



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ELENILTON BEZERRA UCHOA

**TRANSECTO MAGNETOTELÚRICO ENTRE O CRÁTON SÃO LUÍS, FAIXA
GURUPI E A BACIA DO PARNAÍBA, N-NE BRASIL**

FORTALEZA

2020

ELENILTON BEZERRA UCHOA

TRANSECTO MAGNETOTELÚRICO ENTRE O CRÁTON SÃO LUÍS, FAIXA
GURUPI E A BACIA DO PARNAÍBA, N-NE BRASIL

Tese de doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Christiano Magini.

Coorientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- U19t Uchoa, Elenilton Bezerra.
Transecto magnetotelúrico entre o cráton São Luís, faixa Gurupi e a bacia do parnaíba, N-Ne Brasil / Elenilton Bezerra Uchoa. – 2020.
146 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Christiano Magini.
Coorientação: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

1. Magnetotelúrico. 2. Cráton São Luís. 3. Lineamentos. 4. Cinturão Gurupi. I. Título.

CDD 551

ELENILTON BEZERRA UCHOA

TRANSECTO MAGNETOTELÚRICO ENTRE O CRÁTON SÃO LUÍS, FAIXA
GURUPI E A BACIA DO PARNAÍBA, N-NE BRASIL

Tese de doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em 02 / 07 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Christiano Magini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sebastián González Chiozza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Roberta Esposito
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Ao meu grande amigo Raimundo Uchôa
(Avô).

*When I heard that you were gone I felt a
shadow cross my heart* (Nobody's Hero,
Rush)

AGRADECIMENTOS

O autor reconhece e é grato por todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja indiretamente, pelo importante suporte afetivo da família e amigos, ou de forma direta, através do suporte técnico e científico.

Gostaria de agradecer pela minha amada esposa e companheira Mirian Silva de Oliveira Uchoa que fez parte de todo o percurso desde a preparação do extinto vestibular até o doutorado. Obrigado pelo apoio, paciência, aconchego e carinho em todos estes momentos.

Agradeço a toda minha família Uchoa que me forneceu um abrigo muito importante durante a minha primeira infância. Em especial ao meu Pai e Avô Raimundo Uchoa Diógenes Butão que se foi e nos deixou com uma saudade difícil de cicatrizar. Ao meu Pai Evilan Carvalho Uchoa pelo empenho paciente, atencioso e carinhoso durante os meus tempos na Escola de Ensino Fundamental e Médio Antônio Bezerra (Grupo). Aos meus Irmãos Júnior, Evilânia e Nevinha, sobreviventes, que ainda tão jovens tiveram que duelar com o mundo, e hoje, contra todas as adversidades que se possa supor, tornarem-se pessoas sensacionais. Sou grato ainda por todos os meus tios (Evilásio, Evilarde e Regilásio) e tias (Vitória, Régia e Regilane) pela atenção em diversos momentos.

Ao meu orientador Christiano Magini por todo foco e atenção na tomada de decisões e resolução de problemas desta tese.

Ao meu coorientador Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco pelas portas abertas no LGPSR durante o meu retorno à academia e por todo suporte técnico de nível altíssimo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFC juntamente com todo o qualificado corpo docente na qual pude ter esta oportunidade riquíssima durante todo este período de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao INCT (Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia) pelo fomento fornecido para etapa de campo.

Ao Prof. Dr. Reinhardt Adolfo Fuck por todo apoio e suporte, além da contribuição na tomada de decisão em relação ao posicionamento da linha MT.

Extremamente agradecido por todos os companheiros do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto, em especial Nilton, Jackson e Charles que dedicaram um tempo durante a aquisição dos dados desta tese no Maranhão.

Grato ao Nilton Cesar Vieira Silva, que durante a longa e minuciosa etapa de processamento dos dados teve paciência e dedicação para alcançarmos um alto grau de excelência nos procedimentos metodológicos de dados magnetotelúricos.

Agradecido ao Jackson Alves Martins pelo apoio na concepção da ideia desta tese juntamente com o Prof. Christiano.

Ao grande amigo Fabiano Mota da Silva pelos momentos de força e apoio técnico de alto nível. Além das situações leves quando relembávamos dos tempos de graduação. Que tempos!

Aos meus amigos professores Dr. Pablo Gordiano Alexandre Barbosa e Dr. Francisco Walber Ferreira da Silva pelos preciosos debates científicos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, sou grato à banca pelo tempo, dedicação e sugestões para aprimoramento desta tese de doutorado.

“Fala o desiludido. – Eu buscava grandes homens, e sempre achei apenas os macacos de seu ideal.” Friedrich Nietzsche

RESUMO

A área de pesquisa localiza-se na porção N-NE do Brasil (Maranhão) cruzando os seguintes domínios tectônicos: fragmento cratônico São Luís, faixa Gurupi, bacias do Parnaíba e São Luís e coberturas cenozoicas. O método MT (magnetotelúrico) consiste numa técnica geofísica que utiliza as variações naturais dos campos elétrico e magnético terrestre para investigar as características geoeletricas do subsolo. O objetivo deste trabalho reside em elaborar um transecto MT de 180 km (comprimento) x 10 km (profundidade) com direção NNW-SSE com intuito de elaborar um *guideline* de uma campanha MT, realizar a caracterização geoeletrica e geológica dos domínios tectônicos da área, além de propor exercícios de correlação entre os crátons São Luís e Oeste Africano. O método de trabalho engloba as seguintes etapas com base nos princípios do método MT: instrumentação MT, coleta do dado, processamento dos dados, análise de dimensionalidade, inversão dos dados (modelo MT), integração e interpretação geológica. Foi elaborado um guia de procedimentos e cuidados nas fases de aquisição, processamento, remoção de ruídos, cálculo dos tensores de impedância e elaboração de produtos numa campanha MT. Através desse *guideline* foi criado um modelo geofísico MT inédito entre o fragmento cratônico SL, faixa Gurupi, Bacias do Parnaíba e São Luís. A seção geofísica 2D (TE+TM) apresentou porções condutivas superficiais (bacias Parnaíba, São Luís e coberturas sedimentares), resistivas (cráton São Luís) e muito resistivas (faixa móvel Gurupi). O modelo geológico interpretado contribuiu com a indicação dos contatos laterais dos domínios tectônicos, limite cratônico, ajuste litoestratigráfico na porção sul da seção e resgate dos exercícios de correlação entre os crátons SL e OA, observado entre as faixas Gurupi (Brasil) e Rokelide (Liberia-África). Este trabalho forneceu um guia útil para profissionais de diversas áreas (principalmente geociências) que pretendem utilizar o método MT nas suas diversas aplicações. Esta tese apresentou uma investigação geofísica inédita ao longo do cráton SL e faixa Gurupi, possibilitando no reconhecimento das camadas internas dos domínios tectônicos da área, bem como exercícios de correlação pré-drifte entre o lado brasileiro e africano.

Palavras-chave: Magnetotelúrico. Cráton São Luís. Lineamentos.

ABSTRACT

The research area is located in the N-NE portion of Brazil (State of Maranhão) and encompasses the following tectonic domains: the São Luís cratonic fragment, the Gurupi Belt, the Parnaíba and São Luís basins, and Cenozoic coverings. The magnetotelluric method (MT) consists of a geophysical technique that detects natural variations of the terrestrial electric and magnetic fields to investigate the geoelectric characteristics of the subsoil. The objective of this study is to elaborate a NNW-SSE-trending MT transect of 180 km in length and 10 km in depth, to be used as a guideline to a MT campaign for the geoelectrical and geological characterization of the tectonic domains of the study area. Furthermore, correlation exercises between the São Luís (SL) and the West African (WA) cratons are proposed. The working method comprises the following steps, based on the principles of the MT method: MT instrumentation, data collection, data processing, dimensionality analysis, inversion and modeling (MT model), integration and geological interpretation. A guide including procedures and measures to be taken in a MT campaign was elaborated to aid acquisition, processing, noise removal, calculation of impedance tensors, and product development. Following this guide, an unpublished MT geophysical model was created for the São Luís cratonic fragment, the Gurupi Belt, and the Parnaíba and São Luís basins. The 2D geophysical section (TE + TM) revealed surface conductive (Parnaíba and São Luís basins and sedimentary coverings), resistive (São Luís craton), and very resistive (Gurupi mobile Belt) portions in the study area. The interpreted geological model helped identify lateral contacts between tectonic domains, cratonic limits, the lithostratigraphic adjustment in the southern portion of the section, reviving correlation exercises between the SL and WA cratons involving the Gurupi (Brazil) and the Rokelide (Liberia-Africa) belts. This study also provides a useful guide for professionals from different (mostly geoscientific) areas who intend to use the MT method for various applications. The thesis itself presents an unprecedented geophysical investigation along the São Luís cratonic fragment and the Gurupi Belt, making it possible to recognize the inner layers of the tectonic domains in the study area, as well as suggest pre-drift correlation exercises between the Brazilian and African sides.

Keywords: Magnetotellurics. São Luís Craton. Lineaments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Localização do transecto MT no Maranhão exibindo as estações MT.....	24
Figura 2	– Mapa geotectônico da plataforma sul-americana em escala de 1:5.000.000, destaque para Província Parnaíba, área de pesquisa.....	27
Figura 3	– Mapa geológico local mostrando o perfil geofísico MT cruzando as unidades geotectônicas da área investigada.....	28
Figura 4	– Coluna litoestratigráfica das sequências sedimentares da bacia do Parnaíba.....	37
Figura 5	– Equipamento MT utilizado no presente trabalho, ADU-07e/Metronix © alimentada por duas baterias automotivas de 60 Ah.....	47
Figura 6	– Eletrodo a base de Pb-PbCl ₂ fabricado pelo ON (Rio de Janeiro) utilizado no levantamento desta tese. À esquerda em detalhe, e à direita instalado no solo em meio a uma solução com bentonita.....	48
Figura 7	– Bobinas de indução utilizadas neste trabalho. À esquerda, conectada com a central MT. À direita, sendo nivelada, orientada e instalada no solo numa profundidade de 30 cm.....	49
Figura 8	– Tensor de impedância (Z) calculado para estação MT02 no levantamento MT desse trabalho.....	51
Figura 9	– Etapas do método adotado neste trabalho.....	56
Figura 10	– Mapa geológico regional exibindo a localização do perfil com as estações MT e as unidades geotectônicas da área no extremo NW do Maranhão.....	63
Figura 11	– Fluxograma indicando as etapas de aquisição e processamento de dados no Método Magnetotelúrico.....	64

- Figura 12 – Equipamentos utilizados na aquisição de dados MT em campo. As imagens acima foram realizadas na estação MT-14 e o mesmo arranjo foi adotado nas demais estações. Ex e Ey são as componentes do campo elétrico enquanto que Hx e Hy representam as componentes do campo magnético..... 67
- Figura 13 – Procedimentos utilizados numa campanha MT. A) umedecimento (água e bentonita) do furo de 20 cm. B) eletrodo de PbCl instalado dentro do furo. C) e D) Orientação e nivelamento da bobina de indução..... 68
- Figura 14 – Fluxograma indicando a sequência de procedimentos a partir das séries temporais obtidas na área de estudo. No domínio do tempo foram aplicadas filtragens para remoção de ruídos, enquanto no domínio da frequência foram calculadas as funções de transferências, os tensores de impedâncias de cada estação MT..... 71
- Figura 15 – Utilização do filtro FIR para remoção da rede elétrica (*power line*) de 60 Hz e suas harmônicas. Ex e Ey são as componentes do campo elétrico e Hx e Hy as componentes do campo magnético. A) Série temporal da frequência de 4KHz da estação MT-02 antes da aplicação do filtro. B) indica a mesma frequência após a filtragem onde se observa a série temporal sem a influência da rede elétrica.... 73
- Figura 16 – Seleção de ruídos (área hachurada) nas séries temporais da estação MT-14 para serem subtraídos (removidos) dos processamentos. Visualização de uma porção da série temporal em uma janela de 1 kHz, mostrando sinal com e sem ruído..... 74
- Figura 17 – Tensores de impedâncias das estações MT – 01 à MT – 08 exibindo as curvas de resistividade (porção superior do gráfico) e fase (porção inferior do gráfico). As curvas vermelhas e azuis representam, respectivamente, as componentes XY (TE) e YX (TM) do tensor de impedância..... 78
- Figura 18 – Tensores de impedâncias das estações MT – 09 à MT – 15 exibindo as curvas de resistividade (porção superior do gráfico) e fase (porção 79

inferior do gráfico). As curvas vermelhas e azuis representam, respectivamente, as componentes XY (TE) e YX (TM) do tensor de impedância.....

Figura 19 – Modelo geofísico inicial do perfil MT da área de estudo. A escala de cores mostra variações da resistividade aparente onde tons azuis e vermelhos indicam, respectivamente, porções resistivas e condutivas.....	80
Figura 20 – Modo TE mostrando as pseudoseções observadas e calculadas para as resistividades e fases.....	81
Figura 21 – Modo TM mostrando as pseudoseções observadas e calculadas para as resistividades e fases.....	82
Figura 22 – Pre-drift reconstruction sketch of West Africa and Northeastern Brazil with emphasis on São Luís and West Africa cratons and the surrounding structures.....	90
Figura 23 – Location and geological map of study area with indication of MT geophysical transect.....	91
Figura 24 – Outcrops observed along the MT geophysical profile. A) and B) granitoids from São Luís cratonic fragment. C) and D) Mega-Vein of quartz in NW-SE direction (310° Az) associated to Gurupi units. E) Metavolcanic rocks from the Gurupi belt. F) Sandstones from Parnaíba Basin.....	93
Figura 25 – Flowchart showing the steps of MT method.....	95
Figura 26 – Impedance tensors calculated for 15 MT soundings. The top and bottom curves represent the apparent resistivity (ohm-m) and phase (degrees), respectively. Red and blue curves represent, respectively, Transversal Electric (TE) and Transversal Magnetic (TM) components of the impedance tensor.....	97
Figura 27 – Result of the dimensionality of the MT survey through WAL code.....	98

Figura 28 – Adjustment of calculated curves with the observed data (datafit). A) stations MT1 to MT06. B) stations MT07 to MT12. C) stations MT13 to MT15. Total RMS 3.08%.....	99
Figura 29 – 2D inversion of TE plus TM modes for the analyzed MT profile.....	102
Figura 30 – Interpretative geological model of the study area.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de sistemas MT comumente encontrados exibindo o tipo de fonte utilizada e o período de aquisição dos dados.....	47
Tabela 2 – Bandas de frequências utilizadas na aquisição dos dados MT e seus respectivos tempos. A frequência de 64 Hz foi obtida através da dizimação da frequência de 128 Hz.....	69
Tabela 3 – Valores das frequências e resistividades aparente para cada tensor de impedância calculado.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT	Audio-Frequency MT
BBMT	Broadband MT
BR	Brasil
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE	Ceará
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSAMT	Controlled-Source AMT
DF	Distrito Federal
e.g	Exempli gratia
EUA	Estados Unidos da América
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
Gy	Giga year
HF	High Frequency
IGCP	International Geological Correlation Program
IGEO	Instituto de Geociências
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
LF	Low Frequency
LGPSR	Laboratório de Geofísica, Prospecção e Sensoriamento Remoto
LMT	Long-Period MT
MA	Maranhão
MT	Magnetotelúrico
NE	Nordeste
NW	Noroeste
NNW	Norte-Noroeste
OA	Oeste Africano
ON	Observatório Nacional
PA	Pará
PP	Província Parnaíba
PPGG	Programa de Pós-Graduação em Geologia
RMS	Root Mean Square

RMT	Radio-Frequency MT
SADMT	Sistema de Aquisição de Dados Magnetotelúricos
SE	Sudeste
SFMT	Seafloor MT
SL	São Luís
SSE	Sul-Sudeste
TE	Transversal Eletric
TM	Transversal Magnetic
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

Pb	Chumbo
Ma	Milhões de anos
U	Urânio
ρ	Rho
Sm	Samário
Nd	Neodímio
∇	Nabla ou gradiente
∂	Derivada parcial
ε	Epsílon
μ	Mi
σ	Sigma
Ah	Ampère-hora
s	Segundos
m	Metro
Cu	Cobre
SO ₄	Sulfato
Ag	Prata
Cl	Cloro
Cd	Cádmio
cm	Centímetro
Φ	Phi
ω	Ômega
mV	Milivolt
Min	Minuto
Hz	Hertz
km	Quilômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Considerações iniciais.....	21
1.2	Justificativa e relevância.....	21
1.3	Objetivos.....	22
1.4	Caracterização da Área de Estudo.....	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	26
2.1	Contexto geológico e tectônico.....	26
2.1.1	<i>Fragmento Cratônico São Luís</i>.....	29
2.1.1.1	<i>Grupo Aurizona.....</i>	29
2.1.1.2	<i>Granófiro Piaba.....</i>	30
2.1.1.3	<i>Suíte Intrusiva Tromai.....</i>	31
2.1.1.4	<i>Suíte Intrusiva do Rosário.....</i>	31
2.1.1.5	<i>Unidade Vulcânica Serra do Jacaré.....</i>	31
2.1.1.6	<i>Formação Rio Diamante.....</i>	31
2.1.1.7	<i>Granito Negra Velha.....</i>	32
2.1.1.8	<i>Unidade Vulcânica Rosilha.....</i>	32
2.1.1.9	<i>Microtonalito Garimpo Caxias.....</i>	32
2.1.2	<i>Faixa Gurupi</i>.....	32
2.1.2.1	<i>Complexo Itapeva.....</i>	33
2.1.2.2	<i>Formação Chega Tudo.....</i>	33
2.1.2.3	<i>Granito Maria Suprema.....</i>	34
2.1.2.4	<i>Granito Moça.....</i>	34
2.1.2.5	<i>Formação Igarapé de Areia.....</i>	34
2.1.2.6	<i>Grupo Gurupi.....</i>	35
2.1.2.7	<i>Formação Marajupema.....</i>	35
2.1.2.8	<i>Anfibolito Cocal.....</i>	35
2.1.2.9	<i>Formação Piriá.....</i>	36
2.1.3	<i>Bacia do Parnaíba</i>.....	36
2.1.3.1	<i>Siluriano.....</i>	37
2.1.3.2	<i>Mesodevoniano – eocarbonífero.....</i>	38
2.1.3.3	<i>Neocarbonífero – triássico.....</i>	38

2.1.3.4	<i>Jurássico – eocretáceo</i>	39
2.1.3.5	<i>Cretáceo</i>	40
2.1.3.6	<i>Magmatismo da bacia</i>	40
2.1.4	<i>Bacia de São Luís</i>	42
2.1.4.1	<i>Formação Alcântara</i>	42
2.1.4.2	<i>Formação Cajupe</i>	42
2.1.5	<i>Coberturas cenozoicas</i>	42
2.1.5.1	<i>Grupo Barreiras</i>	43
2.1.5.2	<i>Pós-Barreiras</i>	43
2.1.5.3	<i>Depósitos aluvionares</i>	43
2.1.5.4	<i>Depósitos litorâneos</i>	43
2.1.5.5	<i>Depósitos de pântanos e mangues</i>	43
2.2	<i>Método eletromagnético magnetotelúrico</i>	44
2.2.1	<i>Origem do método MT</i>	44
2.2.2	<i>Embasamento teórico</i>	45
2.2.3	<i>Instrumentação magnetotelúrica</i>	46
2.2.3.1	<i>Sistemas MT</i>	46
2.2.3.2	<i>Eletrômetros</i>	48
2.2.3.3	<i>Magnetômetros</i>	49
2.2.4	<i>Funções de transferência MT</i>	50
2.2.4.1	<i>Tensor de impedância (Z)</i>	50
2.2.4.2	<i>Tipper (T)</i>	52
2.2.5	<i>Análise de dimensionalidade</i>	52
2.2.5.1	<i>Terra 1 D</i>	52
2.2.5.2	<i>Terra 2 D</i>	53
2.2.5.3	<i>Terra 3 D</i>	53
2.2.6	<i>Inversão e resultados esperados</i>	54
3	<i>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO</i>	56
3.1	<i>Base de dados bibliográficos</i>	57
3.2	<i>Aquisição dos dados</i>	57
3.3	<i>Processamento e interpretação</i>	58
3.4	<i>Redação científica</i>	58
4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	59

4.1	Diretrizes para aquisição e processamento de dados geofísicos magnetotelúricos: o caso do fragmento cratônico são luís/MA.....	59
4.2	Magnetotelluric transect across the são luís cratonic fragment, the gurupi belt and the parnaíba basin, N-NE Brazil.....	86
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A – TABELA EXIBINDO AS COORDENADAS GEOGRÁFICAS E UTM (ZONA 23S) DAS ESTAÇÕES DO LEVANTAMENTO MT NO MARANHÃO.....	126
	APÊNDICE B – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT01 À MT 06.....	127
	APÊNDICE C – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT07 À MT12.....	128
	APÊNDICE D – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT13 À MT15.....	129
	APÊNDICE E – FOTOS DURANTE A AQUISIÇÃO DOS DADOS MT (MAIO/2018).....	130
	APÊNDICE F – AFLORAMENTOS AO LONGO DO PERFIL GEOFÍSICO MT.....	131
	APÊNDICE G – DOCUMENTO DE SUBMISSÃO DO MANUSCRITO NO <i>JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES</i>	132
	APÊNDICE H – FICHAS DE CAMPO DAS ESTAÇÕES MT (MT01 À MT15).....	133

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A presente tese apresenta a compilação dos resultados de um projeto de doutorado em Geologia, no âmbito da Geofísica Aplicada, pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGG) da Universidade Federal do Ceará (UFC), inserido na linha de pesquisa Geodinâmica e Recursos Minerais.

Dentro da Geofísica Aplicada, a tese foi desenvolvida no âmbito dos levantamentos eletromagnéticos (Método Magnetotelúrico - MT). A aplicação se deu no contexto de regiões cratônicas, faixas móveis e bacias sedimentares, localizadas no estado do Maranhão.

Este trabalho foi idealizado precedentemente pelos professores Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco e Dr. José de Araújo Nogueira Neto, nos anseios pelas descobertas geológicas e geofísicas de subsuperfície ao longo do Fragmento Cratônico São Luís/MA.

A tese foi elaborada no período entre agosto de 2016 a julho de 2020 no Laboratório de Geofísica, Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR), sob orientação dos professores Dr. Christiano Magini e Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

O documento encontra-se estruturado em 8 capítulos em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo guia de normalização de trabalhos acadêmicos da UFC e atendendo às orientações do PPGG.

1.2 Justificativa e relevância

A investigação geofísica proposta para área de estudo possui caráter inédito e traz novamente à tona uma discussão sobre a geotectônica dos terrenos Pré-cambrianos recobertos por extensos e espessos pacotes sedimentares durante o Fanerozoico. Busca-se, dentre outros questionamentos, retomar os exercícios de correlações entre os terrenos brasileiros e africanos antes da separação (pré-drift) do *Gondwana* (Brito Neves *et al.*, 2001).

A utilização do método MT vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas devido as suas diversas aplicações: petróleo, prospecção mineral, hidrogeologia, investigação de sequências sedimentares, regiões cratônicas, identificação de descontinuidades geológicas e geotectônica (Santos, 2012; Borah *et al.*, 2015; Daly *et al.*, 2018; Silva, 2018).

O LGPSR da UFC tem importante contribuição neste avanço, através de levantamentos realizados nas bacias do Jaibaras (parceria com a Universidade de Brasília - UNB), Paranaíba (porção cearense) e Potiguar (Rio Grande do Norte), onde foram desenvolvidas dissertações e teses de doutorados (Pedrosa Junior, 2015; Oliveira, 2016; Silva, 2016; Silva, 2018).

Em investigações de petróleo e gás geralmente é utilizada a sísmica como método geofísico. O método MT pode ser utilizado na prospecção petrolífera e possui um custo bem abaixo do que o método sísmico, portanto podendo ser útil em levantamentos dessa natureza (Porsani & Ramos, 2001).

Por fim, vale ressaltar ainda, que levantamentos geofísicos regionais são importantes ferramentas para ajudar na reconstrução de grandes terrenos geológicos, como o exemplo do fragmento cratônico São Luís (SL)/Cráton do Oeste Africano (OA) e o Cráton São Francisco/Congo – Kasai – Angola (Brito Neves *et al.*, 2001).

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho consiste em elaborar um transecto de modelo geofísico MT com direção (N-NW) – (S-SE) e 180 km de comprimento, para caracterização geométrica de subsuperfície de uma porção da Província Parnaíba (PP) entre o Cráton SL, Faixa Gurupi e o limite do pré-cambriano/fanerozoico marcado pela bacia do Parnaíba (limite SE do transecto).

