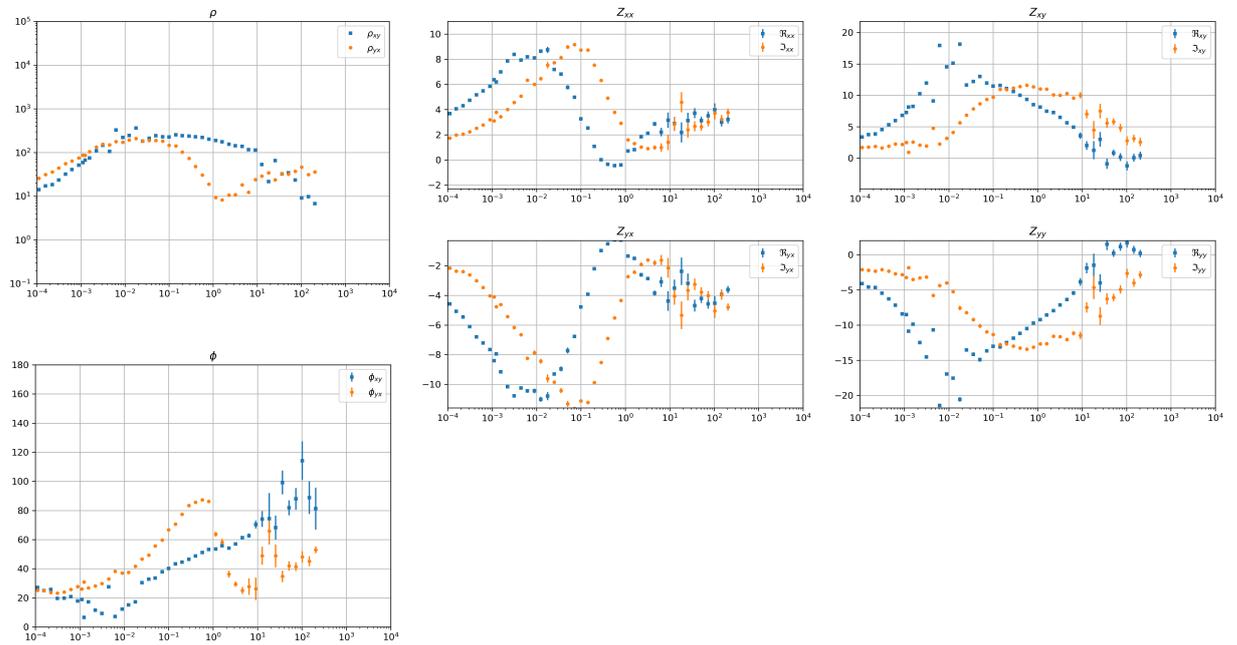
Fonte: O autor, 2018.

Figura 40 – PampaMT – bor605a



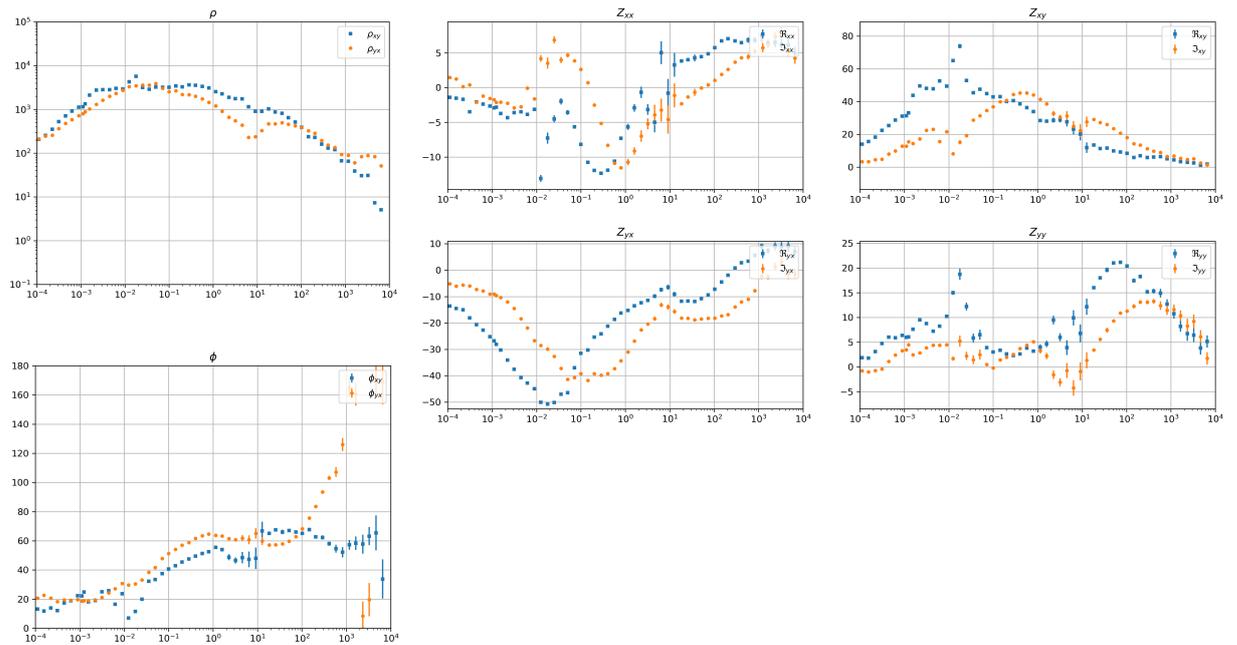
Fonte: O autor, 2018.