Logo abaixo são listados os objetivos específicos desta pesquisa:

- a) Definir os limites dos principais domínios geotectônicos e propor ajustes litoestratigráficos;
- b) Indicar a espessura das bacias fanerozoicas e coberturas cenozoicas ao longo da seção geofísica MT através da caracterização geométrica;
- c) Estabelecer a natureza dos contatos dos terrenos pré-cambrianos (Cráton SL e faixa móvel Gurupi);

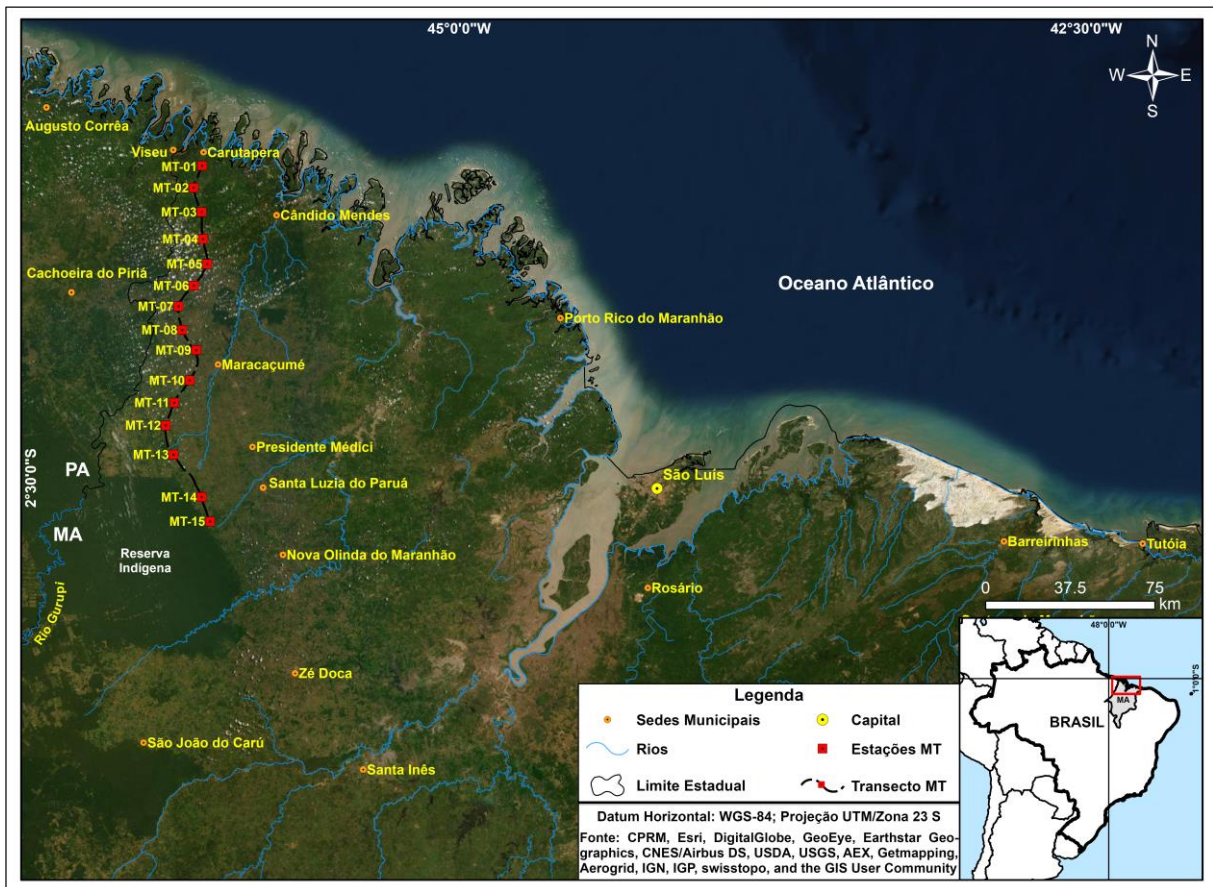
- d) Indicar as fronteiras do Cráton São Luís em superfície e subsuperfície;
- e) Propor exercícios de correlação entre as placas sul-americana e africana através dos crátons São Luís e Oeste Africano;
- f) Elaborar diretrizes para o treinamento de equipes especializadas em levantamentos MT aplicados ao reconhecimento de grandes domínios tectônicos;
- g) Indicar situações-problemas-soluções no processamento de dados MT em áreas com muito ocorrência de ruídos antropogênicos.
- h) Elaborar 02 artigos científicos, sendo um, visando contribuir com a formação de equipes especializadas em levantamento MT, e o outro com enfoque nas características geológicas, tectônicas e geofísicas do transecto investigado.

1.4 Caracterização da área de estudo

O transecto geofísico MT está localizado no extremo NW do estado Maranhão próximo à fronteira com o estado do Pará. O acesso à área por rodovias (estaduais e federais) é relativamente precário.

Quanto aos aspectos geológicos, a área engloba um extenso terreno de coberturas fanerozoicas (bacias sedimentares e coberturas recentes) e janelas de terrenos pré-cambrianos com porções cratônicas e faixas mobilizadas na região NW, área de estudo (Figura 1).

Figura 1 – Localização do transecto MT no Maranhão exibindo as estações MT.



Fonte: CPRM, Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community.

As estações MT estão localizadas, de N-NW para S-SE, entre os municípios de Carutapera (MT01) e Santa Luzia do Paruá (MT15), ambos no Maranhão. O principal acesso a área via terrestre pode ser realizado através da rodovia federal BR – 316, independentemente da localização de origem. O transecto geofísico possui um longo trecho paralelo à essa rodovia. Os dois aeroportos mais próximos da primeira estação em Carutapera/MA são o de São Luís/MA (Marechal Cunha Machado) que dista 354 km e o de Belém/PA (Val-de-Cans – Júlio Cezar Ribeiro) com uma distância de 395 km.

Geologicamente, o perfil geofísico de investigação está inserido na Plataforma sul-americana dentro do contexto setentrional da Província Parnaíba (PP). Os domínios geotectônicos presentes na área de estudo são: fragmento cratônico SL

(Arqueano-Paleoproterozoico), faixa Gurupi (Neoproterozoico), bacias Fanerozoicas (Parnaíba e São Luís) e coberturas cenozoicas (Almeida *et al.* 1976; Hassui *et al.* 1984; Almeida *et al.*, 2000; CPRM; 2012).

As unidades pertencentes ao fragmento cratônico SL estão superficialmente localizadas na primeira metade do perfil (porção N-NW). Os litotipos que podem ser encontrados são sequências metavulcanossedimentares, vulcânicas e granitoides diversos (CPRM, 2012).

A faixa Gurupi localiza-se na porção S-SE do perfil geofísico e representa um orógeno Neoproterozoico onde encontra-se rochas metassedimentares, metavulcânicas, complexos e granitoides.

O Fanerozoico é representado pelas bacias do Parnaíba (final do transecto – S-SE) e São Luís (localizada na metade do perfil) e coberturas cenozoicas distribuídas ao longo de toda a linha MT.

A bacia intracratônica do Parnaíba possui sequências sedimentares depositadas do paleozoico ao mesozoico, enquanto a bacia de São Luís representa um grabén sob o fragmento cratônico SL com rochas sedimentares do mesozoico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

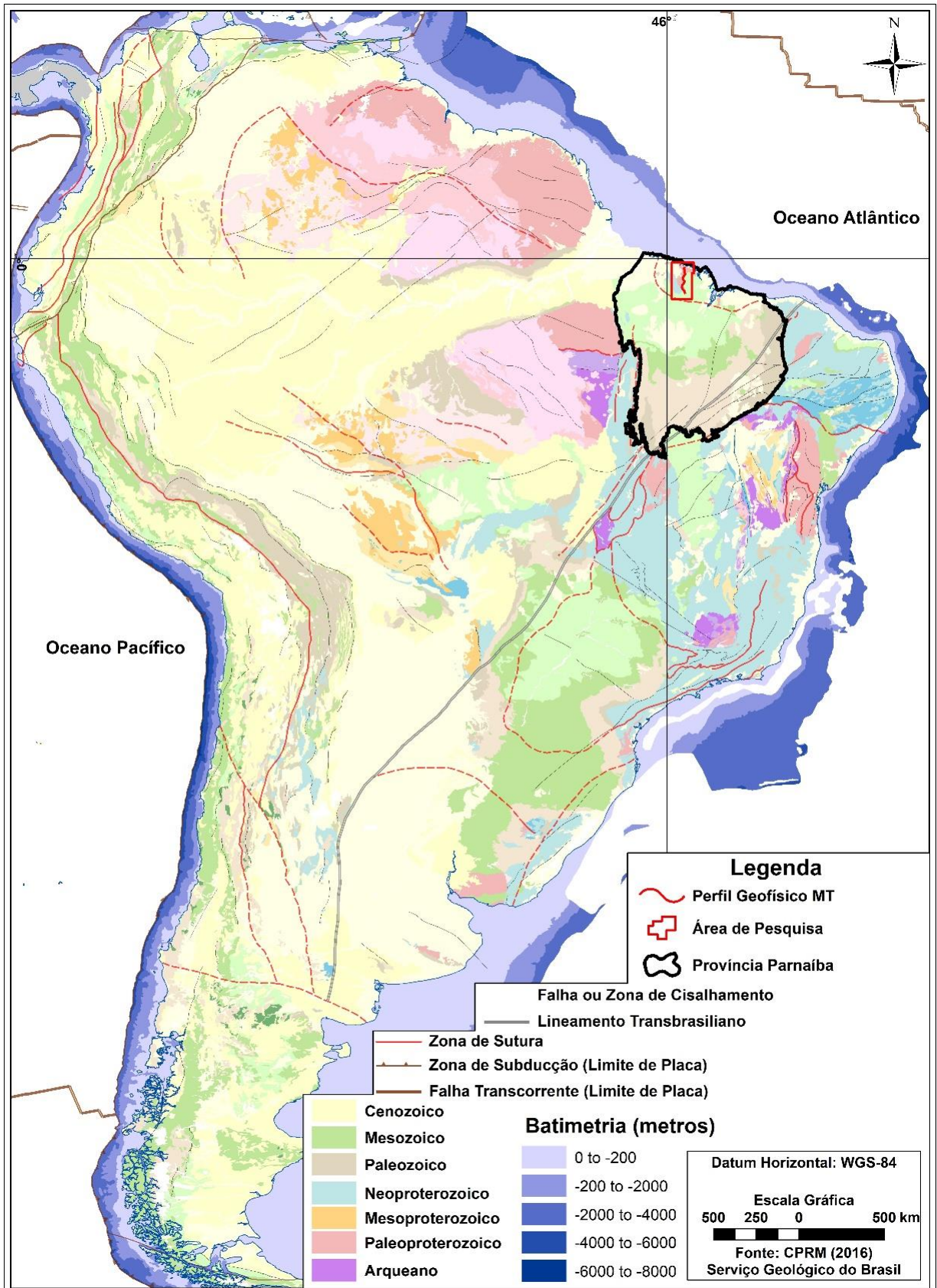
A seguir será mostrado de forma sucinta o embasamento teórico deste trabalho, que está subdividido em aspectos geológicos da área de estudo e apresentação do método geofísico magnetotelúrico.

2.1 Contexto geológico e tectônico

O perfil geofísico investigado encontra-se no contexto da plataforma sul-americana (Figura 2), localizado a NE desta, na porção norte da província Parnaíba, recortando as unidades do Fragmento Cratônico São Luís e da faixa móvel Gurupi (Almeida *et al.* 1976; Hassui *et al.* 1984; Almeida *et al.*, 2000; CPRM; 2012).

O fragmento cratônico São Luís e a faixa Gurupi representam o pré-cambriano da área de estudo.

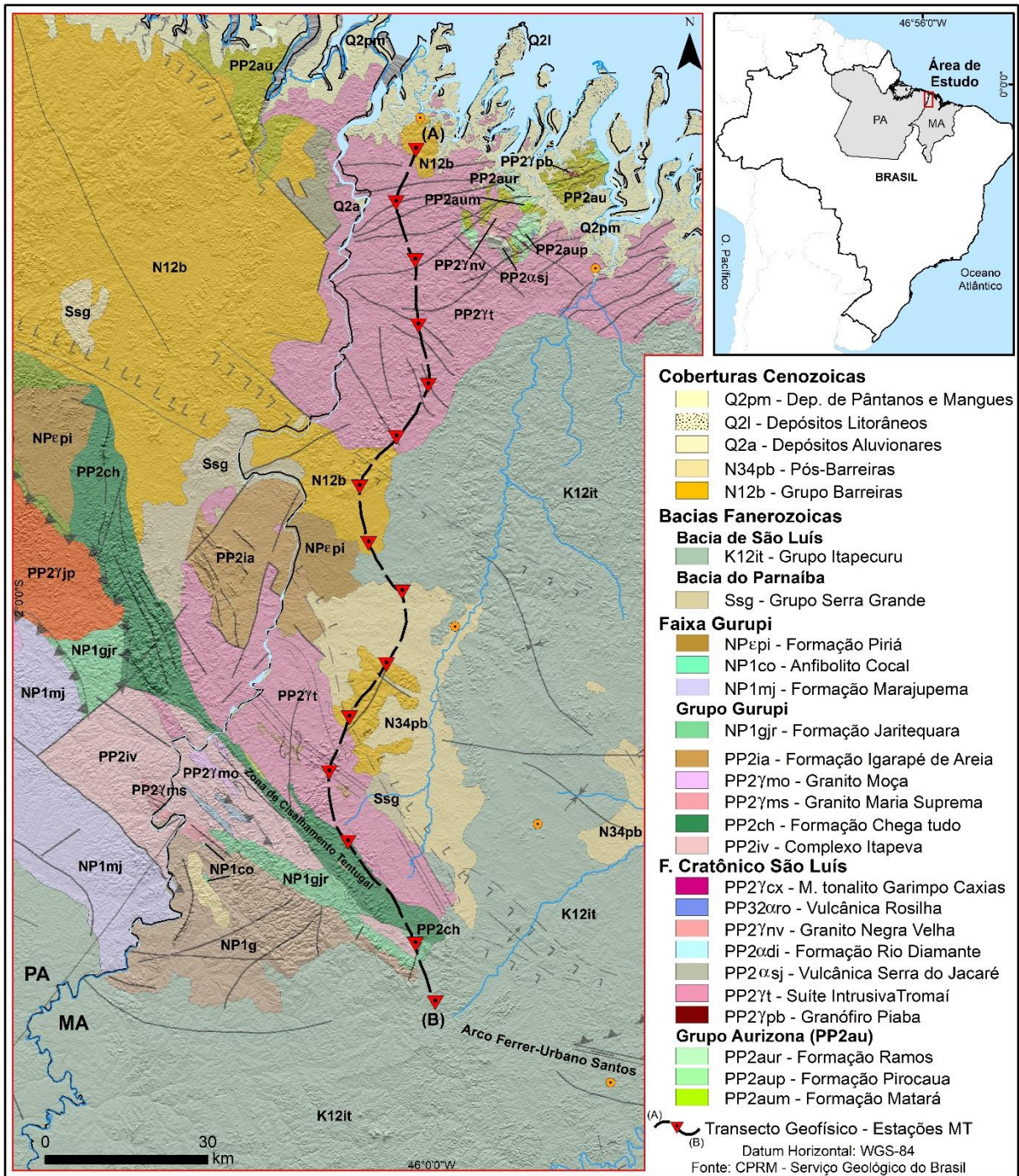
Figura 2 – Mapa geotectônico da plataforma sul-americana em escala de 1:5.000.000, destaque para Província Parnaíba, área de pesquisa.



Fonte: (CPRM, 2016)

Localmente a área de pesquisa recorta as unidades geotectônicas que estão distribuídas geocronologicamente desde o Pré-cambriano ao cenozoico: i) Fragmento Cratônico São Luís; ii) Faixa Gurupi; iii) Bacias sedimentares fanerozoicas; e iv) Coberturas cenozoicas (Figura 3).

Figura 3 – Mapa geológico local mostrando o perfil geofísico MT cruzando as unidades geotectônicas da área investigada.



Fonte: (CPRM, 2012).

A seguir estão descritas, do mais velho para o mais recente, todas as unidades litoestratigráficas apresentadas no mapa acima, desde o fragmento cratônico São Luís aos depósitos Cenozoicos.

2.1.1 Fragmento Cratônico São Luís

Juntamente com a Faixa Gurupi abrange as rochas mais antigas da região de estudo. Esses terrenos Pré-cambrianos perfazem apenas 2% de exposição superficial, localizado no extremo noroeste maranhense, pois a maior parte encontra-se recoberto por sedimentos Fanerozoicos (CPRM, 2012).

O termo fragmento cratônico São Luís é adotado aqui conforme orientações de CPRM (2012) e Vasques & Rosa Costa (2008) onde salientam que esse representa apenas uma pequena porção de um orógeno maior, o Cráton do Oeste-Africano, que foi separado da América do Sul durante o mesozoico.

As rochas do fragmento cratônico tiveram evolução no paleoproterozoico (Klein *et al.*, 2005b). Os principais litotipos encontrados são metavulcanossedimentares, vulcânicas e granitoides pré, sin e pós-colisionais (CPRM, 2012).

As unidades em ordem cronológica (antigo para o mais novo) são: Grupo Aurizona, Granófiro Piaba, Suíte Intrusiva Tromaí, Suíte Intrusiva do Rosário, Unidade Vulcânica Serra do Jacaré, Formação Rio Diamante, Granito Negra Velha, Unidade Vulcânica Rosilha, Microtonalito Garimpo Caxias e Formação Igarapé de Areia. Vale salientar que algumas dessas unidades não afloram na área de estudo

2.1.1.1 Grupo Aurizona

Este grupo perfaz um espectro de rochas metavulnossedimentares, que anteriormente eram incluídas no Grupo Gurupi (Francisco *et al.*, 1971; Costa *et al.*, 1977; Pastana, 1995). As metavulcânicas variam de ácidas a básicas. As rochas vulcânicas são predominantemente ácidas. Em menor proporção encontram-se quartzitos e metacherts (Klein *et al.*, 2005).

O Grupo Aurizona é subdividido em três formações: Matará, Pirocaua e Ramos. Possui uma idade riaciana de 2240 Ma, obtida através de evaporação de Pb em Zircão de rochas metapiroclásticas da formação Pirocaua (Klein & Moura, 2001).

Suas relações de contatos com o Granófiro Piaba e Suíte Intrusiva Tromai, dão-se de maneira intrusiva através destes.

- **Formação Matará**

Esta formação inclui as rochas metavulcânicas básicas e ultrabásicas do Grupo Aurizona. Os principais litotipos são, anfíbolitos e xistos de baixo a médio grau metamórfico, e de fácies variando de xisto verde a anfíbolito. As rochas possuem origem em ambiente de arco de ilha ou bacia marginal de *back-arc* (Klein & Lopes, 2009).

- **Formação Pirocaua**

As rochas da Formação Pirocaua são piroclásticas e metavulcânicas ácidas. Os litotipos são tufos, riolitos, dacitos e felsitos geralmente de colorações acizentadas. Os magmas que geraram as rochas vulcânicas são cálcio-alcálicos de ambiente de arco de ilha (Klein *et al.*, 2005b, Klein & Lopes, 2009).

- **Formação Ramos**

Aqui é englobado as rochas metassedimentares pertencentes ao Grupo Aurizona. Os litotipos observados são: quartzito, metassilito manganésífero, metachert, metarenito, metagrauvaca, xisto e filito (CPRM, 2012). Apresentam grau metamórfico do fácies xisto verde.

2.1.1.2 Granófiro Piaba

A unidade é marcada por granitoides que intrudiram o Grupo Aurizona. O nome granófiro dá-se em decorrência da textura granofírica, enquanto que Piaba vem do depósito de ouro homônimo. Possui composição granodiorítica a tonalítica (CPRM, 2012). Através de evaporação de Pb em zircão foi possível obter uma idade riaciana (2212 Ma) para a unidade.

2.1.1.3 *Suíte Intrusiva Tromaí*

De todo o fragmento Cratônico São Luís essa é a unidade espacialmente dominante, além de também pertencer à Faixa Gurupi, de maneira retrabalhada. Desde Costa *et al.* (1977), passando por Pastana (1995) o nome desta unidade vem sendo alterado, até chegar no nome atual definido por Klein & Fuzikawa (2005).

As rochas dessa unidade fazem contato intrusivo com o Grupo Aurizona, possuem composição tonalítica, granodiorítica e dioríticas, e são indicadas como de origem em arcos de ilhas intraoceânicos e transição para margem continental e idade 2147 Ma (Pastana, 1995; Klein & Lopes, 2009; CPRM, 2012).

2.1.1.4 *Suíte Intrusiva do Rosário*

São granitoides que afloram a sul da cidade São Luís, anteriormente conhecidos como pré-cambriano indiviso, suíte granitoide transamazônica e complexo Maracaçumé (Nunes *et al.*, 1973; Rodrigues *et al.*, 1994; Hasui *et al.*, 1984).

São plútons que apresentam composição tonalítica, granodiorítica, dioríticas e monzograníticas e com idade riaciana de 2139 Ma através do método de evaporação de Pb em zircão (Gorayeb *et al.*, 1999).

2.1.1.5 *Unidade Vulcânica Serra do Jacaré*

Localizadas a SW da área de abrangência do Grupo Aurizona, esta unidade compreende as rochas vulcânicas (dacitos, andesitos e basaltos) e vulcanoclásticas (tufos e brechas), interpretadas como de margem passiva e com idade de 2164 Ma através do método de evaporação de Pb em zircão realizado em dacitos (Klein & Lopes, 2009).

2.1.1.6 *Formação Rio Diamante*

Também representam rochas vulcânicas (riolitos e dacitos) e vulcanoclásticas (tufos dacíticos) que afloram ao longo do rio Cocal, localizado a ESE de São Luís (CPRM, 2012). O contato ocorre de maneira discordante com as rochas granitoides da Suíte Intrusiva Tromaí. A idade é de 2160 Ma, dada através de U-Pb

SHIRIMP em zircão de dacito pórfiro, englobadas em ambiente de margem ativa (Klein & Lopes, 2009).

2.1.1.7 Granito Negra Velha

Granitoides que afloram na forma de matacões, blocos e lajeiros próximos aos municípios de Godofredo Viana e Luís Domingues. O nome da unidade faz referência ao Igarapé Negra Velha. Os litotipos são: monzogranitos, sienogranito e quartzo-monzonito (CPRM, 2012). A idade da intrusão de 2056 – 2076Ma.

2.1.1.8 Unidade Vulcânica Rosilha

As rochas desta unidade são expostas de maneira subordinada e englobam vulcânicas (riolitos e dacitos) e vulcanoclásticas (tufos líticos) localizadas no igarapé e garimpo rosilha. Dados geocronológicos preliminares indicam idade riacina (2069 Ma) para a unidade (Klein & Lopes, 2009).

2.1.1.9 Microtonalito Garimpo Caxias

Esta unidade hospeda a mineralização aurífera homônima e é sugerida como um dique de rocha ígnea equigranular e maciça que recorta as rochas do Grupo Aurizona (Leão Neto, 1993; Klein, *et al.*, 2002; CPRM, 2012). A idade orosiriana (1985 Ma) dada através de evaporação de Pb em zircão, difere das idades riacianas observadas na maioria das unidades do fragmento cratônico São Luís (Klein *et al.*, 2002).

2.1.2 Faixa Gurupi

A Faixa Gurupi alongada (160 km) segundo a direção NNW-SSE, é abordada como um orógeno neoproterozoico que faz contato com o fragmento cratônico São Luís através da zona de cisalhamento Tentugal, embora esse contato seja tratado apenas como limite geocronológico até o presente (Almeida *et al.*, 1976; Hassui *et al.*, 1984; Costa, 2000; Klein & Fuzikawa, 2005). Vale lembrar, que um dos objetivos deste trabalho é buscar entender a natureza deste contato.

As rochas desse orógeno ocorrem no extremo NW do Maranhão avançando além da divisa com o estado do Pará.

As associações litológicas agrupam rochas metassedimentares, metavulcânicas, complexos e granitoides diversos que evoluíram do Arqueano ao Neoproterozoico (Klein & Fuzikawa, 2005; Klein & Lopes, 2009). As unidades em ordem cronológica são: Complexo Itapeva, Formação Chega Tudo, Granito Maria Suprema, Granito Moça, Formação Igarapé de Areia, Grupo Gurupi, Formação Marajupema, Anfibolito Cocal e Formação Piriá.

2.1.2.1 Complexo Itapeva

As rochas do Complexo Itapeva antes denominadas de Complexo Maracaçumé, representam um maciço alongado NW-SE (Costa *et al.*, 1977; Abreu *et al.*, 1980). Esse complexo faz contato com algumas unidades da Faixa Gurupi, Formação Chega Tudo ao Longo da zona de cisalhamento Tentugal, Formação Marajupema ao longo da falha Marajupema, e intrudido por granitoides das unidades Maria Suprema e Moça (CPRM, 2012). Localiza-se nas mediações da estação MT14 (vide mapas).

Os litotipos são gnaisses orto e paraderivados, metatonalitos, anfibolitos, piroxenitos, além de xistos que são incluídos aqui devido à semelhança do grau metamórfico de fácies anfibolito (Klein & Lopes, 2009). A orientação da foliação segue a direção NW-SE observada na faixa, com mergulhos que variam para NE e SW. A idade riaciana (2167 Ma) encontrada através do método U-Pb é indicada para o protólito dessas rochas (Klein *et al.*, 2005a).

2.1.2.2 Formação Chega Tudo

Marca o limite entre o fragmento cratônico São Luís e a faixa Gurupi (Klein *et al.*, 2005c). Essa formação é composta por uma sequência metavulcanossedimentar. Faz contato tectônico com o Complexo Itapeva, Suíte Intrusiva Tromai, Formação Igarapé de Areia e Grupo Gurupi. O contato se dá ao longo da zona de cisalhamento Tentugal.

Os litotipos encontrados são metadacitos, andesitos, riolitos, xistos, tufos, filitos, milonitos etc (Klein & Lopes, 2009; Yamaguti & Villas, 2003). O grau

metamórfico dominante é o fácies xisto verde e a idade através de evaporação de Pb data do Riáciano (2160 Ma), origem de ambiente orogênico (Klein & Moura, 2001)

2.1.2.3 *Granito Maria Suprema*

Representa um corpo de muscovita granito milonitizado alongado na direção NW-SE intrudido no Complexo Itapeva (Pastana, 1995; Klein, 2004; Klein e Lopes, 2009). Os granitoides variam de sienogranito a granodiorito com idades U-Pb em zircão de 2100 Ma (riáciano), posicionados de maneira sin-tectônica com a foliação do Complexo Itapeva.

2.1.2.4 *Granito Moça*

São corpos graníticos a duas micas que fazem contato tectônico e intrusivo com o Grupo Gurupi e Complexo Itapeva, respectivamente (Klein & Lopes, 2009). Os litotipos comuns são sienogranitos, monzogranitos e granodioritos subordinados. Interpretado como de origem crustal e com idade U-Pb em zircão de 2099 Ma.

2.1.2.5 *Formação Igarapé de Areia*

Diversos autores relatam sobre o posicionamento dessa unidade como sendo pertencente ao Fragmento Cratônico São Luís ou à Faixa Gurupi (Abreu *et al.* 1980; Pastana, 1995; Teixeira *et al.*, 2007; Klein & Lopes, 2009).

A formação é representada por corpos alongados que fazem contato com a Suíte Intrusiva Tromai e a Formação Chega Tudo (CPRM, 2012). A unidade é subdividida em três associações e podem apresentar arenitos estratificados, conglomerados, metarenito conglomerático e pelitos subordinados. Essas associações possuem características deposicionais de sistema fluvial (Klein & Lopes, 2009).

A idade encontrada através de evaporação de Pb em zircão é de 2110 Ma. Essa unidade é correlacionada com a bacia de Tarkwa no Cráton do Oeste Africano (Klein & Lopes, 2009).

2.1.2.6 Grupo Gurupi

O Grupo Gurupi atualmente é subdividido em três formações, Rio Piritoró, Jaritequara e Vila Cristal (Costa *et al.*, 1996). Será abordado aqui apenas a formação Jaritequara por ser a única aflorante na área de estudo.

Dados de Klein & Fuzikawa, 2005) indicaram idade entre o steniano e criogeniano, Meso a Neoproterozoico respectivamente, para as rochas do Grupo Gurupi (Klein & Lopes, 2009).

- **Formação Jaritequara**

Ocorre de forma alongada e exibindo contato tectônico com as formações Piritoró e Chega Tudo, Granito Moça e Complexo Itapeva. As rochas aflorantes no estado do Maranhão são filitos e xistos interpretados como pelitos de sequência turbidítica de bacia de margem passiva (Costa *et al.*, 1996; Klein & Lopes (2009).

2.1.2.7 Formação Marajupema

Anteriormente conhecido como kinzigito Marajupema a unidade ocorre de forma alongada na direção NW-SE e possui maior exposição em afloramentos no estado do Pará (Pastana, 1995; Klein *et al.*, 2005).

Faz contato tectônico com o Complexo Itapeva e o Grupo Gurupi. Os litotipos que são comumente encontrados são quartzitos e xistos. A idade (Sm-Nd) máxima estabelecida para a deposição dos sedimentos dessa unidade é de 1100 Ma (Steniano) e o ambiente provável é o de margem ativa (Klein *et al.* 2005; Klein & Lopes, 2009).

2.1.2.8 Anfibolito Cocal

A unidade ocorre na forma de lajeiro na porção sul da Faixa Gurupi. O nome é decorrente do povoado homônimo. Klein & Lopes (2009) não estabeleceram relações claras de contatos.

As rochas encontradas são anfíbolitos e xistos de origem ortoderivada metamorfizadas no fácies anfíbolito e com idades Sm-Nd de 1000 Ma (Toniano). Ambiente de origem incerto (Klein & Lopes, 2009).

2.1.2.9 Formação Piriá

Esta unidade anteriormente era cartografada apenas no estado do Pará. No entanto Klein & Lopes (2009) reconheceram de forma preliminar uma exposição alongada na direção NNW-SSE a norte da Faixa Gurupi.

As rochas são compostas predominantemente por arcóseos, pelitos e conglomerados subordinados. A idade da unidade foi atribuída por Klein & Lopes (2009) com o limite entre o Neoproterozoico-Cambriano (550 Ma). Os mesmos autores sugerem uma associação com o Grupo Jaibaras da Bacia do Parnaíba.

2.1.3 Bacia do Parnaíba

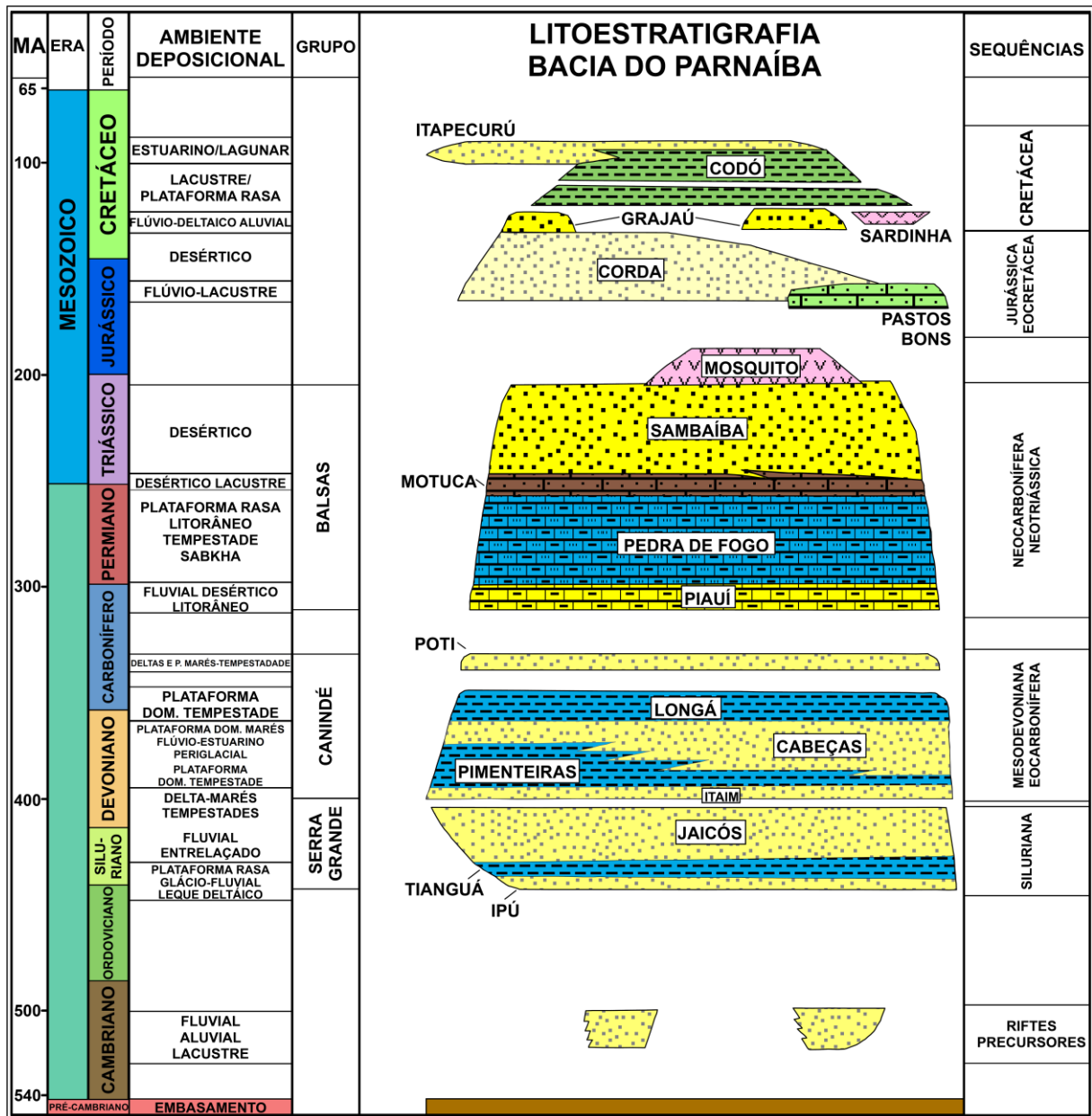
A Bacia intracratônica do Parnaíba foi subdividida no presente trabalho em cinco sequências sedimentares (Vaz *et al.*, 2007; Santos & Carvalho, 2009; CPRM, 2012):

- a) Siluriana;
- b) Mesodevoniana-Eocarbonífera;
- c) Neocarbonífera-Neotriássica;
- d) Jurássica-Eocretácea;
- e) Cretácea.

Vale salientar a ocorrência de um magmatismo toleítico ocorrido nos períodos Triássico, Jurássico e Cretáceo. Este será descrito logo em seguida.

A figura 4 exibe uma coluna estratigráfica das sequências sedimentares da bacia do Parnaíba e parte da bacia de São Luís.

Figura 4 – Coluna litoestratigráfica das seqüências sedimentares da bacia do Parnaíba.



Fonte: (Vaz et al., 2007; CPRM, 2012).

2.1.3.1 Siluriano

Esta seqüência sedimentar é composta pelo Grupo Serra Grande, que por sua vez é subdividido em três formações (base para o topo), Ipú, Tianguá e Jaicós (Carozzi, 1975; Caputo & Lima, 1984). Embora contestados, Grahn et al., (2005) atribuem a idade desse Grupo como inteiramente do período Siluriano.

- **Grupo Serra Grande**

A base dessa unidade é a Formação Ipú onde predominam arenitos, conglomerados, arenitos conglomeráticos e diamictitos. Não foram encontrados fósseis nessa formação e seu ambiente de deposição é o de leques deltaicos e marinho raso (Campbell et al. 1949; Caputo & Lima, 1984).

Na sequência, temos a Formação Tianguá composta por folhelhos, arenitos e siltitos de ambiente marinho raso (Rodrigues, 1967; Caputo & Lima, 1984). Apresenta contato concordante com as formações da base e topo.

O topo do Grupo Serra Grande é representado pela Formação Jaicós que é composta por arenitos, conglomerados e pelitos de ambiente de leques aluviais e sistemas fluviais (Plummer *et al.*, 1948; Góes & Feijó, 1994).

2.1.3.2 Mesodevoniano – eocarbonífero

O Grupo Canindé é a unidade que compõem essa sequência sedimentar. Esse Grupo é composto por cinco formações, Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti (Góes *et al.*, 1993).

- **Grupo Canindé**

Posicionada entre as Formações Cabeças e Poti, a Formação Longá é composta por folhelhos, siltitos e arenitos subordinados e com ambientes deposicionais variados, dentre eles, ambientes regressivos, infraneríticos e costeiros. Idade atribuída do Fameniano e Tournaisiano (Lima & Leite, 1978).

A Formação Poti é topo do Grupo Canindé e pode conter arenitos, siltitos, folhelhos carbonosos e carvão. Possui idade do Viseano e são atribuídos como ambientes de sedimentação, o marinho, fluvial e flúvio-deltaico (Lima & Leite, 1978).

2.1.3.3 Neocarbonífero – triássico

A presente sequência sedimentar é composta pelo Grupo Balsas que possui quatro formações, Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.

- **Grupo Balsas**

A unidade basal é a Formação Piauí que possui grande exposição no Maranhão e Piauí. Apresenta como litotipos, arenitos, folhelhos, sílex, carbonatos e conglomerados. O ambiente de deposição é o fluvial, apesar de algumas características evidenciarem o eólico. A idade da Formação Piauí através de palinologia é datada do Pensilvaniano (Lima & Leite, 1978; Melo *et al.*, 1998).

A Formação Pedra de Fogo possui contato concordante com a Formação Piauí. É composta por três membros que podem conter argilitos, siltitos, folhelhos, calcários, silexito e porções psamíticas subordinadas (Lima & Leite, 1978; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980). Seus ambientes deposicionais são nerítico com planícies de sbkha e a sua idade (palinologia) data do período Permiano (Góes e Feijó, 1994; Dino *et al.*, 2002).

Através de contato gradacional com a Formação Pedra de Fogo, a Formação Motuca, que também é subdividida em três partes apresenta fácies com folhelhos, calcários, siltitos e arenitos depositados provavelmente em ambiente flúvio-eólico do Neopermiano ao Eotriássico (Mesner & Wooldridge, 1964; Lima & Leite, 1978; Vaz *et al.*, 2007).

A Formação Sambaíba é descrita com a presença de arenitos, sílex, conglomerado, além de pelitos. Essa unidade apresenta contato com os derrames basálticos da Formação Mosquito. Possui características de ambiente deposicional continental flúvio-eólico. (Northfleet & Neves, 1967; Lima & Leite, 1978; Dias, 2004). Apresenta uma idade similar aos basaltos da Formação Mosquito datados do Triássico-Jurássico.

2.1.3.4 *Jurássico-eocretáceo*

As unidades componentes dessa sequência sedimentar são as formações, Pastos Bons e Corda.

A Formação Pastos Bons possui contato discordante com as formações, Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca. Seus litotipos principais são conglomerados, arenitos, calcários, siltitos e folhelhos fossilíferos. Apresenta ambiente deposicional lacustre e idade do período Jurássico (Lima & Leite, 1978; Melo, 2006).

Exibindo contato gradacional e concordante com a Formação Pastos Bons, a Formação Corda é composta por arenitos e porções subordinadas de pelitos (argilitos e folhelhos), depositados em ambientes desérticos e com idade Jurássico(?)-Eocretáceo. (Lima & Leite, 1978; Vaz *et al.*, 2007; Santos & Carvalho, 2009).

2.1.3.5 Cretáceo

A última sequência sedimentar da bacia do Parnaíba é subdividida em três formações, Grajaú, Codó e Ipixuna, e Grupo Itapecurú(?).

A Formação Grajaú exhibe contato inferior discordante com a Formação Corda. Litologicamente é composta por arenitos, conglomerados e argilitos subordinados. Apresenta ambiente deposicional flúvio-deltaico e eólico e idade Barremiana-Aptiana (Mesner & Wooldridge, 1964; Lima & Leite, 1978; Costa Neto *et al.*, 2012).

Anteriormente conhecida como folhelhos Codó, a Formação homônima é subdividida em três fácies que podem apresentar como litotipos arenitos, folhelhos, siltitos, calcários e conglomerados. Ambiente de deposição lacustre e idade Aptiana-Albiana (Lisboa, 1914; Lima & Leite, 1978; Paz & Rossetti, 2006; Santos & Carvalho, 2009; Costa Neto *et al.*, 2012).

O Grupo Itapecurú, por sua vez, é subdividido em Unidade Indiferenciada (não aflorante), formações Alcântara e Cajupe. Existe uma indefinição quanto a alocação do Grupo Itapecurú sendo pertencente à Bacia do Parnaíba ou Bacia de São Luís. Na presente tese, essa unidade será descrita no tópico da Bacia de São Luís.

A Formação Ipixuna é composta por arenitos, siltitos e argilitos caulínicos depositados em ambiente flúvio-lacustre (Francisco *et al.*, 1971; Góes, 1981). Possui uma idade Cretácea-Paleógena a partir de informações paleontológicas e correlação estratigráfica (Santos Jr, 2006).

2.1.3.6 Magmatismo da bacia

O magmatismo de características toleíticas que ocorre na Bacia do Parnaíba é subdividido em dois momentos, Triássico-Jurássico e Cretáceo. No primeiro encontra-se a Formação Mosquito, Diabásio Laranjal e Microgabro. Já no segundo período, a Formação Sardinha e prováveis corpos kimberlíticos.

- **Formação Mosquito**

O pulso que gerou essa unidade ocorreu em 190 Ma (Triássico-Jurássico) e está relacionado com a abertura do Atlântico equatorial e norte (Marzoli *et al.*, 1999). Os contatos dessa formação fazem-se com as formações Corda, discordantemente, e Sambaíba, interdigitado (Lima & Leite, 1978). Basicamente é composto por basaltos com textura afanítica a microporfirítica (Costa Neto *et al.*, 2012)

- **Diabásio Laranjal e Microgabro**

As rochas dessa unidade ocorrem na forma de diques e recorta o fragmento cratônico São Luís e a Faixa Gurupi (Klein & Lopes (2009). Os litotipos geralmente são maciços e são descritos como diabásios e gabros com textura que variam de fanerítica a afanítica.

Localizado a NW do Maranhão observa-se a ocorrência diqueiforme de gabros que recortam as rochas das unidades, Suíte Intrusiva Tromaí, formações Chega Tudo e Igarapé de Areia. Apesar de descrito aqui, sua idade ainda é incerta (Klein & Lopes, 2009).

- **Formação Sardinha**

A Formação Sardinha foi formada com a abertura do Atlântico Sul em 120 Ma (Cretáceo). Essas rochas ocorrem na porção leste da bacia e são cronologicamente compatíveis com o magmatismo da Bacia do Paraná. Ocorrem na forma de soleiras e diques e é composta por diabásios e gabros (menor volume) (Lima & Leite, 1978; Góes *et al.*, 1993).

Vale citar a provável ocorrência de dois corpos kimberlíticos no estado do Maranhão denominados de kimberlitos Flores e Alto Turiaçu (Vasconcelos *et al.*, 2004). A existência não foi comprovada até o momento.

2.1.4 Bacia de São Luís

A Bacia de São Luís está limitada a norte pelas bacias Pará-Maranhão e Barreirinhas, e a sul pelo arco Ferrer-Urbano Santos, que marca a transição com a Bacia do Parnaíba. É uma bacia cretácea de rifte abortado que é caracterizada por ser um gráben sob as unidades do Fragmento Cratônico São Luís. Possui duas formações, Alcântara e Cajupe, ambas pertencentes ao Grupo Itapecuru na qual, este, representa a fase rifte da evolução desta bacia (Lima *et al.*, 1994).

2.1.4.1 Formação Alcântara

Essa unidade é litologicamente composta por arenitos, pelitos e calcários, além de dolomitos e conglomerados subordinados, depositados em ambientes de correntes e canais de maré (ROSSETTI, 1997). Possui idade Eocenomaniana (Aguiar, 1971; Pedrão *et al.*, 1993, 1996).

2.1.4.2 Formação Cajupe

A Formação Cajupe faz contato discordante com a Formação Alcântara (inferior) e o Grupo Barreiras (superior). Os litotipos principais são arenitos e argilitos, podem ocorrer conglomerados em menor volume. Foram depositados em ambientes estuarinos (Rossetti, 1998). Através de relações estratigráficas essa unidade é colocada no Cretáceo Superior (Turoniano)-Paleógeno (Rossetti & Truckenbrodt, 1997).

2.1.5 Coberturas cenozoicas

Existe um vasto registro de coberturas superficiais cenozoicas na área de estudo que serão descritos abaixo como: i) Grupo Barreiras; ii) Pós-Barreiras; iii) Depósitos Aluvionares; iv) Depósitos Litorâneos; e v) Depósitos de Pântanos e Mangues.

2.1.5.1 Grupo Barreiras

Essa unidade é muito expressiva ao longo de todo o litoral brasileiro (Suguio & Nogueira, 1999). Na área de estudo, faz contato inferior discordante com o Grupo Itapecuru. O grupo é composto por arenitos finos a grossos, folhelhos, conglomerados que foram depositados em vales estuarinos (Rossetti & Góes, 2003). Alguns autores colocam a idade Neógena para essa unidade variando do Mioceno ao Plioceno (Rossetti, 2006; Oliveira & Silva, 2011).

2.1.5.2 Pós-Barreiras

A unidade Pós-Barreiras está sobreposta ao Grupo Barreiras em contato discordante. Litologicamente é composto por areias variegadas, pelíticas e conglomeráticas, concreções ferruginosas também podem ser observadas. A idade atribuída varia do Pleistoceno ao Holoceno (Oliveira & Silva, 2011).

2.1.5.3 Depósitos aluvionares

Esses depósitos são encontrados ao longo dos rios e igarapés que ocorrem na região de estudo. São depósitos holocênicos, fluviais inconsolidados de composição arenosa e argilosa (CPRM, 2012).

2.1.5.4 Depósitos litorâneos

São depósitos holocênicos de dunas costeiras (fixas e móveis) ou cordões litorâneos, apresentando areias quartzosas bem selecionadas com coloração acinzentada.

2.1.5.5 Depósitos de pântanos e mangues

Esses depósitos são abundantes na porção norte da área de estudo. Constituem de estuários, ilhas, baías e canais influenciados pela maré. São ambientes salinos compostos por sedimentos lamosos, argila e silte, além de serem ricos em matéria orgânica (Rodrigues *et al.*, 1994).

2.2 Método eletromagnético magnetotelúrico

O método MT consiste de uma técnica geofísica de investigação passiva que utiliza as variações naturais dos campos elétrico e magnético terrestre para reconhecer as características geoelétricas do interior da terra (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012).

Serão abordadas no presente tópico as principais características do método geofísico MT, incluindo sua origem, os princípios matemáticos envolvidos, equipamentos necessários para a fase de aquisição dos sinais, natureza dos dados adquiridos, transformações necessárias e os resultados de saída a partir de um dado MT.

2.2.1 Origem do método MT

Diversos trabalhos acadêmicos, artigos e livros, atribuem a origem do método MT aos trabalhos desenvolvidos por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953). No entanto, Chave & Jones (2012) salientam que a origem e refinamento do método, deu-se pelos inúmeros trabalhos realizados por pesquisadores, principalmente no final do século XIX e primeira metade do século XX.

Schuster (1889) utilizou a técnica de separação de Gauss para calcular a variação diurna do campo magnético. Esse ponto tornou-se importante, dando início à discussão sobre a indução eletromagnética da terra.

Pesquisas realizadas por Chapman & Price (1930) apresentaram modelos sobre a resistividade elétrica da terra, e sua variação com a profundidade.

Hirayama (1934) discorre sobre o comportamento ortogonal entre as componentes dos campos elétrico e magnético.

Rikitake (1951) atentou para a medida da amplitude do campo eletromagnético (E/B) com as mudanças de fase e período (domínio do tempo), através da variação da resistividade com a profundidade.

Neves (1957) tem êxito ao reconhecer o tensor, resultado da relação entre os campos elétrico e magnético, além de criar um algoritmo para solucionar a problemática do levantamento magnetotelúrico 2D.

A partir de então o uso do método MT só tem crescido nas últimas décadas, como no trabalho de Stanley *et al.* (1977), que realizaram 16 sondagens MT na região de Yellowstone nos EUA para investigação geológica.

No Brasil, atualmente, alguns polos acadêmicos têm se destacado na utilização da técnica MT dentre eles: a Universidade de Brasília (UNB), a Universidade Federal do Ceará (UFC) através do laboratório de Geofísica (LGPSR), o Observatório Nacional (ON) etc, têm realizados diversos levantamentos MT, sobretudo nas últimas duas décadas (Pedrosa Jr, 2015; Esposito, 2016; Oliveira, 2016; Silva, 2016; Silva, 2018).

2.2.2 Embasamento teórico

Os princípios físicos do método MT estão sustentados pelas equações de Maxwell somado às equações complementares constitutivas. As primeiras descrevem o comportamento dos campos elétrico e magnético no meio onde se propagam, enquanto que a segunda faz uma associação do comportamento do campo eletromagnético com as características físicas do meio. Logo a baixo são mostradas as equações de Maxwell.

$$\nabla \cdot D = \rho_e \text{ (Lei de Gauss para eletricidade)} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (Lei de Gauss para o magnetismo)} \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\partial_t B \text{ (Lei de Faraday)} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \partial_t D \text{ (Lei de Ampère)} \quad (4)$$

Onde:

D : Deslocamento elétrico

ρ_e : Densidade de carga

B : Indução magnética

E : Campo elétrico

H : campo magnético

J : Densidade de corrente

A seguir são listadas as equações constitutivas.

$$D = \varepsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

Onde:

ε : Permissividade dielétrica

μ : Permeabilidade magnética

σ : Condutividade do meio

Para um maior aprofundamento sobre a teoria de indução eletromagnética e os princípios matemáticos envolvidos sugere-se uma pesquisa detalhada aos trabalhos de (Cagniard, 1953; Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012).

2.2.3 Instrumentação magnetotelúrica

Os equipamentos utilizados para uma aquisição magnetotelúrica podem ser subdivididos em três grupos de maneira geral: Sistemas MT, eletrômetros e magnetômetros. Outros instrumentos auxiliares também são utilizados para possibilitar o funcionamento dos equipamentos principais.

2.2.3.1 Sistemas MT

Existem diversos sistemas de captação de dados MT, e eles são distribuídos aqui conforme a fonte do sinal (natural ou controlada) e local de coleta, se terra ou mar (Vozoff, 1991; Simpson & Bahr, 2005). Cada sistema possui um range de aquisição dado em período.

Para aquisições MT realizadas em terra e através do uso de sinal natural existem os sistemas de longo período (LMT), banda larga (BBMT), áudio-frequência (AMT) e radio-frequência (RMT).

A figura 5 abaixo mostra a central MT utilizada no presente trabalho (vide Apêndices B, C e D) que se enquadra no sistema BBMT.

Figura 5 – Equipamento MT utilizado no presente trabalho, ADU-07e/Metronix © alimentada por duas baterias automotivas de 60 Ah.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sistemas que utilizam uma fonte artificial para geração do sinal são chamados de fonte controlada (CSAMT). E aqueles onde a coleta é feita no oceano são chamados de *seafloor* MT (SFMT).

A tabela 1 abaixo mostra a variação do range de período para cada tipo de sistema MT, uma vez que o dado é adquirido no domínio do tempo.

Tabela 1 – Tipos de sistemas MT comumente encontrados exibindo o tipo de fonte utilizada e o período de aquisição dos dados.

Sistema MT	Fonte do Sinal	Período de Aquisição
LMT	Natural	De 1 s a $> 10^4$ s
BBMT		De 10^{-3} s a 10^3 s
AMT		De 10^{-4} s a 10^{-1} s
RMT		De 10^{-6} s a 10^{-4} s
SFMT		BBMT e LMT
CSAMT	Artificial	De 10^{-4} s a 8 s

Fonte: (Chave & Jones, 2012).

2.2.3.2 Eletrômetros

Os eletrômetros, também conhecidos como sensores telúricos, são responsáveis pela detecção do campo elétrico em duas direções ortogonais e horizontais, ou seja, fornecem a medição das diferenças de potenciais.

Geralmente são utilizados para essa função pares de eletrodos separados a uma distância que pode variar de 25 a 100 m (a depender do sistema MT, ex. 100 m para BBMT). Os eletrodos devem ser orientados nos quatro pontos cardeais magnéticos (N-S, E-W).

A maioria dos sistemas MT utilizam eletrodos porosos a base de Cu-CuSO_4 , Pb-PbCl_2 , Ag-AgCl ou Cd-CdCl_2 . Embora raro, eletrodos capacitivos podem ser utilizados para sistemas AMT e RMT. Em levantamentos marinhos utiliza-se sistemas de pontes de sal conectados a tubos de eletrodos de Ag-AgCl (Petiau & Dupis, 1980; Petiau, 2000; Chave & Jones, 2012).

A figura 6 abaixo mostra o tipo de eletrodo utilizado neste trabalho para aquisição dos dados MT.

Figura 6 – Eletrodo a base de Pb-PbCl_2 fabricado pelo ON (Rio de Janeiro) utilizado no levantamento desta tese. À esquerda em detalhe, e à direita instalado no solo em meio a uma solução com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.3.3 Magnetômetros

Os magnetômetros medem as variações temporais do campo magnético (H), isto é, a indução magnética (B) em duas ou três direções ortogonais.

Os dois tipos de magnetômetros mais utilizados na atualidade são as bobinas de indução e os magnetômetros do tipo *fluxgate*. A escolha dá-se pelo tipo de sistema MT utilizado, exemplo, sistemas MT que adquirem altas frequências (BBMT, AMT e RMT) o mais adequado são as bobinas de indução, já sistemas MT de aquisição de baixas frequências (LMT) os magnetômetros *fluxgates* são os mais indicados (Chave & Jones, 2012).