Figura 41 – PampaMT – bor605b



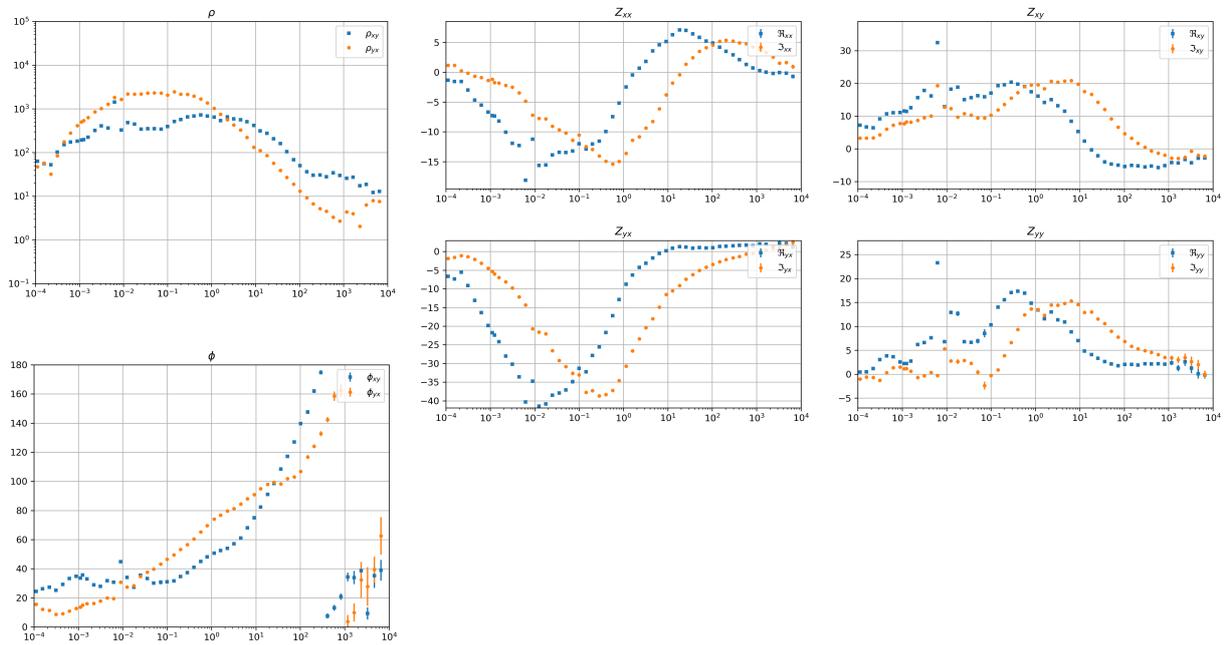
Fonte: O autor, 2018.