Os magnetômetros devem ser instalados no solo a uma profundidade mínima de 30 cm, nivelados e orientados nas direções N-S (magnético), E-W (magnético) e Nadir (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012; Uchoa *et al.*, *in press*).

A figura 7 abaixo mostra as imagens do tipo de magnetômetro utilizado neste trabalho.

Figura 7 – Bobinas de indução utilizadas neste trabalho. À esquerda, conectada com a central MT (sistema BBMT). À direita, sendo nivelada, orientada e instalada no solo numa profundidade de 30 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.4 Funções de transferências MT

As funções de transferências MT são calculadas a partir das séries temporais e transformadas para o domínio da frequência pela FFT (*Fast Fourier Transform*). As principais funções de transferências utilizadas como resultado de um levantamento MT é o tensor de impedância (Z) e o Tipper (T) (Vozoff, 1972).

2.2.4.1 Tensor de impedância (Z)

O tensor de impedância é a razão entre as componentes ortogonais dos campos elétrico (E_x e E_y) e magnético (H_x e H_y), e é mostrado em forma de fase (Φ) e resistividade aparente (ρ_a), ambos associados a uma determinada frequência (ω) (Simpson & Bahr, 2005).

Abaixo é mostrada uma relação matemática simplificada de uma componente do tensor de impedância.

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (8)$$

Onde:

Z_{xy} , Componente do tensor de impedância

E_x , Componente do campo elétrico

H_y , Componente do campo magnético

A fase (Φ) e resistividade aparente (ρ_a) também podem ser calculadas através de equações matemáticas relacionadas com o tensor de impedância Z, como mostrado abaixo.

$$\rho_a = \frac{|Z|^2}{\omega\mu} \quad (9)$$

Onde:

ρ_a , Resistividade aparente (Ω -m)

Z, Tensor de Impedância do meio

ω , frequência

μ , Permeabilidade magnética

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{Im(Z_{xy})}{Re(Z_{xy})} \right] \quad (10)$$

Onde:

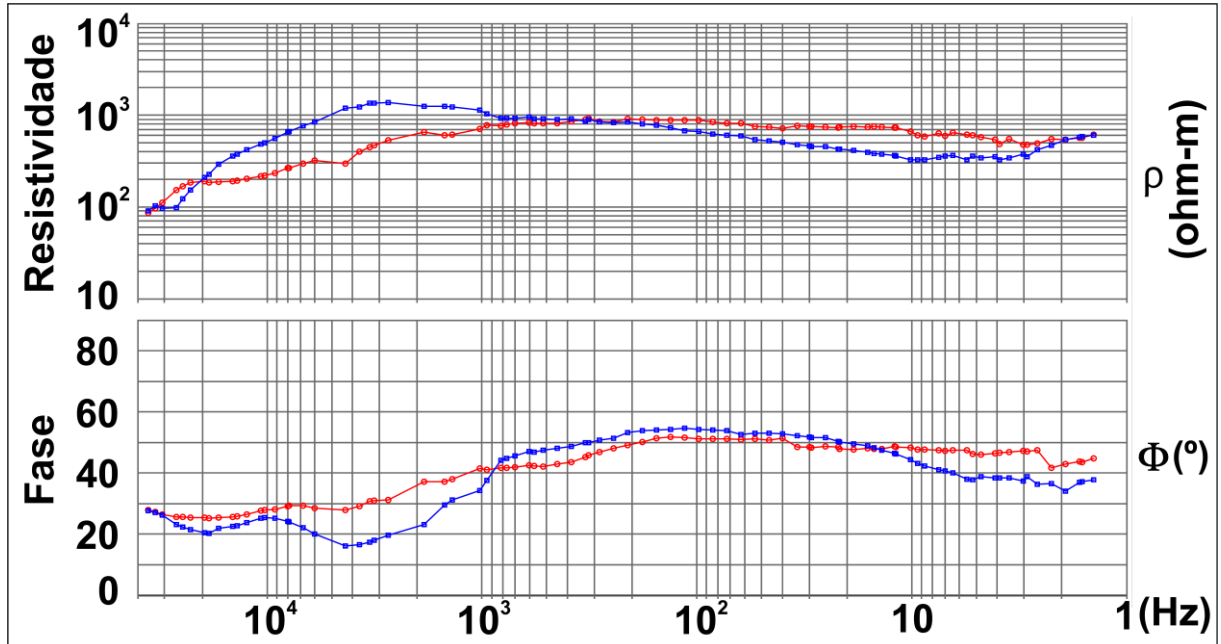
Φ , Fase de impedância (grau)

$Im(Z_{xy})$, Parte imaginária

$Re(Z_{xy})$, Parte real

A figura 8 abaixo mostra o resultado de um tensor de impedância calculado no presente trabalho.

Figura 8 – Tensor de impedância (Z) calculado para estação MT02 no levantamento MT desse trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.4.2 Tipper (T)

O tipper (T) também pode ser chamado de função de transferência geomagnética e é representado por uma grandeza vetorial incluindo parte real e imaginária (Simpson & Bahr, 2005).

Através do tipper encontram-se os vetores de indução que apontam para as fontes condutoras (Vozoff, 1972;). Sua magnitude pode ser calculada através da equação abaixo (Menezes, 2013).

$$T = \sqrt{|T_x|^2 + |T_y|^2} \quad (11)$$

Onde:

T , Tipper

T_x e T_y , Componentes do tipper.

2.2.5 Análise de dimensionalidade

Esta é uma etapa importante em estudos magnetotélúricos que tem como propósito conhecer a distribuição das características geoeletricas de subsuperfície e determinar qual modelagem é mais adequada para gerar o modelo geofísico MT (Simpson & Bahr, 2005; Martí *et al.*, 2009).

É necessário estar de posse de todos os tensores de impedância das sondagens MT, para que ao final dessa etapa possa-se indicar a dimensionalidade das estruturas em: unidimensional (terra 1 D), bidimensional (terra 2 D) e/ou tridimensional (terra 3 D) (Santos, 2012).

2.2.5.1 Terra 1 D

Embora raro, em se tratando de levantamentos MT regionais, numa característica geoeletrica unidimensional, a resistividade elétrica varia apenas em uma direção e não há a necessidade de rotação do tensor Z.

Sendo assim, o tensor de impedância Z tem suas componentes xy e yx iguais e se reduz a equação abaixo.

$$Z_{1D} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (12)$$

2.2.5.2 Terra 2 D

Nessas condições a resistividade varia em duas direções e os campos elétrico e magnético necessitam de um ajuste conforme a rotação do tensor de Impedância para uma direção específica, chamada de *strike* geoeletrico. Condições 2 D geralmente ocorrem em regiões geológicas de bacias sedimentares.

Apenas em características bidimensionais usa-se os termos modos TE (*transversal electric*) e TM (*transversal magnetic*). No primeiro, as correntes elétricas fluem paralelas ao *strike* geoeletrico, enquanto que no segundo as correntes fluem perpendiculares ao mesmo.

Em resultados MT o modo TE é utilizado para caracterização de estruturas profundas, já o modo TM é sensível a estruturas rasas. Sugere-se a utilização conjunta de ambos os modos ao final do modelo para uma melhor interpretação dos dados.

Numa terra 2D o tensor de impedância possui suas componentes xy (TE) e yx (TM) diferentes, e pode ser representado conforme a equação abaixo.

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & TE \\ TM & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (13)$$

2.2.5.3 Terra 3 D

Regiões geológicas prováveis onde a resistividade varia nas três direções são: sítios orogênicos, regiões cratônicas, intrusões ígneas etc. Apenas em condições tridimensionais o tensor de impedância possui todas as suas componentes diferentes entre si como mostrado abaixo.

$$Z_{3D} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (14)$$

Existem diversos métodos descritos na literatura para proceder com a análise de dimensionalidade dos dados MT (Groom & Bailey, 1989; Bahr, 1991; McNeice & Jones, 2001; Caldwell, 2004).

No presente trabalho utilizou-se a metodologia através do *Waldin Code*, que estabelece um conjunto 8 invariantes para caracterizar a dimensionalidade dos dados, além de identificar a distorção galvânica que são efeitos gerados por corpos superficiais (Martí *et al.*, 2009).

Os resultados da dimensionalidade e distorção galvânica possíveis, através do *WAL code* são: 1D, 2D, 3D/2D (distorção galvânica) *twist*, 3D/1D 2D (distorção galvânica), 3D/2D e 3D (Martí *et al.*, 2009).

Para mais informações sobre a dimensionalidade e distorção dos dados MT consultar os trabalhos de Chave & Jones, 2012.

2.2.6 Inversão e resultados esperados

A etapa de inversão dos dados MT consiste na obtenção de um modelo geofísico de subsuperfície, exibindo os contrastes laterais e de profundidades das resistividades elétricas (Simpson & Bahr, 2005). Os dados MT são submetidos a técnicas computacionais avançadas denominadas de algoritmos de inversão.

É importante seguir as seguintes premissas antes de realizar a inversão dos dados MT:

- a) observar os resultados da etapa de dimensionalidade para determinar o tipo de inversão (1D, 2D e/ou 3D);
- b) escolha do *software* (algoritmo de inversão);
- c) criar malhas com condições distintas de semi-espço homogêneo (ex. 100, 500, 1k Ω m) conforme a observação do sinal coletado;
- d) considerar a influência do mar em levantamentos MT próximos a costa (área de estudo);
- e) integração entre os resultados de cada malha com dados geológicos/geofísicos existentes;
- f) escolher o modelo com menor erro (RMS) e melhor ajuste entre os dados observados e calculados (*datafit*).

Vale salientar que a maioria dos usuários utilizam a inversão 2D, mesmo em casos onde os dados trazem grande influência 3D. Isso ocorre devido às discussões e avanços que estão atualmente ocorrendo em torno de modelos de inversão 3D (Simpson & Bahr, 2005).

Sendo assim, é importante cautela ao interpretar modelos geofísicos submetidos a inversões que não satisfazem as condições de dimensionalidade e distorção.

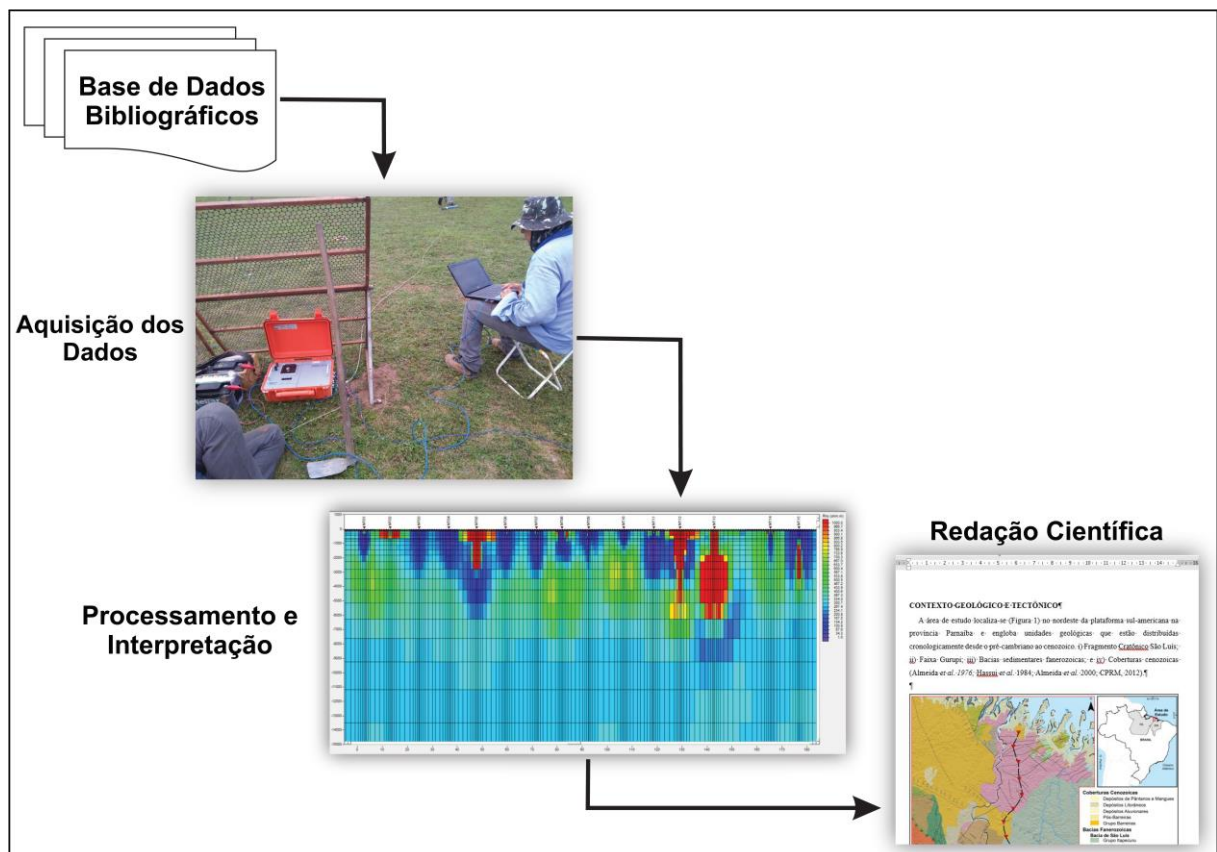
3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Esta tese foi elaborada através do desenvolvimento de quatro etapas que serão descritas a seguir, de maneira concisa, em ordem cronológica:

- a) base de dados bibliográficos;
- b) aquisição dos dados;
- c) processamento e interpretação;
- d) redação científica.

A figura 9 abaixo mostra sumariamente a estratégia metodológica deste trabalho.

Figura 9 – Etapas do método adotado neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Base de dados bibliográficos

A compilação dos dados bibliográficos (livros, teses, artigos, mapas, documentos etc) teve como objetivo elencar o maior número possível de trabalhos para construir o embasamento teórico desta tese.

A pesquisa bibliográfica foi subdividida em duas etapas. Primeiramente foram levantados dados referentes à geologia regional da Província Parnaíba com enfoque na porção norte, onde afloram as rochas do fragmento cratônico São Luís e faixa Gurupi (Pré-cambriano). Posteriormente foram compilados trabalhos geofísicos de levantamentos magnetotelúricos desenvolvidos no Brasil e no mundo.

3.2 Aquisição dos dados

Anteriormente à etapa de aquisição dos dados seguiu-se com alguns cuidados: planejamento logístico (infraestrutura, transporte, equipe técnica, checagem da instrumentação), teste dos equipamentos (qualitativo), aquisição de materiais auxiliares etc.

Esta etapa consistiu na coleta dos dados MT *in loco*, e foi realizada em maio de 2018 no estado do Maranhão com o apoio da equipe técnica do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) da UFC. Também foram levantados dados geológicos de cada estação MT e/ou afloramento rochoso ao longo do perfil geofísico.

Os principais equipamentos utilizados foram 02 centrais MT ADU-07e, 04 bobinas de indução (magnetômetros), 08 eletrodos a base de Pb-PbCl₂, 08 baterias automotivas de 60 Ah e 02 notebooks para programação.

O arranjo adotado em cada estação MT foi o proposto por Simpson & Bahr, 2005). A equipe técnica para execução do levantamento MT foi composta de 04 geólogos e 01 engenheiro eletricista especializado em aquisições geofísicas eletromagnéticas.

3.3 Processamento e interpretação

Os dados coletados passaram pelos seguintes procedimentos metodológicos, subdividido em seis etapas para melhor compreensão:

- a) descarregamento em forma de série temporal da central ADU;
- b) remoção dos ruídos através de rotinas de processamentos;
- c) transformação para o domínio da frequência através da FFT;
- d) cálculo das funções de transferência;
- e) análise de dimensionalidade;
- f) inversão dos dados (modelo geofísico final).

Os processamentos foram realizados através dos *softwares* ProcMTGui, TsPlotter e WingLink. Esses programas são especializados em tratamento e transformação de dados MT e/ou outros dados geofísicos.

A interpretação dos resultados foi lastreada através de informações geológicas e geofísicas anteriores e dados geológicos coletados ao longo do perfil geofísico estudado.

3.4 Redação científica

A última etapa do método de trabalho fundamentou-se na integração entre as informações compiladas na base de dados bibliográficos e os resultados gerados nas demais etapas.

Com base nesta análise foram confeccionados, além da presente tese, 02 artigos para submissão em revista especializada (indexada Qualis CAPES), um no Brasil (Anuário do IGEO-UFRJ – ISSN 0101-9759 – e-ISSN 1982-3908) e outro no exterior (*Journal of South American Earth Sciences* – ISSN: 0895-9811).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados 02 artigos científicos na íntegra, onde mostram os resultados e discussões dos dados adquiridos através do levantamento MT ao longo do fragmento cratônico SL e faixa Gurupi no Maranhão.

4.1 Diretrizes para aquisição e processamento de dados geofísicos magnetotelúricos: o caso do fragmento cratônico são luís/MA

Guidelines for Magnetotelluric Geophysical data Acquisition and Processing: The Case of the São Luís Cratonic Fragment

Elenilton Bezerra Uchoa¹; Christiano Magini²; Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco³; Nilton Cesar Vieira Silva³ & Fabiano Mota da Silva³

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Campus Sobral, Av. Dr. Guarani 317, Derby Clube, 62040-730, Sobral, CE, Brasil

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Campus do Pici, Bela Vista, 60440-554, Fortaleza, CE, Brasil

³Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, LGPSR, Campus do Pici, Bela Vista, 60440-554, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: elenilton.uchoa@ifce.edu.br; magini2005@hotmail.com; mariano@ufc.br; niltoncv@gmail.com; fabianogeologia@yahoo.com.br

Etapas da submissão do manuscrito:

Submetido: 10/12/2019 (Anuário IGEO-UFRJ – ISSN 0101-9759 – e-ISSN 1982-3908).

1ª Revisão: 20/03/2020 (revista).

Resposta dos Autores: 07/04/2020 (data de envio).

2ª Revisão: 18/04/2020 (revista).

Resposta dos Autores: 20/04/2020 (data de envio).

Resumo

A partir da década de 1950 o método magnetotelúrico (MT) tem sido amplamente utilizado em prospecções minerais e petrolíferas (bacias sedimentares), regiões cratônicas e reconhecimento de discontinuidades geológicas de porte crustal. O método geofísico MT consiste em uma técnica passiva que visa investigar as características geoeletricas do subsolo através da interação entre as correntes telúricas e os materiais de subsuperfície. O objetivo do trabalho é exibir um guia de uma campanha MT através da aquisição de 15 estações MT em uma área que abrange o fragmento cratônico São Luís/MA com o intuito da divulgação científica e formação de equipes especializadas. O método de trabalho engloba as seguintes etapas com base nos princípios do método MT: instrumentação MT, coleta do dado, processamento dos dados e produtos de saída (modelo geofísico e pseudoseções). Foram adquiridas 15 estações MT com uma equidistância de 12 km e um comprimento de perfil NNW-SSE de 180 km. Todas as frequências de cada sondagem MT foram submetidas ao filtro Notch FIR para subtração da contribuição da rede elétrica. Os 15 tensores de impedâncias calculados são visualizados em resistividade aparente (ρ) e fase (Φ). Os valores de resistividade tiveram uma variação de 0,027 (MT-08) a 10.530 (MT-12) ohm-m. Para um prognóstico das características geoeletricas de subsuperfície foram gerados três produtos de saída: modelo geofísico inicial, pseudoseções modo TE e TM. O presente trabalho apresentou um guia elucidativo para aquisição de dados geofísicos magnetotelúricos no nordeste do Brasil, com o propósito de contribuir com a formação de novas equipes em levantamentos MT servindo como referência para estudantes e/ou profissionais das geociências na iniciação ao método MT.

Palavras-chave: Magnetotelúrico, Cráton São Luís, Maranhão

Abstract

Since the 1950s, the magnetotellurics method (MT) has been widely used in mineral and oil prospecting (sedimentary basins), cratonic regions and recognitions of crustal-scale geological discontinuities. MT geophysical method consists of a passive technique that aims to investigate geoelectric characteristics of subsoil through the interaction between telluric currents and subsurface materials. The objective of the work is show a guide for an MT campaign through the acquisition of 15 MT stations in an area where it covers the São Luís cratonic fragment with the purpose of scientific dissemination and formation of specialized teams. The working method comprises the following steps based on the principles of MT method: MT instrumentation, data acquisition, data processing, and geophysical products (forward modeling and pseudo-sections). 15 MT stations were acquired with an equidistance of 12 km and an NNW-SSE profile length of 180 km. All frequencies for each MT sounding were subjected to the Notch FIR filter to subtract the contribution from the powerline. The 15 calculated impedance tensors are displayed in apparent resistivity (ρ) and phase (Φ). The resistivity values varied from 0.027 (MT-08) to 10.530 (MT-12) ohm-m. For the prognosis of the subsurface geoelectric characteristics, three geophysical products were created: forward geophysical model, TE and TM mode pseudo-sections. The manuscript presented an explanatory guide for the acquisition of magnetotellurics geophysical data in northeastern Brazil, with the purpose of contributing to the formation of new teams in MT surveys serving as a reference for students and/or professionals from geosciences in the initiation to MT method.

Keywords: Magnetotellurics, São Luís Craton, Maranhão

1 INTRODUÇÃO

O método magnetotelúrico (MT), englobado nos métodos geofísicos eletromagnéticos, utiliza-se das variações naturais dos campos elétricos e magnéticos da terra com o propósito de obter estimativas das resistividades/condutividades a partir da determinação de impedâncias associadas ao meio geológico de subsuperfície (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953).

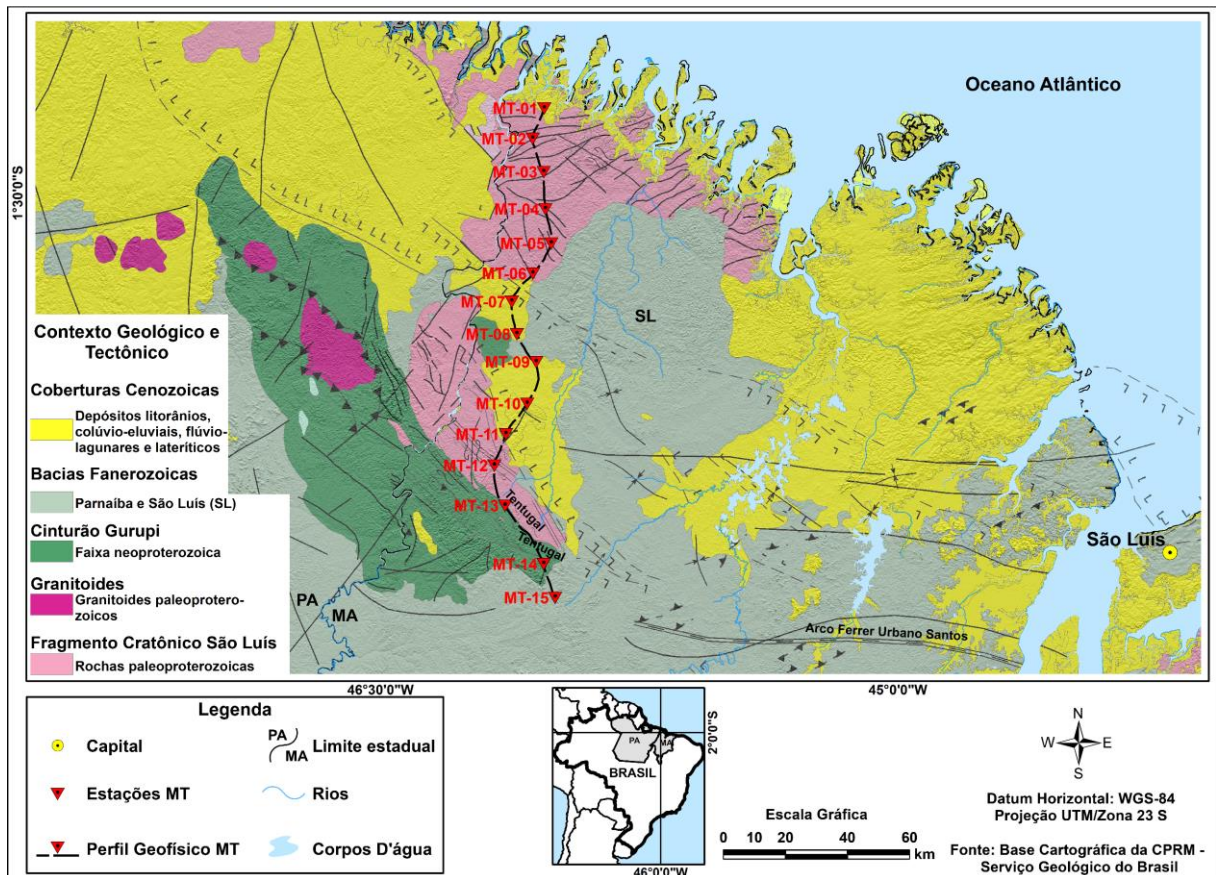
O campo eletromagnético que é usado para gerar o dado MT vem da magnetosfera terrestre, vento solar, cargas presentes na ionosfera e fenômenos atmosféricos. Este campo induz a formação de correntes telúricas que se propagam no interior da terra e retornam para superfície na forma de campos eletromagnéticos secundários que podem ser captados através de sensores que detectam o dado MT (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012).

O método MT pode ser empregado em vários ramos, dentre eles: petróleo, prospecção mineral, água subterrânea, investigação de bacias sedimentares, regiões cratônicas (área de estudo), identificação de descontinuidades geológicas, geotectônica etc. Seu uso vem aumentando consideravelmente com o passar dos anos (Santos, 2012; Borah *et al.*, 2015; Daly *et al.*, 2018).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar de forma didática as etapas de um levantamento realizado na região nordeste do Brasil, no estado do Maranhão, região do fragmento cratônico São Luís. O estudo de caso pretende contribuir com o entendimento do método MT, indicando os cuidados durante a aquisição, processamento de dados e identificação/remoção de ruídos antropogênicos, análises das funções transferências e apresentação de produtos de saída como: modelo geofísico inicial e pseudoseções dos modos TE (*Transversal Eletric*) e TM (*Transversal Magnetic*).

Possui como premissa a divulgação e o fomento na formação de equipes especializadas em levantamentos MT. Assim, foi realizado um perfil geofísico de direção NNW-SSE de aproximadamente 180 km de comprimento, no qual foram adquiridas 15 estações denominadas de MT-01 a MT-15 (Figura 10).

Figura 10 – Mapa geológico regional exibindo a localização do perfil com as estações MT e as unidades geotectônicas da área no extremo NW do Maranhão.



Fonte: (CPRM, 2012).

2 METODOLOGIA

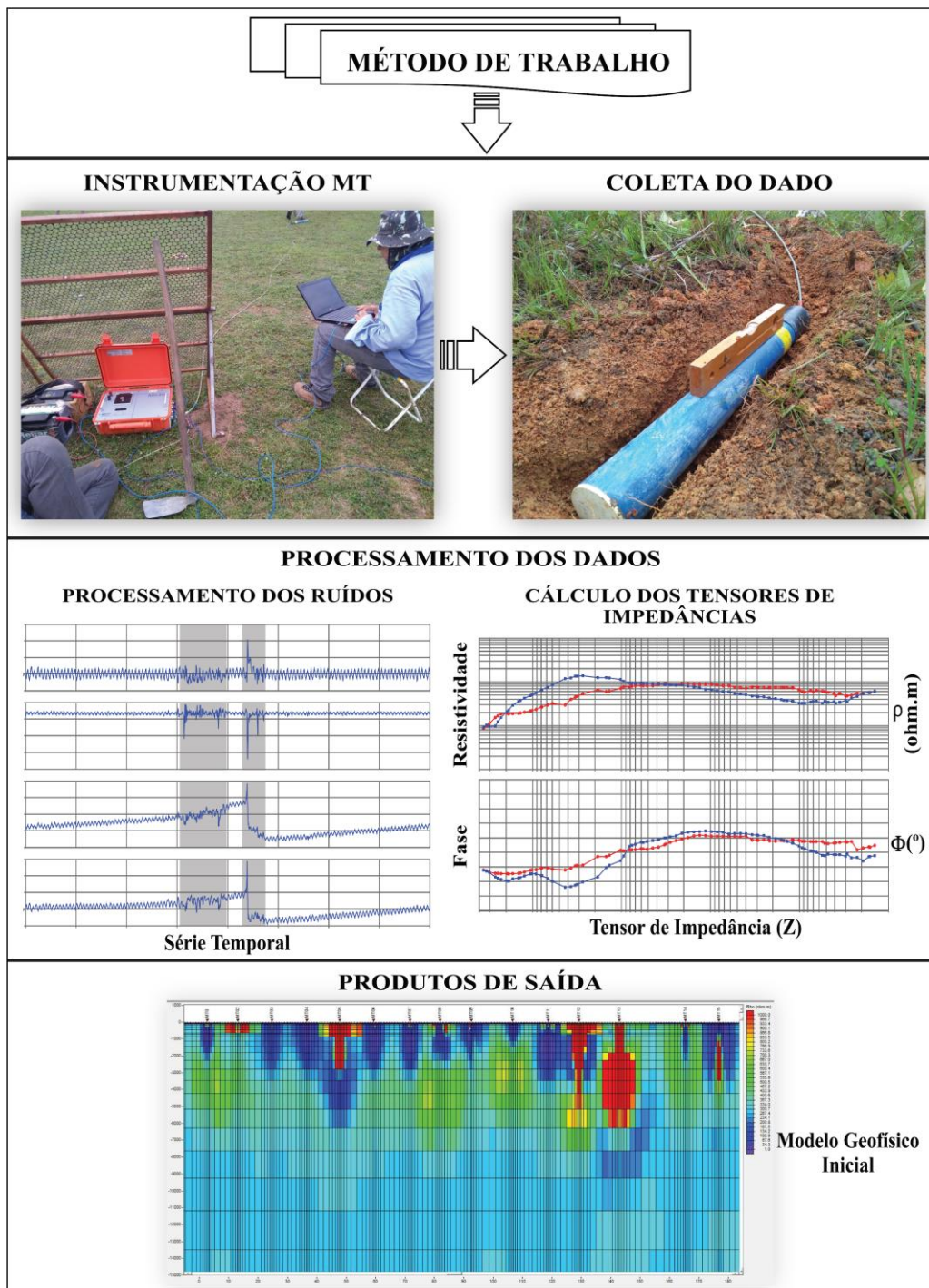
2.1 Etapas do Método Magnetotelúrico

O método empregado no presente trabalho, baseado nos princípios magnetotelúricos, tem o seu desenvolvimento conforme as seguintes etapas: instrumentação MT, coleta do dado, processamento dos ruídos, cálculo dos tensores de impedâncias e produtos de saída.

A instrumentação MT aqui utilizada, refere-se a todos os equipamentos necessários em uma campanha MT, seja em campo na aquisição do dado MT, ou no laboratório, onde são necessários *hardwares* e *softwares* adequados para o tratamento, transformação e saída dos dados.

A coleta do dado é realizada *in situ* e requer uma série de cuidados na montagem dos equipamentos, além da escolha do melhor lugar para montar o arranjo MT, visando um acréscimo na qualidade de aquisição do dado, na qual será explicitado mais adiante. A figura 11 mostra as etapas do trabalho realizado.

Figura 11 – Fluxograma indicando as etapas de aquisição e processamento de dados no Método Magnetotelúrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processamento dos dados MT é subdividido em duas etapas, o pré-processamento dos ruídos, através da aplicação de filtros nas séries temporais adquiridas em campo, e o cálculo dos tensores de impedâncias, onde são utilizados diversos parâmetros para transformar as séries temporais (domínio do tempo) em tensores de impedância (domínio da frequência).

A última etapa do método de trabalho consiste na obtenção de produtos geofísicos de saída que podem ser utilizados para reconhecimento do subsolo de pequenas e grandes áreas presentes na crosta terrestre. Exemplos de alguns dados de saída são: modelo geofísico inicial (*forward modeling*), pseudoseções geoelétricas, inversões 2D e 3D, etc.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Instrumentação MT

Os resultados exibidos e discutidos nesta seção referem-se à descrição de uma campanha MT realizada no Maranhão, nordeste do Brasil, caracterizado por uma região cratônica (Fragmento Cratônico São Luís), faixas móveis Neoproterozoicas (Cinturão Gurupi), bacias sedimentares Fanerozoicas (São Luís e Parnaíba) e coberturas cenozoicas.

Os equipamentos utilizados neste levantamento MT são divididos em instrumentação de campo e laboratório.

A instrumentação de campo consiste de: uma central *ADU-07e*, duas bobinas de indução para medição das variações da intensidade do campo magnético (H_x e H_y), quatro eletrodos não polarizados a base de PbCl para medição das componentes do campo elétrico (E_x e E_y), um eletrodo não polarizado para o aterramento e duas baterias automotivas de 60 Ah para alimentar a central *ADU-07e*.

Para o laboratório é necessário um computador do tipo *workstation* com *softwares* para tratamentos de dados MT, ex: TSPlotter (para manipulação das séries temporais) e ProcMT (para cálculo das funções de transferências – tensores de impedâncias).

O principal instrumento em um levantamento MT é o Sistema de Aquisição de Dados Magnetotelúricos (SADMT), onde encontra-se toda a programação eletrônica para este tipo de coleta (Chave & Jones, 2012). Existem modelos de

SADMTs para serem utilizados em terra ou mar (Vozoff, 1991). O modelo de SADMT utilizado neste trabalho foi o *ADU07e* que coleta dados MT no continente sob determinadas frequências de amostragem.

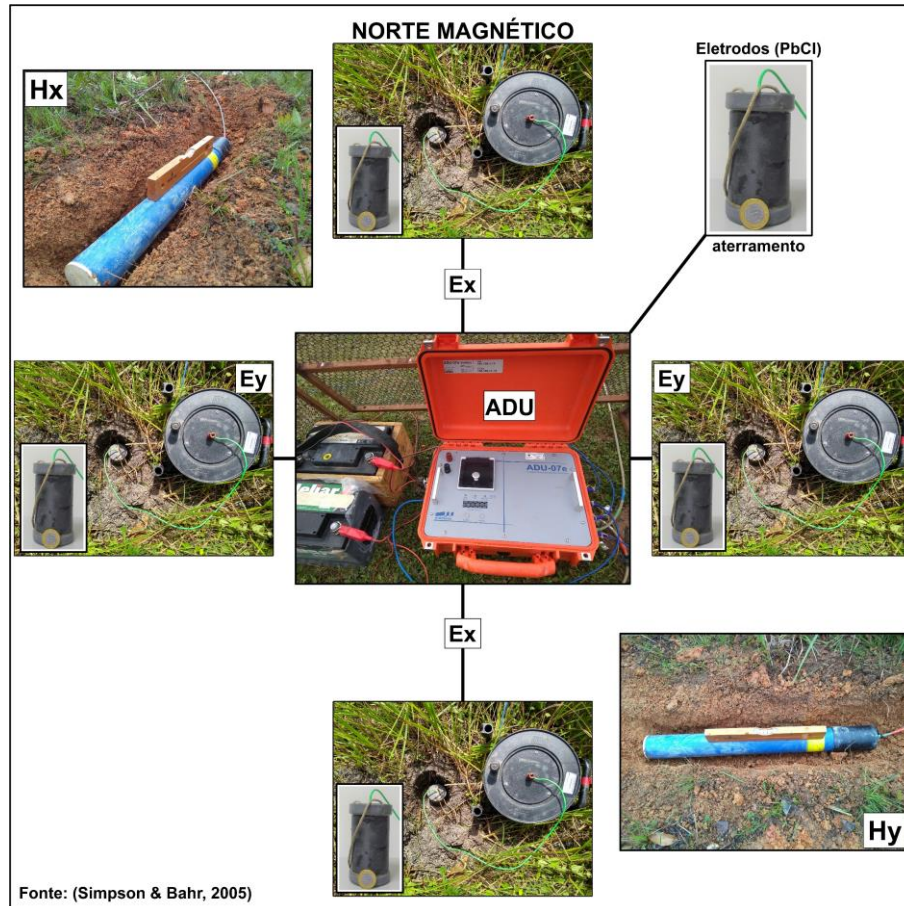
3.2 Coleta do Dado

A coleta das 15 estações MT ocorreu em maio de 2018 no período chuvoso e deu-se de NNW para SSE, entre os municípios de Carutapera (estação MT-01) à Santa Luzia do Paruá (Estação MT-15). A escolha da direção do levantamento foi tomada de forma a cruzar os contatos entre os domínios tectônicos da área de investigação.

A equidistância entre estações foi de aproximadamente 12 km, pois o levantamento realizado possui um objetivo regional. Para campanhas MT com áreas menores sugere-se o uso de equidistâncias menores para um melhor detalhamento da área analisada.

A Fig. 12 mostra os equipamentos de uma das estações adquiridas no presente trabalho, segundo o arranjo proposto por Simpson & Bahr (2005).

Figura 12 – Equipamentos utilizados na aquisição de dados MT em campo. As imagens acima foram realizadas na estação MT14 e o mesmo arranjo foi adotado nas demais estações. Ex e Ey são as componentes do campo elétrico enquanto que Hx e Hy representam as componentes do campo magnético.



Fonte: (Simpson & Bahr, 2005).

A instalação de uma estação MT em campo deve seguir os seguintes critérios: i) escolha de uma região com vegetação de baixo porte e área com raio mínimo de 50 m; ii) os eletrodos de PbCl devem ser orientados a partir do norte magnético; iii) os eletrodos devem ser colocados em contato com solo húmido mais bentonita em buraco de ~20 cm e interligados com a central (distância 50 m) através de cabos elétricos; iv) as duas bobinas de indução utilizadas devem ser niveladas e orientadas (com bússola) N-S (magnéticos) (Hx) e E-W (magnéticos) (Hy) e ligadas na central através de cabos; v) as baterias são utilizadas para alimentar a central ADU; vi) os testes de contatos dos eletrodos devem ser realizados com multímetro analógico ou digital.

Se a coleta do dado ocorrer em época de pouca chuva sugere-se a abertura e umedecimento dos buracos com 24 horas de antecedência para melhor recebimento do sinal através dos eletrodos (Figura 13).

Figura 13 – Procedimentos utilizados numa campanha MT. A) umedecimento (água e bentonita) do furo de 20 cm. B) eletrodo de PbCl instalado dentro do furo. C) e D) Orientação e nivelamento da bobina de indução.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram necessários para a coleta locais com vegetação rala, sem atividade agropecuária, uma distância considerável da rede elétrica local, e sem qualquer espécie de trepidação, seja por animais ou transportes.

Antes do início da aquisição todos os transportes utilizados para a logística deste trabalho foram afastados, evitando com isso, a adição de mais uma fonte de ruído.

Uma vez instalados todos os aparatos necessários, são inseridas na central ADU as frequências de amostragem que serão adquiridas com os seus respectivos tempos de aquisição. As bandas de frequências utilizadas foram divididas em HF (*High Frequency*) e LF (*Low Frequency*).

As bandas HF e LF são por sua vez subdivididas em três bandas de frequências. Vale ressaltar que quanto menor a frequência maior a profundidade de investigação. A tabela 2 abaixo mostra as altas e baixas frequências utilizadas na aquisição.

Tabela 2 – Bandas de frequências utilizadas na aquisição dos dados MT e seus respectivos tempos. A frequência de 64 Hz foi obtida através da dizimação da frequência de 128 Hz.

Bandas de Frequências	Frequência (Hz)	Tempo
HF	131072	1 min e 30 s
	65536	2 min
	16384	2 min
LF	4096	15 min
	512	50 min
	128	19 h
	64	Decimação

Fonte: Elaborado pelo autor.

As frequências de amostragem presentes na Tabela 1 dependem do tipo de SADMT que está sendo utilizada, pois cada equipamento possui internamente as placas elétricas para cada tipo de frequência. No caso da *ADU-07e*, estas são as frequências (Tabela 1).

Já o tempo de aquisição pode ser modificado pelo operador, no entanto, vale frisar, que as frequências altas levam menos tempo para serem adquiridas,

portanto não necessitam de tempos prolongados. Caso contrário, um imenso volume de dados desnecessários será adquirido, tomando espaço importante do disco rígido da central MT.

Ao final da coleta da frequência de 128 Hz, foi feita uma análise prévia do sinal do dado coletado, bem como uma descrição detalhada das características do local de coleta.

Os dados MT são adquiridos no domínio do tempo e podem ser acessados a partir da ADU em arquivos de extensão (.ats) denominados de séries temporais, nas quais foram descarregadas ainda em campo (*in loco*).

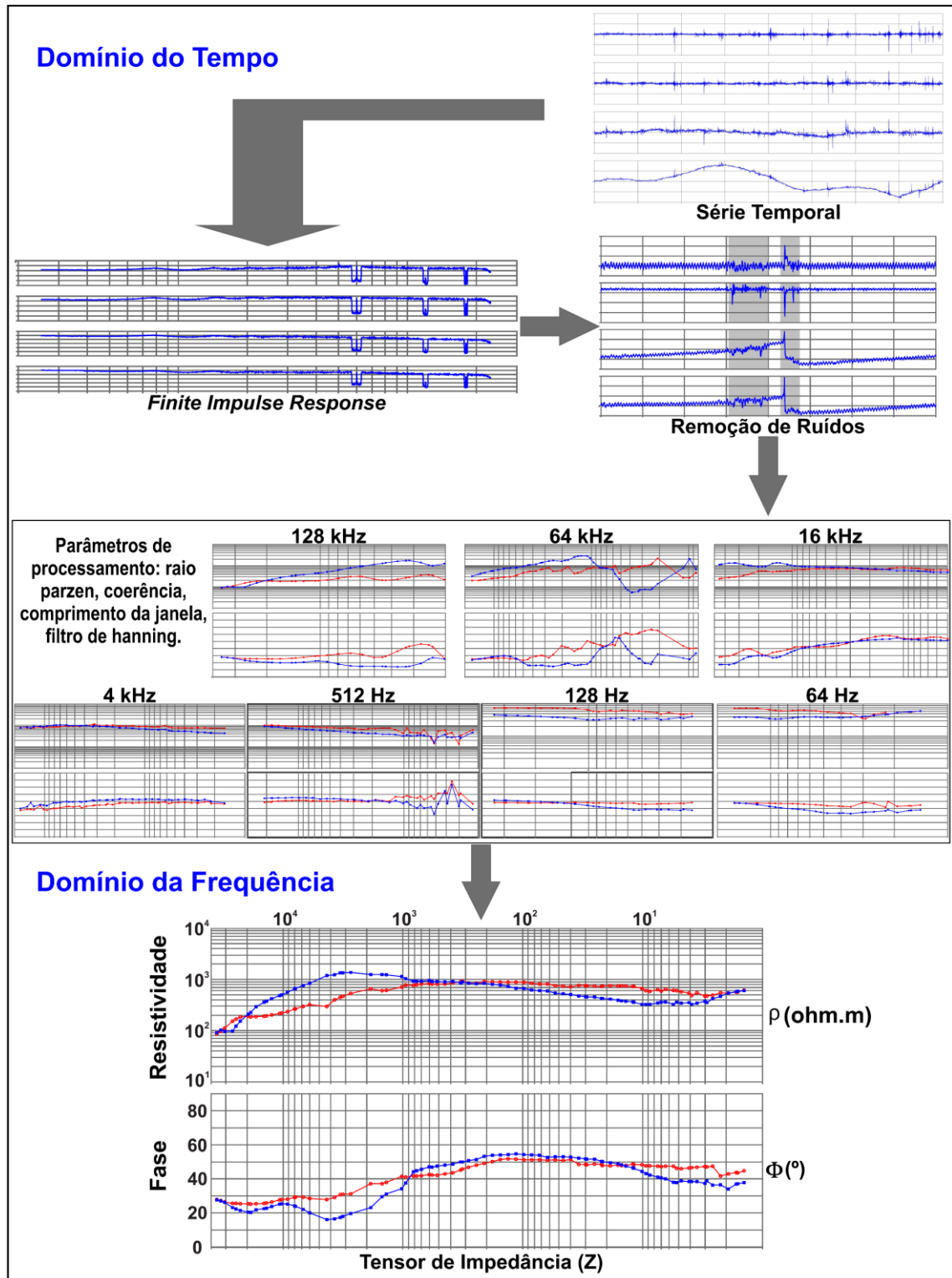
3.3 Processamento dos Dados

O processamento das séries temporais de cada sondagem MT foi subdividido em duas etapas:

- a) pré-processamento das séries temporais para decréscimo dos ruídos;
- b) cálculo dos tensores de impedâncias do meio (Z) para cada estação MT, e de suas resistividades aparentes e ângulos de fase associados.

A figura 14 mostra resumidamente, um esboço da etapa de processamento dos dados MT em que as séries temporais de cada sondagem MT foi submetida.

Figura 14 – Fluxograma indicando a sequência de procedimentos a partir da da obtenção das séries temporais. No domínio do tempo foram aplicadas filtragens para remoção de ruídos, enquanto no domínio da frequência foram calculadas as funções de transferências, os tensores de impedâncias de cada estação MT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.1 Processamento dos Ruídos

De posse do dado MT coletado foi realizada uma rotina de pré-processamentos que tiveram como objetivos, o aumento da razão sinal ruído e um dado de saída que pode representar confiavelmente a informação de subsuperfície.

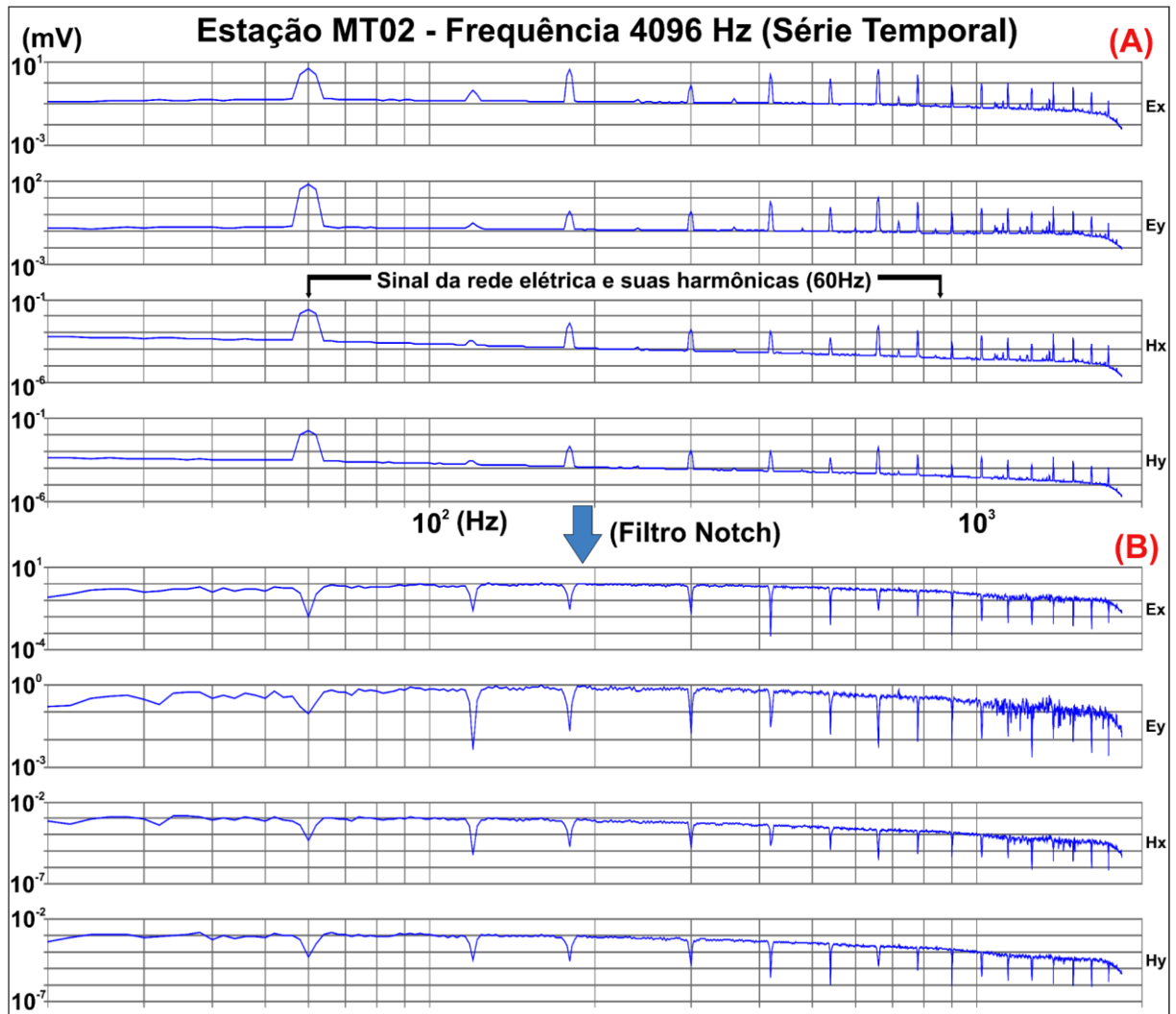
Portanto o objetivo desta etapa foi atenuar os ruídos antropogênicos e meteorológicos (Kao & Rankin 1977, Gamble *et al.*, 1979, Fontes *et al.*, 1988, Egbert 1997, Nagata *et al.*, 2012; Borah *et al.*, 2015)

As séries temporais de cada frequência foram submetidas a dois pré-processamentos, um automatizado e outro manual.

Primeiramente realizou-se uma filtragem TSMP (*Time Series Manipulation Process*), para eliminar a contribuição da rede elétrica (60 Hz e harmônicas Brasil). Esse processo é também conhecido como Filtro de Notch FIR (*Finite Impulse Response*) ou apenas filtro notch (Borah *et al.*, 2015).

A figura 15 mostra o espectro de potência de uma série temporal da estação MT02 antes e depois da aplicação do filtro FIR.

Figura 15 – Utilização do filtro FIR para remoção da rede elétrica (*power line*) de 60 Hz e suas harmônicas. Ex e Ey são as componentes do campo elétrico e Hx e Hy as componentes do campo magnético. A) Série temporal da frequência de 4KHz da estação MT02 antes da aplicação do filtro. B) indica a mesma frequência após a filtragem onde se observa a série temporal sem a influência da rede elétrica.



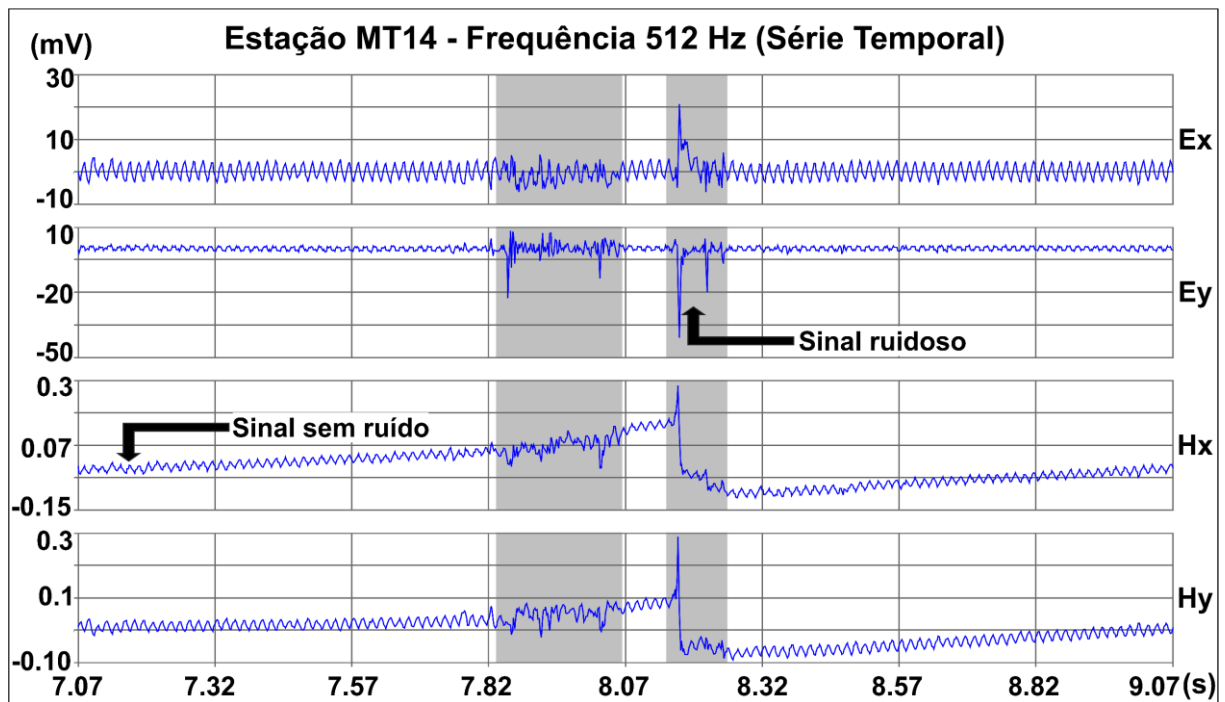
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a aplicação desse filtro utilizou-se um código de programação (filtro notch). Todas as 15 estações MT passaram pelo pré-processamento para eliminar a contribuição da rede elétrica de 60 Hz mais as harmônicas pares e ímpares (60, 120, 180, 240 Hz, ...).