Figura 42 – PampaMT – bor606a



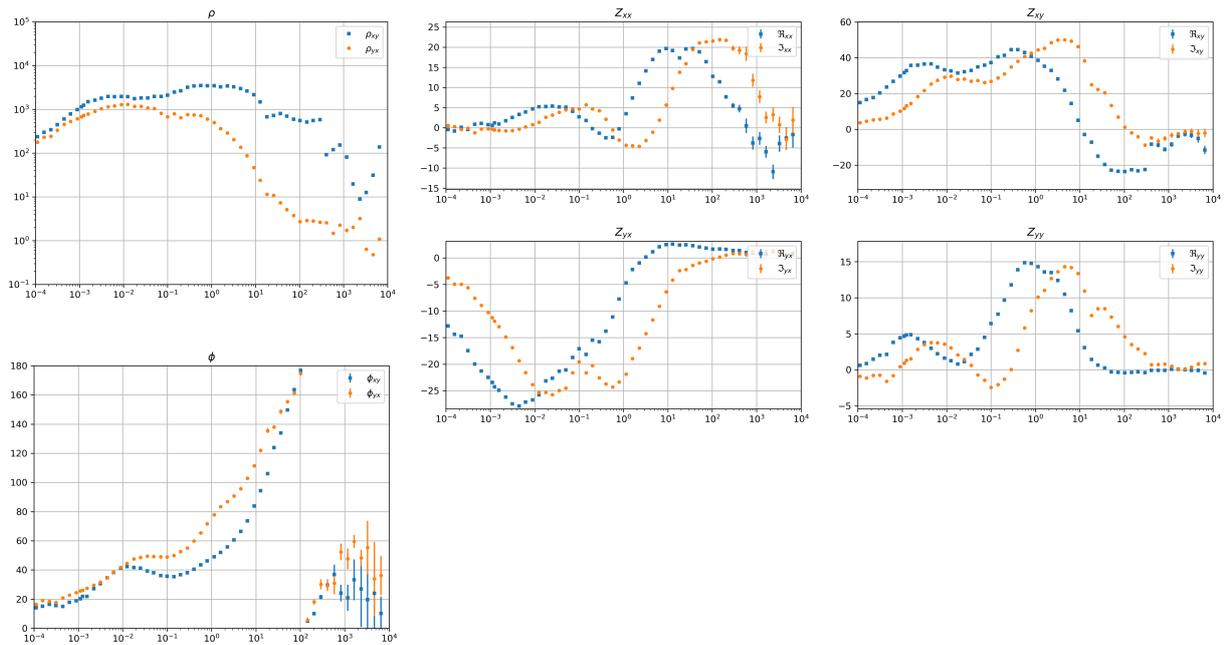
Fonte: O autor, 2018.

Figura 43 – PampaMT – bor606b



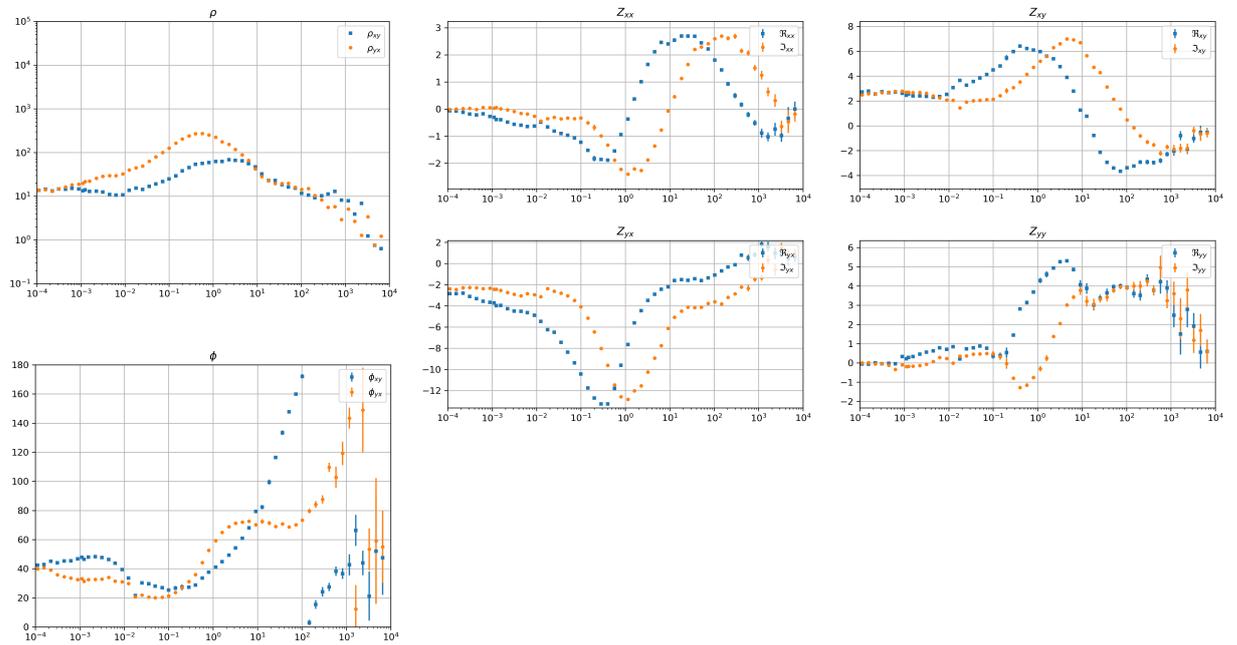
Fonte: O autor, 2018.