Após essa etapa, observaram-se as séries temporais dos dados adquiridos para análise de outros ruídos antrópicos.

A segunda filtragem foi feita manualmente através da seleção de pontos ruidosos observados nas séries temporais de cada frequência, ou seja, foi analisado o sinal do dado MT e selecionadas as porções que continham ruídos para serem subtraídas dos processamentos (Figura. 16). Este pré-processamento só foi utilizado nas estações que apresentaram uma maior ocorrência de ruídos antrópicos e meteorológicos. Para esta seleção de porções ruidosas usou-se o *software* TSPplotter.

Figura 16 – Seleção de ruídos (área hachurada) nas séries temporais da estação MT14 para serem subtraídos (removidos) dos processamentos. Visualização de uma porção da série temporal em uma janela de 1 kHz, mostrando sinal com e sem ruído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processamento apresentado na figura 7 mostra um recorte da série temporal da frequência de 512 Hz. Os eixos y e x são respectivamente, a diferença de potencial do campo elétrico (Ex e Ey) e magnético (Hx e Hy) dado em mV (milivolts) e o período dado em s (segundos).

Ao analisar as séries temporais observou-se que as estações MT07, MT08 e MT10 apresentaram uma maior incidência de ruídos. Nas duas primeiras, atribui-se esse ruído a uma maior proximidade da BR-316 por onde passam algumas linhas de transmissão de rede elétrica. Enquanto que na estação MT10, o ruído pode ser

decorrente do Povoado de Jacy, município de Maracaçumé/MA, local onde foi instalado a estação. Vale salientar, que essas estações foram mantidas no planejamento da campanha MT, uma vez que, tanto a remoção quanto a realocação das mesmas comprometeriam a direção (NNW-SSE) do perfil MT, além de que esses processamentos atenuam o sinal ruidoso.

Grande parte dos ruídos observados nessas estações, bem como nas outras, foram removidos dos processamentos seguintes. A remoção de ruídos das séries temporais requer uma análise criteriosa, pois tal atividade também implica perda de dado. O objetivo foi obter uma maior razão sinal/ruído.

3.3.2 Cálculo dos Tensores de Impedâncias

Após a filtragem inicial das séries temporais, os dados MT foram processados com a finalidade de obter os tensores de Impedância (Z). Durante essa etapa os arquivos das séries temporais foram transformados para o domínio da frequência, através da FFT (*Fast Fourier Transform*) e foram adquiridas as funções transferências MT, das quais foram gerados os valores de resistividade aparente e fase.

Os processamentos foram realizados através do *software* ProcMT com a inserção de diversos parâmetros, os principais são: *coherency threshold*, *window length* FFT e *parzen radius*.

A *coherency threshold* representa um procedimento para atenuar ruídos de porções coerentes a partir de valores limiares preestabelecidos. É importante utilizar em casos em que o dado está muito ruidoso, porém é necessário critério rigoroso na escolha dos valores limítrofes para que não haja perda de dado.

O parâmetro de *window length* FFT fornece o número de pontos contidos em uma janela durante a transformada de Fourier (FFT) (domínio da frequência). Uma larga janela FFT implicará numa resolução de alta frequência. Existe uma relação entre os parâmetros de *window length* FFT e *parzen radius*, onde para uma janela FFT larga sugere-se o uso de um baixo valor de *parzen radius* (Borah *et al.*, 2015).

A escolha dos valores de cada parâmetro de processamento teve como finalidade a maior suavidade e linearidade da curva de resistividade aparente (ρ) e fase (Φ) de cada tensor de impedância (Z).

Borah *et al.* (2015) sugerem que para cada banda de frequência há um valor específico de cada um desses parâmetros apresentados para ser inserido no *software*. No entanto, é importante entender que cada área investigada apresentará dados com características distintas devido as diferentes condições de subsolo (ambientes geológicos), assim como diferentes prováveis fontes de ruídos antrópicos decorrente do avanço de obras realizadas pelo homem na sociedade.

Os tensores de impedância de uma sondagem MT indicam as características geoeletricas de subsuperfície. As 15 estações MT apresentaram resultados que variam do condutivo ao resistivo (Tabela 3). Os valores de resistividade variaram de 0,027 a 10.530 ohm-m.

A tabela 3 abaixo exibe detalhadamente os valores mínimos e máximos da frequência alcançada e das resistividades aparentes.

Tabela 3 – Valores das frequências e resistividades aparente para cada tensor de impedância calculado.

Estação	Frequência (Hz)		Resistividade Aparente (ohm.m)	
	Min	Máx	Min	Máx
MT-01	1,61	35.788	2,58	123,20
MT-02	1,42	35.788	87,13	1.371
MT-03	1,92	35.788	12,95	211,80
MT-04	2,60	35.788	2,39	32,35
MT-05	0,67	35.788	76,09	4.243
MT-06	1,42	35.788	3,83	37,54
MT-07	4,77	35.788	3,75	21,97
MT-08	2,17	35.788	0,027	74,46
MT-09	0,50	35.788	6,71	80,60
MT-10	6,45	1.026	4,64	1.667
MT-11	5,20	35.788	5,74	74,78
MT-12	2,60	35.788	19,20	10.530
MT-13	1,05	35.788	8,97	1.419
MT-14	1,92	35.788	8,05	346,2
MT-15	0,90	35.788	11,11	496,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

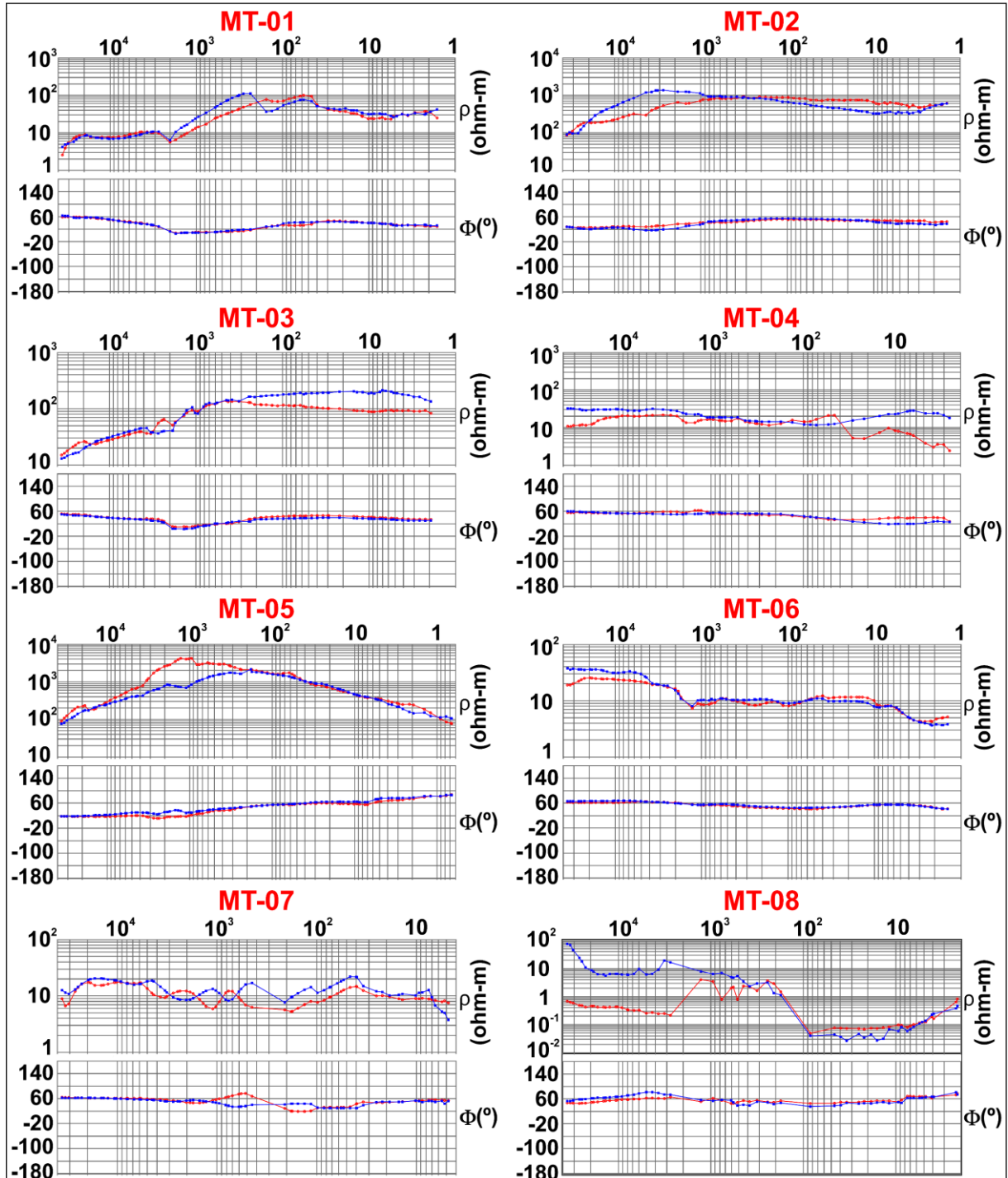
A análise da tabela acima é extremamente importante, pois fornecerá um suporte para se obter um prognóstico das características geolétricas da área de estudo. Além de ser útil na elaboração do bloco inicial para gerar os resultados de saída do levantamento MT.

Os valores mais baixos foram observados nas estações MT01 e MT08, local com grande ocorrência de rochas sedimentares (coberturas cenozoicas e bacia de São Luís) e próximo ao mar (condutivo).

Enquanto que os valores elevados, foram observados nas estações MT12, MT13, MT14 e MT15, região com afloramento de rochas ígneas e metamórficas pertencentes aos domínios fragmento cratônico São Luís e a faixa móvel Gurupi (resistivos).

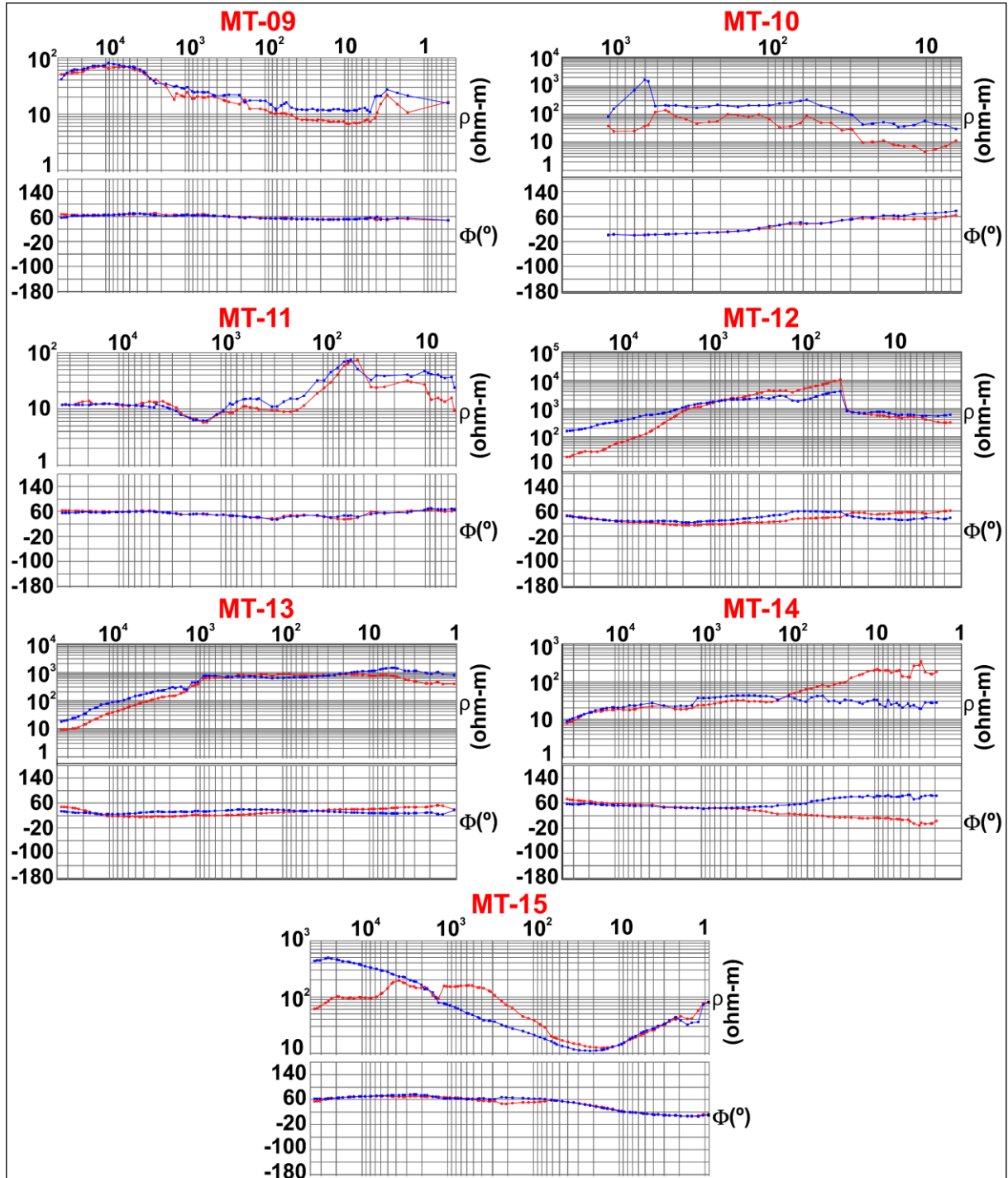
Das 15 estações MT foram gerados 15 tensores de impedância que são apresentados na Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Tensores de impedância das estações MT01 à MT08 exibindo as curvas de resistividade (porção superior do gráfico) e fase (porção inferior do gráfico). As curvas vermelhas e azuis representam, respectivamente, as componentes XY (TE) e YX (TM) do tensor de impedância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Tensores de impedância das estações MT09 à MT15 exibindo as curvas de resistividade (porção superior do gráfico) e fase (porção inferior do gráfico). As curvas vermelhas e azuis representam, respectivamente, as componentes XY (TE) e YX (TM) do tensor de impedância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

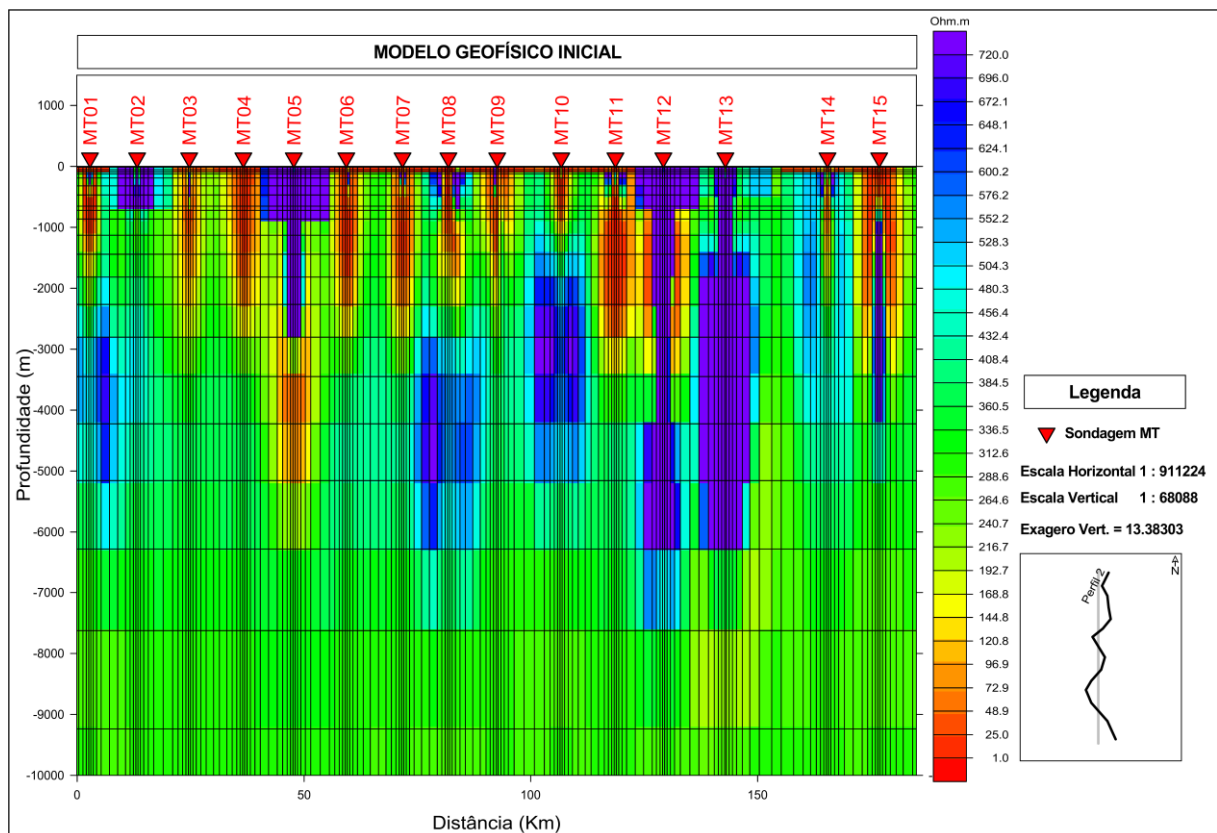
3.4 Produtos de Saída

Os valores das frequências e resistividade aparente alcançados pelas funções de transferência, mostrados na tabela 2 e Figuras 8 e 9, forneceram um suporte para elaboração de produtos geofísicos para a caracterização geolétrica de subsuperfície.

Foram gerados três modelos geofísicos de subsuperfície através de *softwares* e algoritmos: o modelo geofísico inicial (*forward geophysical modeling*) da área de estudo e as pseudoseções de resistividade aparente e fase dos modos TE e TM para análise geolétrica da área

As figuras 19, 20 e 21 mostram os resultados dos produtos geofísicos MT de saída.

Figura 19 – Modelo geofísico inicial do perfil MT da área de estudo. A escala de cores mostra variações da resistividade aparente onde tons azuis e vermelhos indicam, respectivamente, porções resistivas e condutivas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

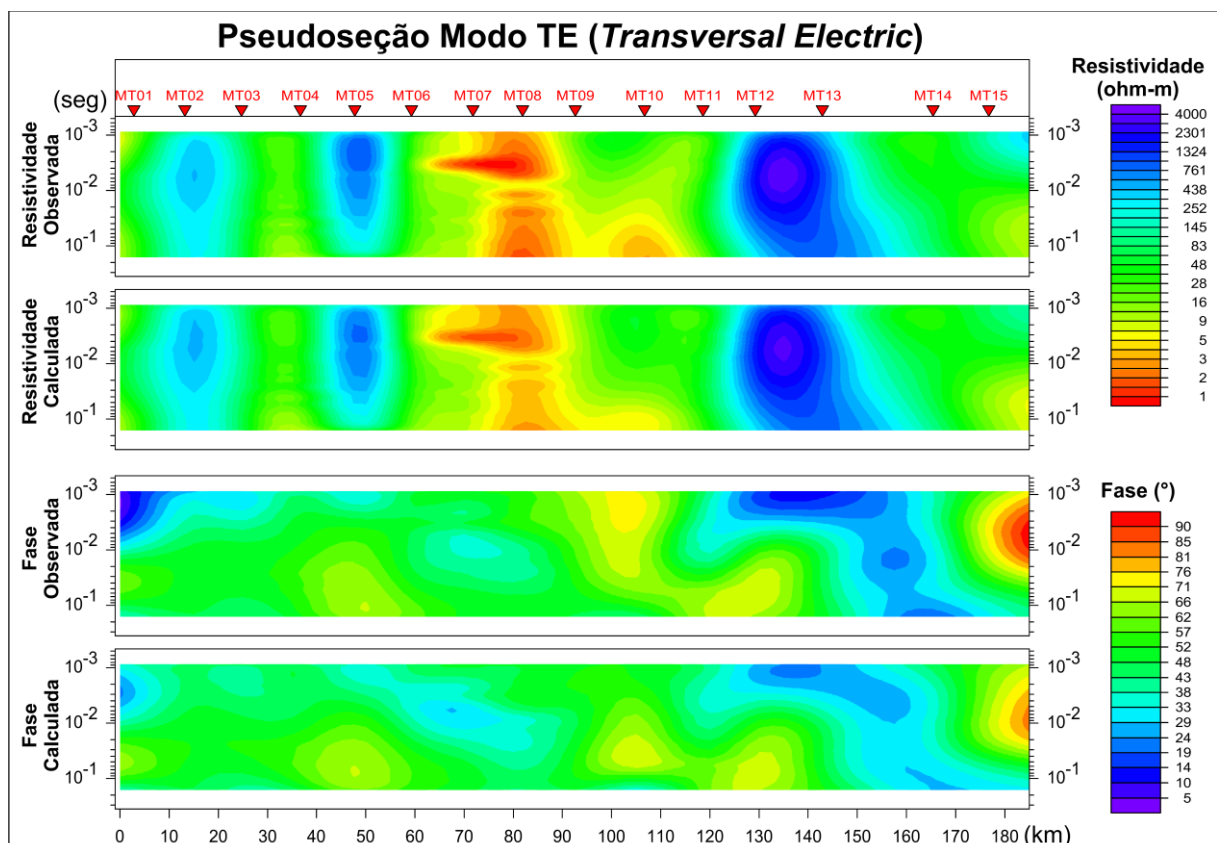
Através do modelo geofísico inicial é possível ter as primeiras impressões das características geofísicas da área investigada em termos qualitativos, ou seja, exibe um preâmbulo das características internas da crosta.

As porções superficiais condutivas (tons vermelhos) até uma profundidade de 2 km foram interpretadas como sedimentos e rochas sedimentares Fanerozoicas (bacias São Luís, Parnaíba e coberturas cenozoicas).

Uma faixa altamente resistiva (tons azuis e roxo) em torno das estações MT12 e MT13 representam as rochas das unidades da faixa móvel Gurupi.

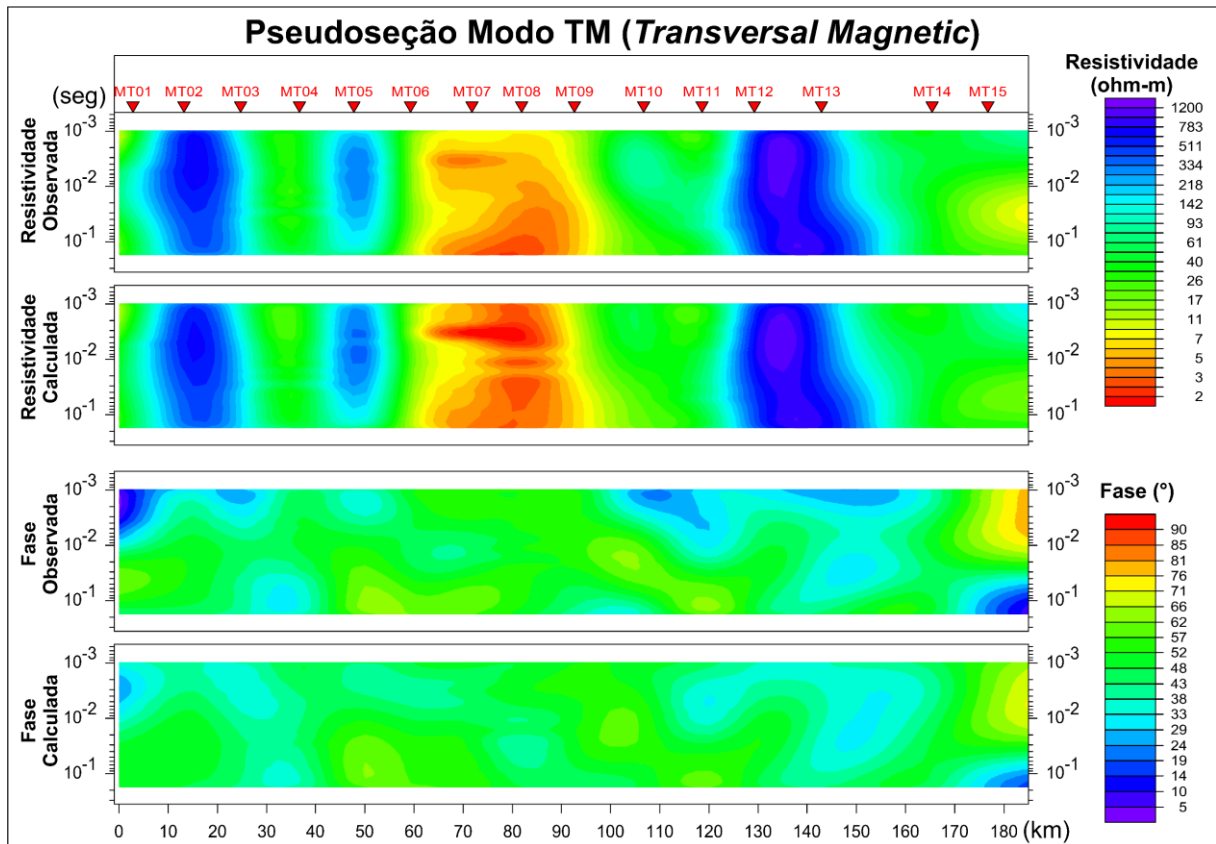
Resistividades medianas (tons verdes) ao longo do perfil MT são interpretados como as rochas do fragmento cratônico São Luís que está sotoposto às unidades sedimentares Fanerozoicas.

Figura 20 – Modo TE mostrando as pseudoseções observadas e calculadas para as resistividades e fases.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Modo TM mostrando as pseudoseções observadas e calculadas para as resistividades e fases.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As pseudoseções dos modos TE e TM apresentaram uma boa compatibilidade entre os dados observados e calculados. Esses resultados corroboram a qualidade dos processamentos após a remoção dos sinais ruidosos, caso contrário, não haveria verossimilhança entre a resistividade (ou fase) observada e calculada.

Em ambos os modos (TE e TM) se observa na pseudoseção de resistividade aparente três porções resistivas em torno das sondagens MT02, MT05, MT12 e MT13, atribuídas ao fragmento cratônico São Luís e faixa móvel Gurupi.

Uma porção condutiva entre as estações MT07 e MT08 é colocada como rochas sedimentares da bacia de São Luís.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta um guia elucidativo para aquisição de dados geofísicos magnetotelúricos, baseado no estudo de caso de um levantamento realizado na área onde abrange o fragmento cratônico São Luís, nordeste do Brasil, com o propósito de realizar a divulgação científica e contribuir com a formação de novas equipes em levantamentos MT.

São apresentadas as principais etapas de uma campanha MT, listadas no manuscrito como: instrumentação de campo e laboratório, coleta dos dados em campo, processamento para redução de ruídos das séries temporais, cálculo das funções de transferências (tensores de impedâncias) e elaboração de produtos geofísicos MT.

Os dados MT foram coletados através de um SADMT (*ADU-07e*), duas bobinas de indução, quatro eletrodos de PbCl e duas baterias automotivas. 15 estações MT com uma equidistância de 12 km foram adquiridas e um comprimento de perfil de 180 km. Durante a coleta evitou-se locais com muita rede elétrica e/ou outras fontes de ruídos.

Todas as frequências de cada sondagem MT foram submetidas ao filtro Notch FIR para subtração da contribuição da rede elétrica local (60 Hz e harmônicas). Uma segunda filtragem foi realizada de forma manual nas estações em que se apresentou uma maior incidência de ruídos, como nas estações MT07, MT08 e MT10.

Os tensores de impedâncias (Z) foram calculados e convertidos para o domínio da frequência através da FFT.

Foram gerados 15 tensores de impedâncias que pode ser visualizado em resistividade aparente (ρ) e fase (Φ). Os valores de resistividade tiveram uma variação de 0,027 (condutivo) (MT08) a 10.530 (resistivo) (MT12) ohm-m.

Através dos tensores de impedâncias foram gerados três produtos geofísicos MT de saída para um prognóstico das características geoeletricas de subsuperfície da área de estudo, foram eles: modelo geofísico inicial, pseudoseção modo TE e pseudoseção modo TM.

O modelo geofísico inicial apresentou porções condutivas superficiais (~2 km), representando os sedimentos e rochas sedimentares Fanerozoicas, uma faixa resistiva próximos às estações MT12 e MT13 (rochas da faixa Gurupi) e resistividades medianas interpretadas como as rochas do fragmento cratônico São Luís.

As pseudoseções TE e TM corroboram a qualidade dos processamentos, pois apresentam uma boa equivalência entre os dados observados e calculados. Fica bem marcado no imageamento de resistividade, três regiões resistivas representando as rochas cristalinas (cráton e faixa Gurupi) da área e uma região condutiva central representando as rochas da bacia de São Luís.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao INCT pelos recursos disponibilizados para a aquisição dos dados, ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) – UFC pelos equipamentos e apoio na etapa de processamento dos dados e aos revisores do Anuário do Igeo – UFRJ pela indispensável contribuição realizada ao manuscrito por meio de alto critério qualitativo.

6 REFERENCIAS

- Borah, U.K.; Prasanta, K.P. & Vaddeboina, S. 2015. Processing of noisy magnetotelluric time series from Koyna-Warna seismic region, India: a systematic approach. *Annals of Geophysics*, 58(2): 1-17.
- Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical. *Prospecting Geophysics*, 18(3): 605-635.
- Chave, A.D. & Jones, A.G. 2012. *The magnetotelluric method: theory and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 603p.
- CPRM, 2012. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão. Organizadores, Evandro Luiz Klein, Cristiane Silva de Sousa. Escala 1:750.000. Belém: *Serviço Geológico do Brasil*, 151p.
- Egbert, G.D. 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. *Geophys. J. Int.*, 130: 475-496.
- Daly, M.C.; Fuck, R.A.; Julià, J.; Macdonald, D.I.M. & Watts, A.B. 2018. Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil. *Geological society of London*. 472: 1-15.

- Fontes, S.L.; Harinarayana, T.; Dawes, G.J.K. & Hutton, V.R.S. 1988. Processing of noisy magnetotelluric data using digital filters and additional data selection criteria. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 52: 30-40.
- Gamble, T.D.; Goubau, W.M. & Clarke, J. 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 44: 53-68.
- Kao, D. & Rankin, D. 1977. Enhancement of Signal-to-Noise Ratio in Magnetotelluric Data *Geophysics*, 42: 103-110.
- Nagata, H.; Mikada, H.; Goto, T.N.; Takekawa, J. & Kasaya, T. 2012. Data processing of magnetotelluric survey data in time domain using digital filter - An Example at the Nankai trough. *In: 21st EM INDUCTION WORKSHOP, Darwin, 1992. Extended Abstract, Darwin, p. 1-4.*
- Santos, A.C.L. 2012. *Imageamento magnetotelúrico de estruturas da litosfera na porção SE da Província Borborema*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 160p.
- Simpson, F. & Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University, Press Cambridge, 270p.
- Tikhonov, A.N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, USSR. *Doklady Akademii Nauk*, 73(2): 395-297.
- Vozoff, K. (1991). The magnetotelluric method. *In Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2, Applications*, ed. M. N. Nabighian. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 641–711.

4.2 Magnetotelluric transect across the são luís cratonic fragment, the gurupi belt and the parnaíba basin, N-NE Brazil

Elenilton Bezerra Uchoa¹; Nilton Cesar Vieira Silva²; Christiano Magini³; Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco²; Reinhardt Adolfo Fuck⁴; Fabiano Mota da Silva²; Jackson Alves Martins² & Charles Régis Maia e Silva²

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Campus Sobral, Av. Dr. Guarani 317, Derby Clube, 62040-730, Sobral, CE, Brasil t

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, LGPSR, Campus do Pici, Bela Vista, 60440-554, Fortaleza, CE, Brasil

³Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Campus do Pici, Bela Vista, 60440-554, Fortaleza, CE, Brasil

³Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Campus Universitário, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

E-mails: elenilton.uchoa@ifce.edu.br; niltoncv@gmail.com;
magini2005@hotmail.com; mariano@ufc.br; reinhardt@unb.br;
fabianogeologia@yahoo.com.br; jackson_geologia@yahoo.com.br &
charles_rms@yahoo.com.br

Etapas da submissão do manuscrito:

Submetido: 15/06/2020 (Journal of South American Earth Sciences – ISSN: 0895-9811). (Vide apêndice G)

Status: Submissions Being Processed

RESUMO

A área de estudo localiza-se na região N-NE do Brasil onde ocorrem as rochas Pré-cambrianas do fragmento Cratônico São Luís e Faixa Gurupi, recobertos pelos sedimentos Fanerozoicos das bacias do Parnaíba e São Luís. O objetivo do presente trabalho consiste em elaborar um transecto geofísico MT com direção NNW-SSE e 180 km de comprimento, visando identificar as características geoeletricas dos domínios geotectônicos da área, além de sugerir correlações entre as placas sul-americana (cráton SL) e africana (cráton Oeste Africano). O método MT (magnetotelúrico), empregado neste trabalho, consiste numa técnica geofísica que utiliza as variações naturais dos campos elétrico e magnético terrestre para investigar as características geoeletricas do subsolo. Através do levantamento MT, cálculo dos tensores de impedâncias e inversão, foi elaborado um transecto geofísico e um modelo geológico interpretativo de muita relevância para a área de estudo. A seção geofísica TE+TM apresentou porções condutivas superficiais (bacias Parnaíba, São Luís e coberturas sedimentares), resistivas (cráton São Luís) e muito resistivas (faixa móvel Gurupi). O modelo geológico interpretado contribuiu na busca de exercícios de correlações entre os cratons SL e OA, como pode ser observado nas rochas da faixa Gurupi (Brasil) que são correlatas as da faixa Rokelide (Liberia-África), embora sejam necessários pesquisas geofísicas similares no lado africano também. Estes cinturões fazem parte do ponto tríplice da tafrogênese do supercontinente Rodínia. O presente trabalho apresentou uma investigação geofísica inédita ao longo do cráton SL e faixa Gurupi, possibilitando no reconhecimento das camadas internas dos domínios tectônicos da área, bem como exercícios de correlação entre o lado brasileiro e africano através das faixas Gurupi e Rokelide.

Palavras-chave: Magnetotelúrico, Cráton São Luís, Lineamentos

ABSTRACT

The study area is located in the N-NE region of Brazil where Precambrian rocks of the São Luís Cratonic Fragment and the Gurupi belt are overlain by Phanerozoic sediments of the Parnaíba and São Luís basins, making the assessment of the extents of these geotectonic domains difficult. One of the main objectives of the present study was to elaborate a NNW-SSE-trending, 180-km long magnetotelluric transect, aiming to identify the geotectonic domains of the study area by means of their geoelectric characteristics. The magnetotelluric (MT) technique is a geophysical method that detects the natural variations of the terrestrial electric and magnetic fields so as to investigate the geoelectric characteristics of the subsurface. By means of a MT survey for field data acquisition, calculation of impedance tensors and 2D inversion modeling, the geophysical transect and additionally an interpretive geological model were elaborated for the study area. The combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) geophysical model revealed superficial conductive (Parnaíba and São Luís basins and sedimentary coverings), resistive (São Luís Cratonic Fragment) and very resistive (Gurupi mobile belt) portions up to depths of the order of 15 km. These results attested for correlations between the São Luís Craton (South American Plate) and the West African Craton (African Plate), especially regarding the Gurupi Belt (in Brazil) and the Rokelide Belt (in Liberia-Africa), which are considered to be the boundaries of a triple junction related to the supercontinent Rodinia taphrogenesis. Besides presenting an unprecedented geophysical investigation along the São Luís Cratonic Fragment and the Gurupi Belt, this study promotes the discussion on the correlations between the Brazilian Gurupi and the African Rokelide belts for metallogenetic purposes.

Keywords: Magnetotellurics, São Luís Cratonic Fragment, Lineaments

1.0 INTRODUCTION

The São Luís Cratonic Fragment is located in the N-NE region of Brazil, in the State of Maranhão. The geological limits of this cratonic fragment, which is composed of Archean and Paleoproterozoic units, are poorly defined due to the scarcity of outcrops, once Phanerozoic sedimentary deposits (the Parnaíba and São Luís basins and Cenozoic deposits), cover the Precambrian rocks and structures. The Neoproterozoic Gurupi Belt marks the limit between the cratonic fragment and the Parnaíba Basin. It developed after the break-up of the Rodinia supercontinent (1.0 Ga) and underwent reactivations in the Phanerozoic via preexisting shear zones (Almeida *et al.*, 2000; Klein *et al.*, 2005a, b; Vasques & Rosa Costa, 2008; CPRM, 2012).

In order to better define the extent of the São Luís Cratonic Fragment and the Gurupi Belt in subsurface, the contacts between the Phanerozoic basins and the Precambrian rocks, and the thickness of the overlying Phanerozoic sedimentary deposits, one of the goals of this study was to elaborate a NNW-SSE-trending, 180-km long geophysical transect applying the magnetotelluric technique.

The magnetotelluric (MT) technique is a passive geophysical investigation method that detects the natural variations of the terrestrial electric and magnetic fields to identify the geoelectric characteristics of the Earth's interior (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012). Magnetotelluric surveys have been commonly used in several geological contexts such as sedimentary basins, suture zones and cratonic regions (Porsani & Fontes, 2001; Naganjaneyulu & Santosh, 2011; Naganjaneyulu *et al.*, 2013; Solon *et al.*, 2018). For example, Daly *et al.* (2018) carried out an integrated basin analysis of the Parnaíba Basin, using deep-crustal geophysical dataset, including a E-W-trending MT transect, to determine the deep structure of the basin and the underlying crust and mantle.

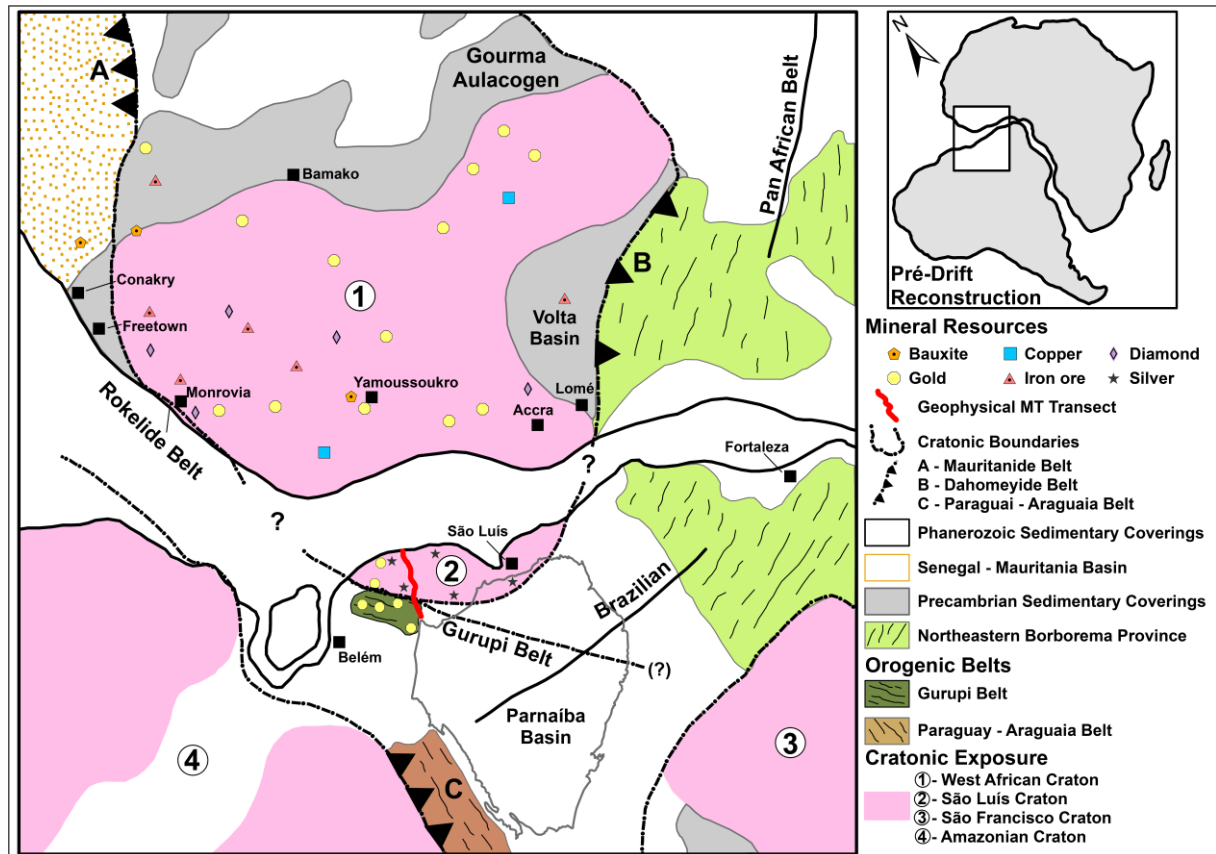
Porsani & Fontes (2001) also emphasize that the MT technique is quite effective in regional geological studies, and identification of conductive/resistive sites and geoelectric basement, not to mention its low cost, when compared to seismic methods. Furthermore, geophysical investigations as a whole have greatly contributed to correlation studies, such as those regarding the São Luís Cratonic Fragment and the West African Craton (Lesquer *et al.*, 1984; Brito Neves *et al.*, 2001).

In addition to the main objectives of this study, it also aims to train and qualify teams in the collection and modeling of numerical data for geological studies of the Earth’s subsurface.

2.0 GEOLOGICAL AND TECTONIC SETTINGS

The pre-drift reconstruction of northeastern Brazil and northwestern Africa is extremely important for the understanding of Gondwanaland’s evolution (Fig. 22). Such attempt encourages the publication of new studies, as a follow-up to the International Geological Correlation Programs (IGCPs) (Brito Neves *et al.*, 2001).

Figura 22 – Pre-drift reconstruction of the northeastern Brazil and northwestern Africa, highlighting the São Luís and West Africa cratons and the surrounding structures

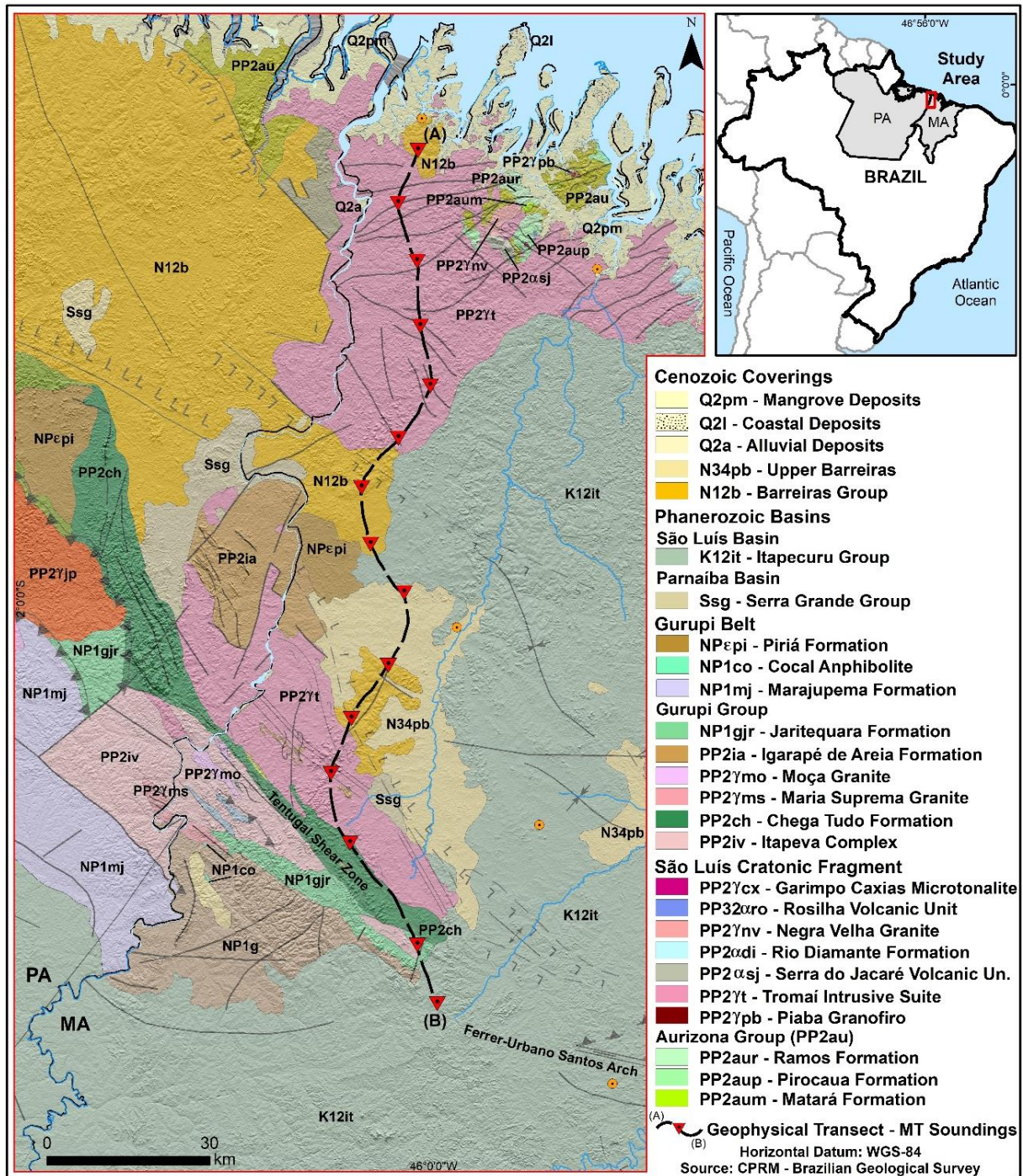


Source: (Lesquer *et al.*, 1984; Villeneuve & Cornée, 1994; Brito Neves *et al.*, 2001; CPRM, 2012; Markwitz *et al.*, 2016).

The study area is located in the Parnaíba Province, northeastern part of the South American Platform (Fig. 23), and includes geological units that are chronologically distributed in the Precambrian-Cenozoic interval: i) the São Luís

Cratonic Fragment; ii) the Gurupi Belt; iii) Phanerozoic sedimentary basins, and iv) Cenozoic deposits (Almeida *et al.*, 1976; Hasui *et al.*, 1984; Almeida *et al.*, 2000; CPRM, 2012).

Figura 23 – Location and geological map of the study area with the indication of the MT transect.



Source: (CPRM, 2012).

2.1 The São Luís Cratonic Fragment

The São Luís Cratonic Fragment comprises the oldest rocks of the study area. This Precambrian terrain makes up only 2% of the State of Maranhão, cropping out in its north-western most part. Most of the cratonic fragment is covered by Phanerozoic sedimentary rocks and sediments (CPRM, 2012).

The term São Luís Cratonic Fragment is adopted here as proposed by Vasques & Rosa Costa (2008), who pointed out that this fragment is only a small portion of a larger cratonic area, the West African Craton, which separated from South America in the Mesozoic era.

The ages of the rocks from the cratonic fragment range from Archean to Paleoproterozoic (Klein *et al.*, 2005b). The main lithotypes are metavolcanosedimentary and metavolcanic rocks, and pre-, syn- and post-collisional granitoids (Figs. 3A and 3B) (CPRM, 2012).

The units in chronological order are: the Aurizona Group, the Piaba Granophyre, the Tromaí Intrusive Suite, the Rosário Intrusive Suite, the Serra do Jacaré Volcanic Unit, the Rio Diamante Formation, the Negra Velha Granite, the Rosilha Volcanic Unit, the Garimpo Caxias Microtonalite, and the Igarapé de Areia Formation.

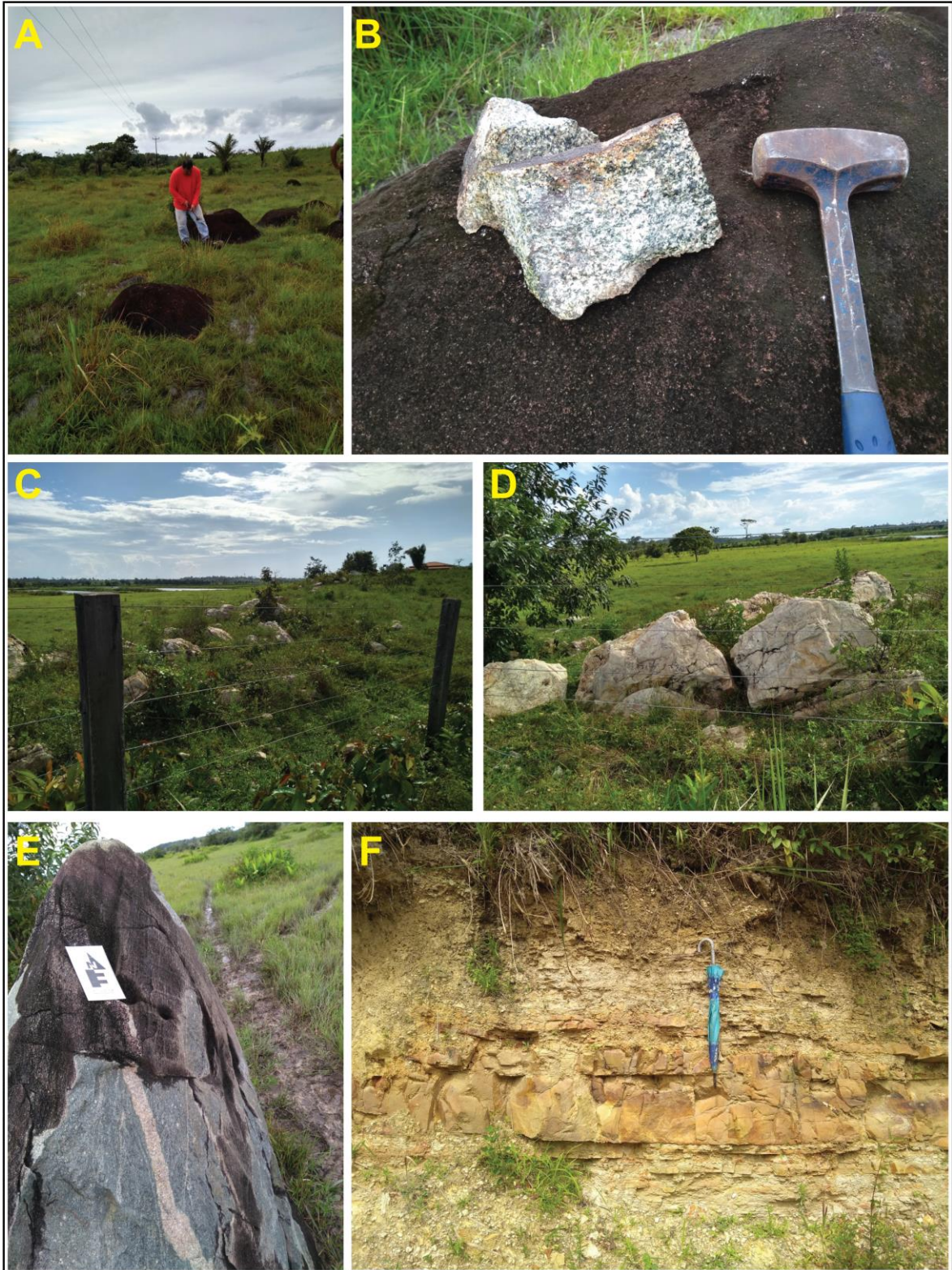
2.2 The Gurupi Belt

The NW-SE-trending (Fig. 3D), 160-km long Gurupi Belt is a Neoproterozoic orogen and extends to the State of Pará. Its contact with the São Luís Cratonic Fragment is via the Tentugal Shear Zone, which is treated as a geochronological boundary by several authors (Almeida *et al.*, 1976; Hasui *et al.*, 1984; Costa, 2000; Klein *et al.*, 2005a).