Figura 44 – PampaMT – bor607a



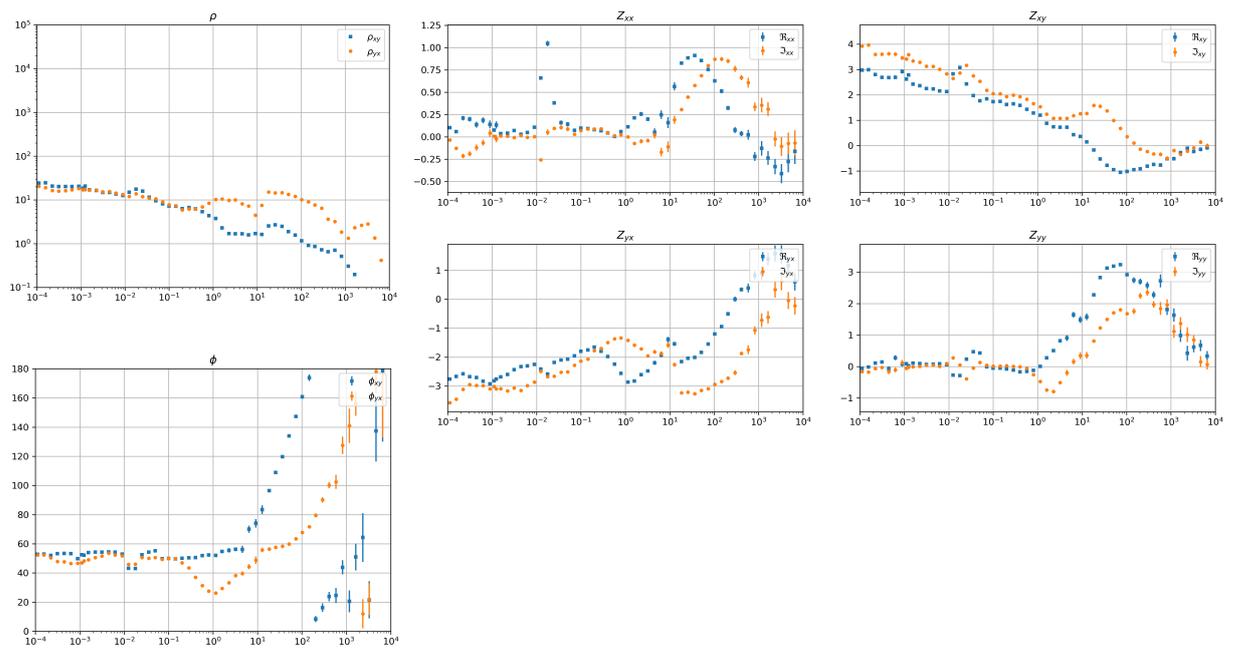
Fonte: O autor, 2018.

Figura 45 – PampaMT – bor607b



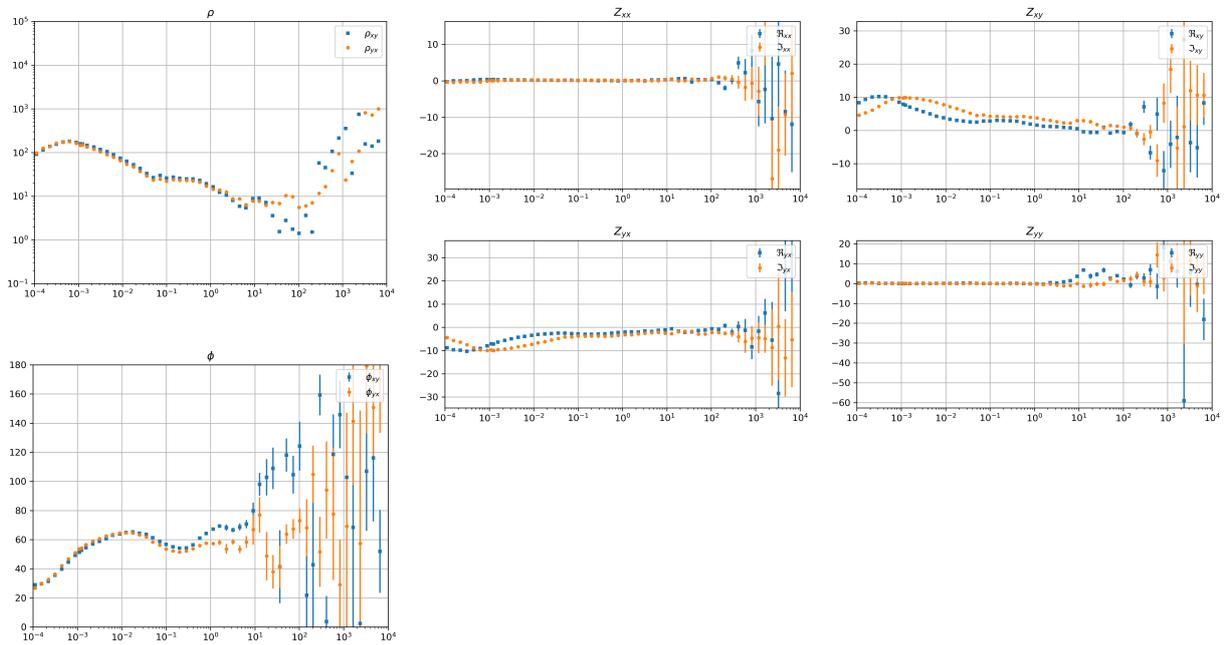
Fonte: O autor, 2018.

Figura 46 – PampaMT – bor608a



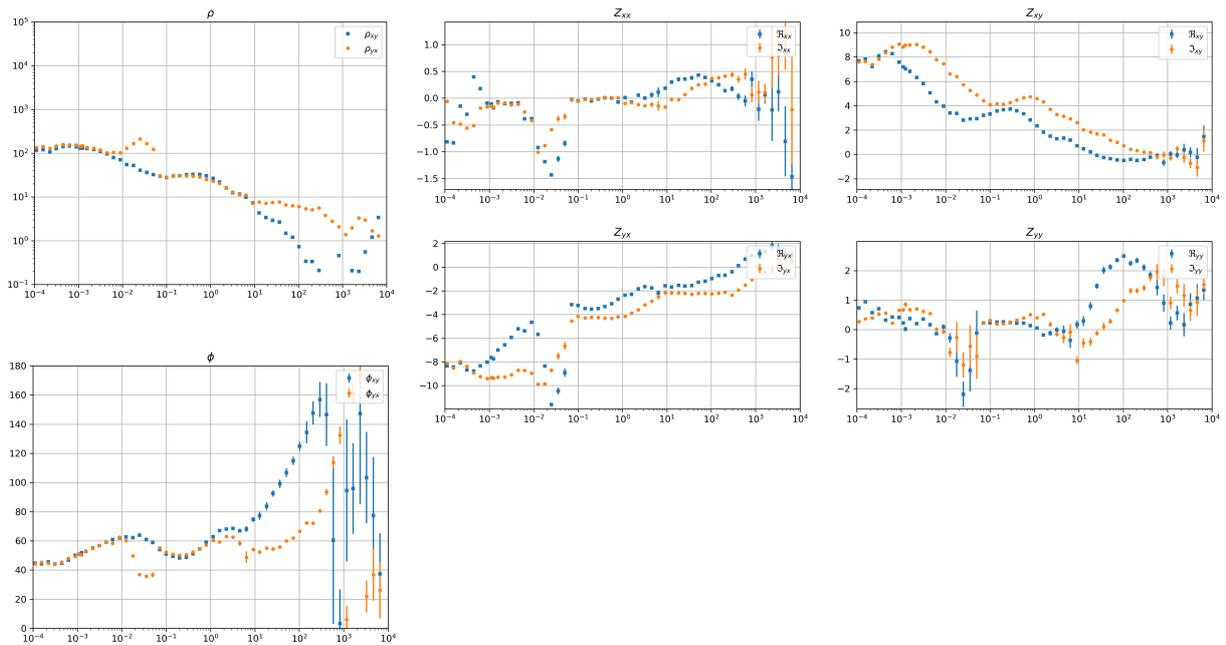
Fonte: O autor, 2018.

Figura 47 – PampaMT – bor608b



Fonte: O autor, 2018.

Figura 48 – PampaMT – bor608c



Fonte: O autor, 2018.