The lithological associations that compose the belt include metasedimentary and metavolcanic rocks (Fig. 3E) and granitoids, with ages from the Archean to the Neoproterozoic (Klein *et al.*, 2005a; Klein & Lopes, 2009).

The units in chronological order are: the Itapeva Complex, the Chega Tudo Formation, the Maria Suprema Granite, the Moça Granite, the Igarapé de Areia Formation, the Gurupi Group, the Marajupema Formation, the Cocal Amphibolite, and the Piriá Formation.

Figura 24 – Outcrops observed along the MT transect. A) and B) Granitoids from São Luís Cratonic Fragment. C) and D) NW-SE-trending (310° Az) quartz vein associated with the Gurupi units. E) Metavolcanic rocks from the Gurupi Belt. F) Sandstones from the Parnaíba Basin.



Source: by the author.

2.3 The Phanerozoic Basins

The Phanerozoic basins of the State of Maranhão formed during the evolutionary stages of the South American Platform, which started with the Brasiliano/Pan-African event in the Neoproterozoic-Cambrian (Almeida, 1969; Almeida *et al.*, 2000).

The study area encompasses the intracratonic Paleozoic Parnaíba Basin (Fig. 3F), the Cretaceous São Luís Basin, which represents an estuarine, graben-type valley incised in the São Luís Cratonic Fragment, and superficial Cenozoic coverings (Rossetti & Truckenbrodt, 1997; Rossetti, 2000; CPRM, 2012).

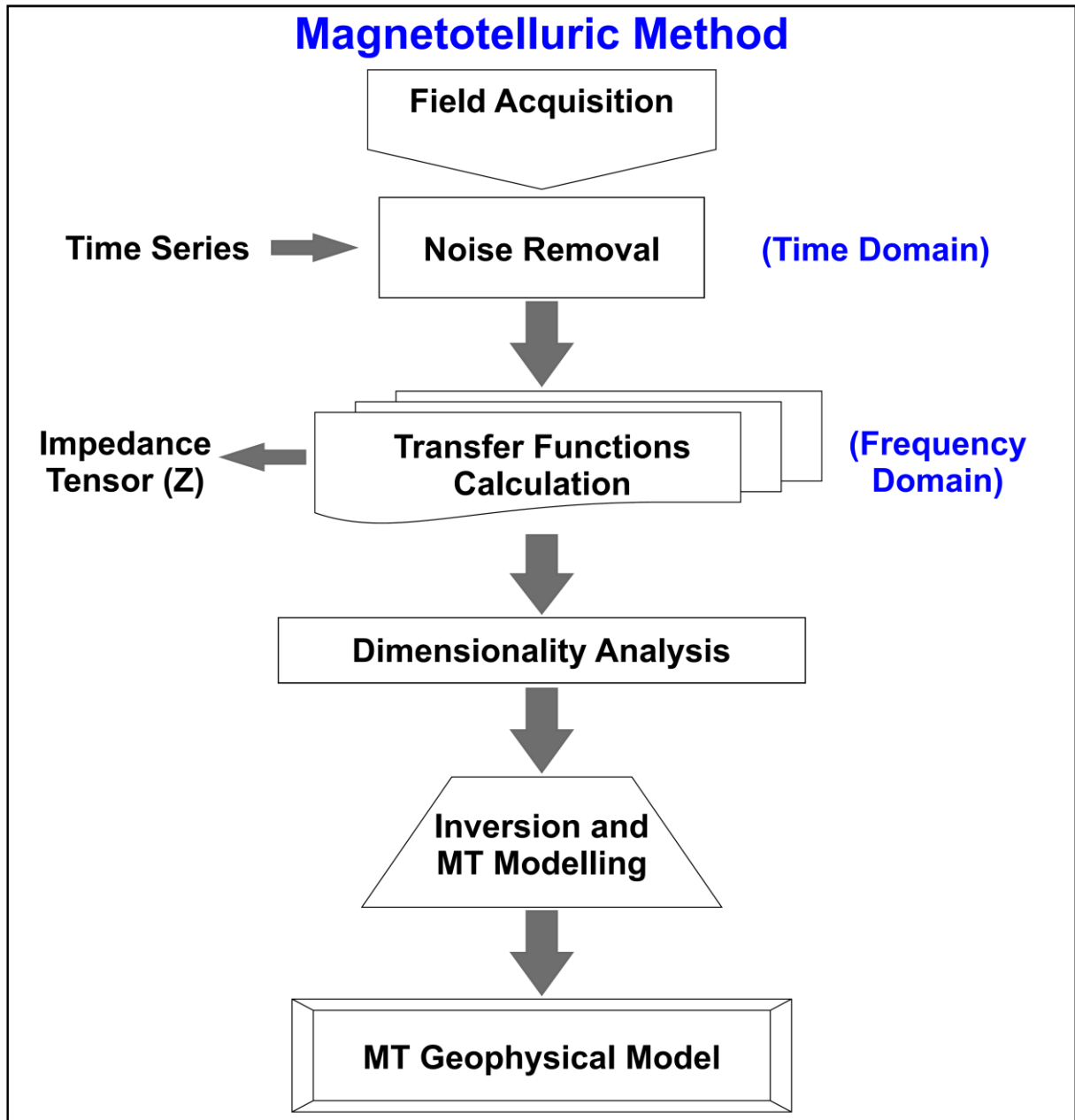
3.0 THE MAGNETOTELLURIC TECHNIQUE

The magnetotelluric (MT) technique is an electromagnetic geophysical method and was initially proposed by Tikhonov (1950) and Cagniard (1953).

Natural variations of the Earth's electric and magnetic fields are detected in order to acquire the resistivities/conductivities (impedances) of the geological environment in subsurface. By means of these parameters, it is possible to distinguish the main differences between the physical and chemical characteristics present in subsurface (Santos, 2012).

The main steps of the MT technique are: field data acquisition, noise removal, calculations by means of transfer functions, dimensionality analysis, inversion and MT modeling (Figure 25).

Figura 25 – Flowchart showing the steps of the MT technique.



Source: by the author.

The MT survey started in May 2018 with the installation of 15 MT stations (labeled MT01 to MT15) in the study area. The distance between the stations was approximately 12 km. The MT array adopted in this study was the one proposed by Simpsom & Bahr (2005) and the equipment used was the Metronix analog/digital signal conditioning unit ADU-07e, PbCl electrometers and induction coils. At the end of the data acquisition, a time-series was obtained. Further information about MT field data acquisition can be found in Uchoa *et al.* (in press).

Noise removal from the time-series was performed using Notch filter. The transformation of a time-series into a frequency domain by Fast Fourier Transform (FFT) makes the calculation of MT transfer functions or impedance tensors (Z) possible.

Geoelectric dimensionality is understood as the distribution of resistivities/conductivities in subsurface and can assume 1D, 2D and/or 3D characteristics. This procedure is essential in selecting the inversion modeling to be applied, conferring reliability to the geophysical model and interpretation (Martí *et al.*, 2009).

The product of the inversion is the MT model, which allows differencing the characteristics of the subsurface by means of electrical resistivity contrasts (Simpson & Bahr, 2005).

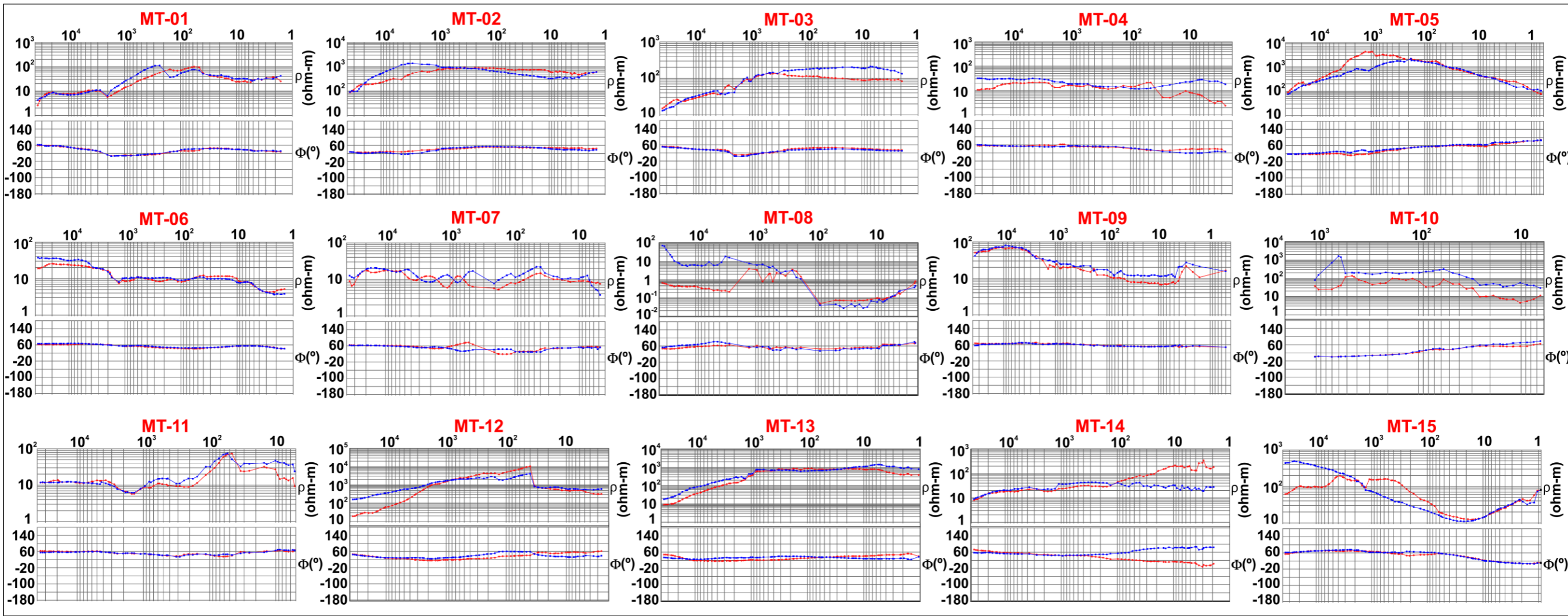
4.0 RESULTS

4.1 Geomagnetic Transfer Functions

The impedance tensor (Z) is equivalent to the ratio between the orthogonal components of electric (TE) and magnetic (TM) fields and is expressed by the parameters apparent resistivity (ρ_a) and phase (Φ) (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012).

Figure 26 lists the impedance tensors calculated for each of the fifteen MT soundings (Uchoa *et al.*, in press).

Figura 26 – Impedance tensors calculated for each of the fifteen MT soundings. The top and bottom curves represent the apparent resistivity (ohm-m) and phase (degrees), respectively. Red and blue curves represent, respectively, Transversal Electric (TE) and Transversal Magnetic (TM) components of the impedance tensor.

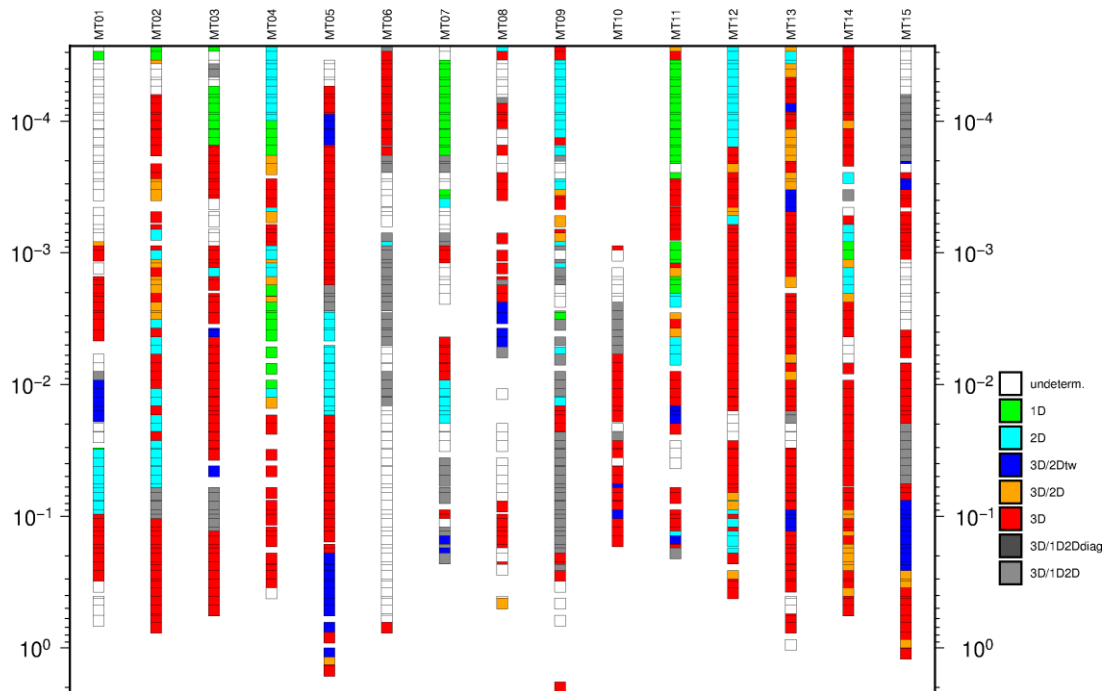


Source: (Uchoa *et al.*, in press).

4.2 Dimensionality Analysis

The WALDIM code (Martí *et al.*, 2009) was applied to determine the geoelectric dimensionality of the MT data acquired for this study (Fig. 27). For other methods of dimensionality analysis see Bahr (1988), Groom & Bailey (1989), McNeice & Jones (2001), and Cadwel *et al.* (2004).

Figura 27 – Determination of the dimensionality of the MT survey applying the WALDIM code.



Source: (Martí *et al.*, 2009).

4.3 Inversion and Modelling

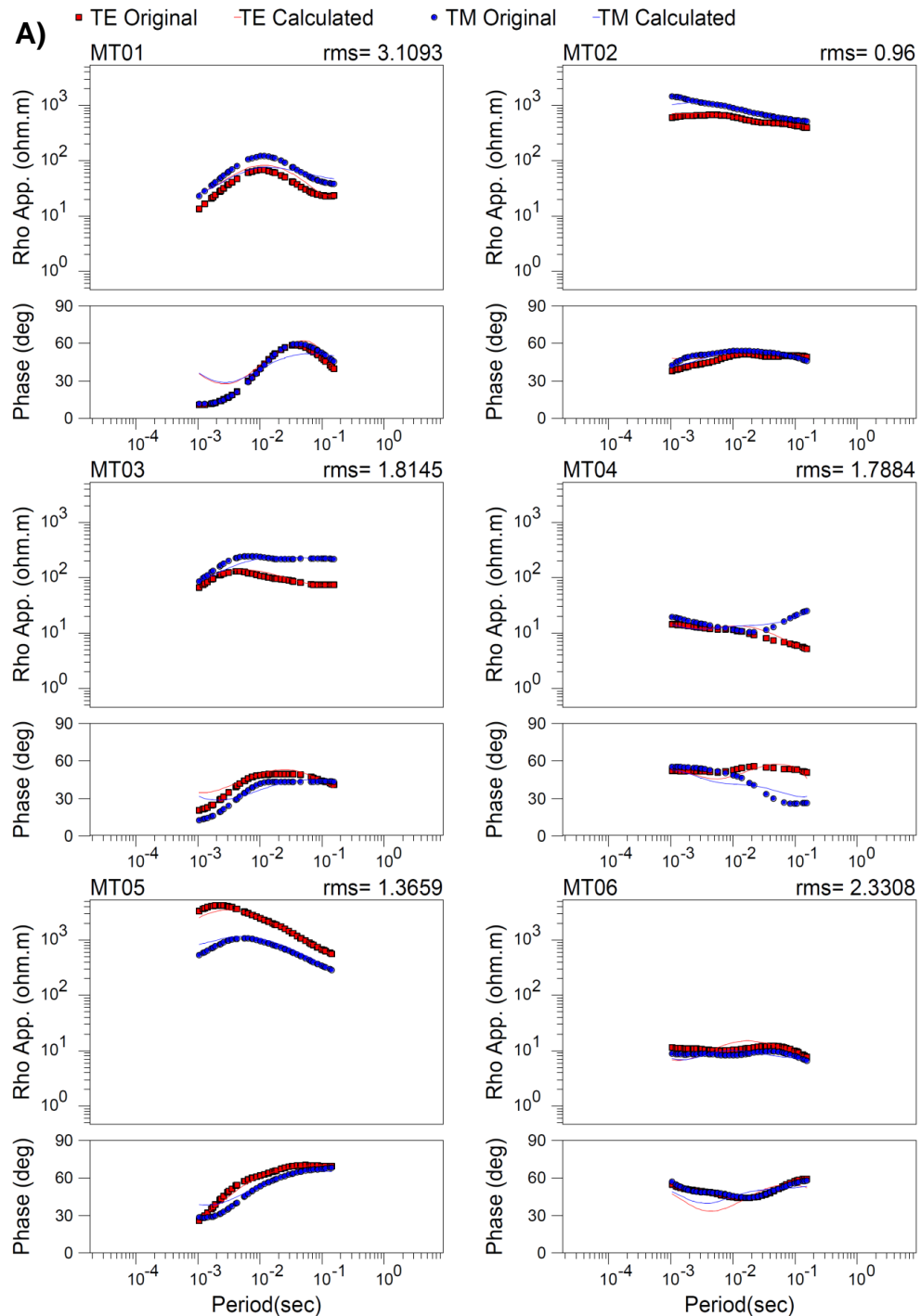
The inversion algorithm used took into account the results of the dimensionality analysis, the influence of the Atlantic Ocean, meshes with different conditions of homogeneous semi-space (e.g 100, 500, 1k Ω .m), lower RMS (*Root Mean Square*) error and better datafit between the observed and calculated data. It was important to consider the influence of ocean, especially around first MT soundings. The value assigned in the initial inversion model was 0.2 ohm-m for the marine water.

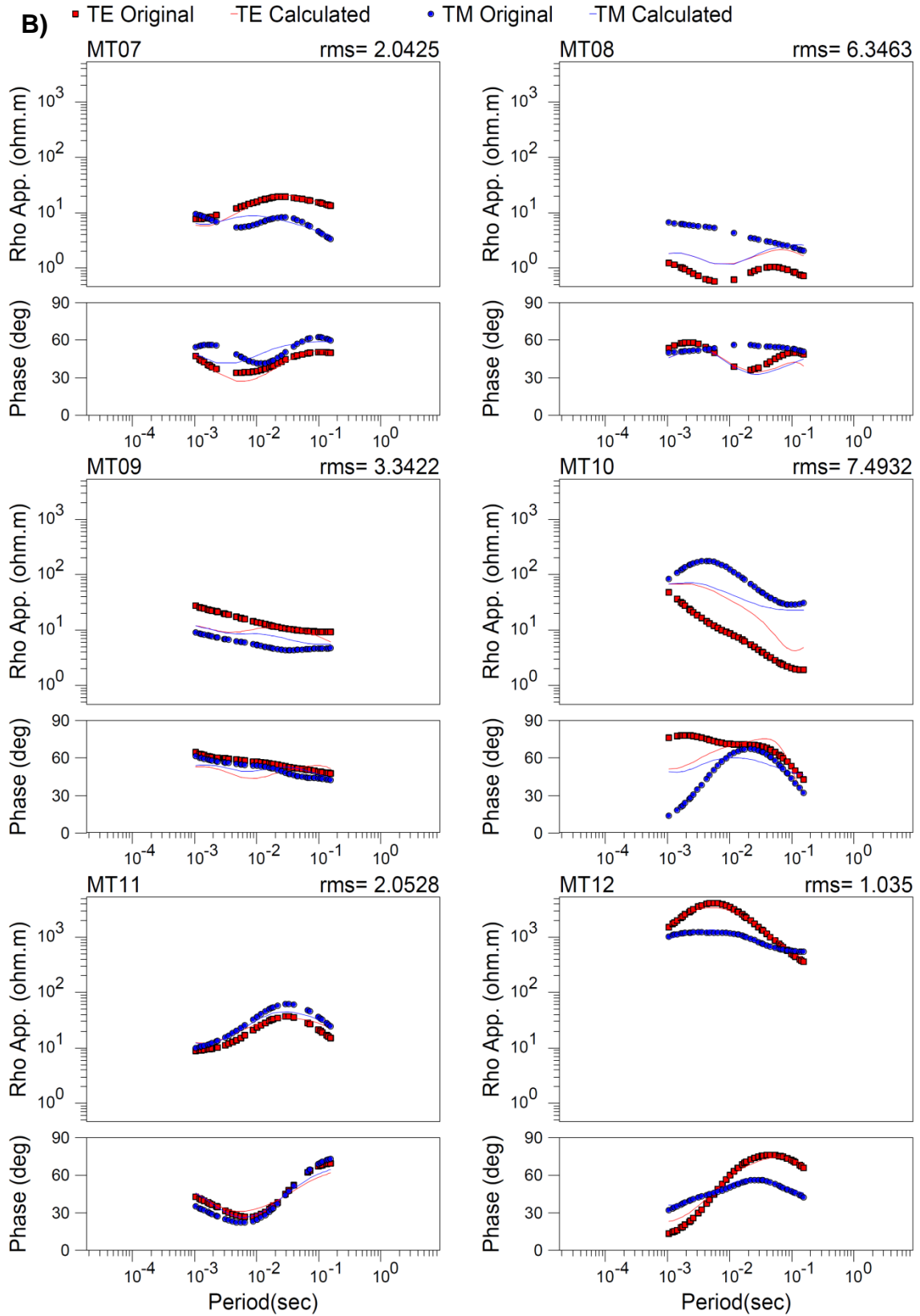
It was used a 2D inversion algorithm with a homogeneous semi-space of 300 ohm-m and 70 interactions. The total final RMS error was 3.08%.

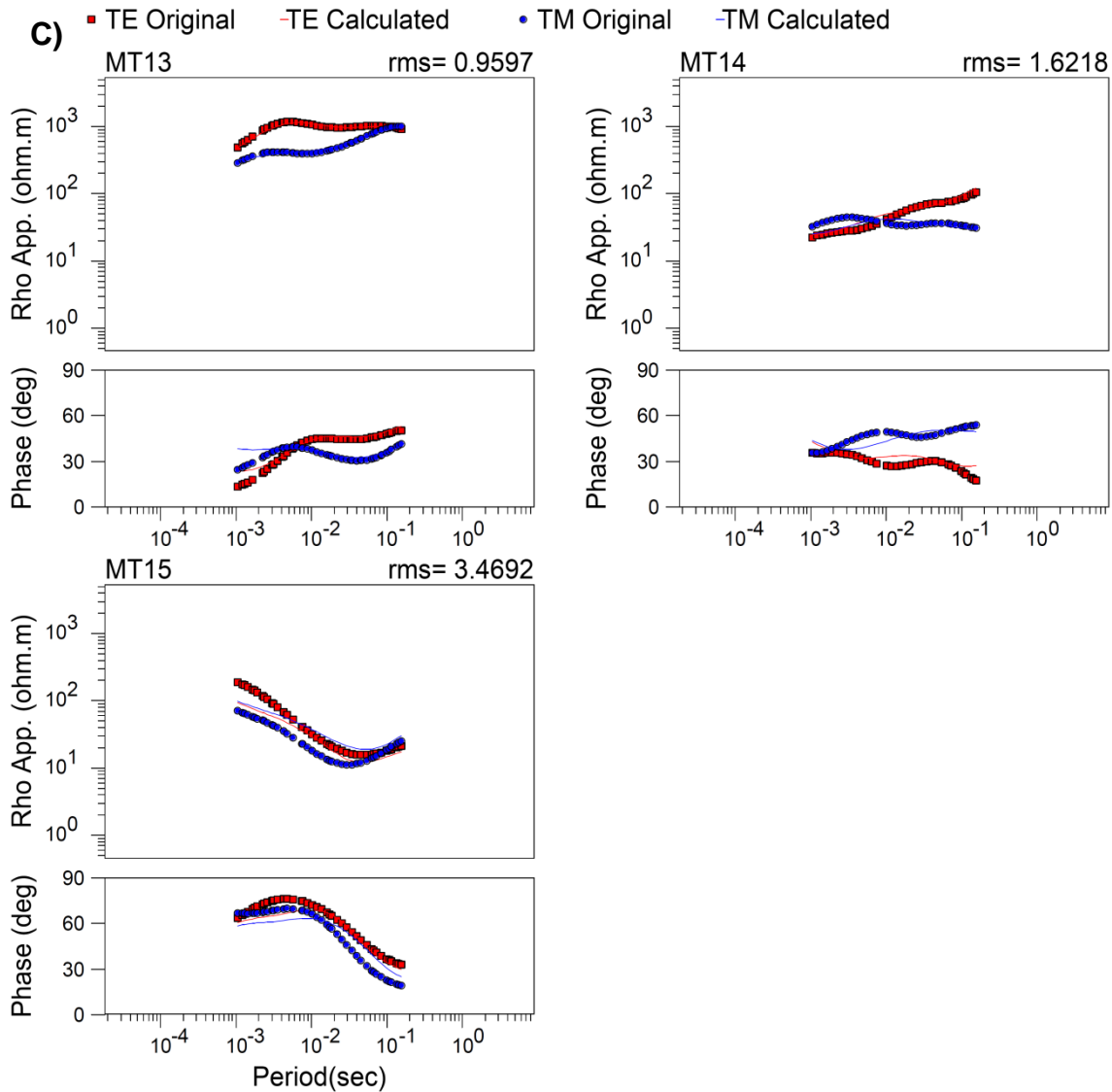
4.4 MT Modeling and Interpretation

After careful analysis of the various models generated and integration with surface geological data, the MT model with the best data fit between observed and calculated data was selected (Fig. 28).

Figura 28 – Adjustment of the calculated curves with the observed data (data fit). A) Stations MT01 to MT06. B) Stations MT07 to MT12. C) Stations MT13 to MT15. Total RMS of 3.08%.







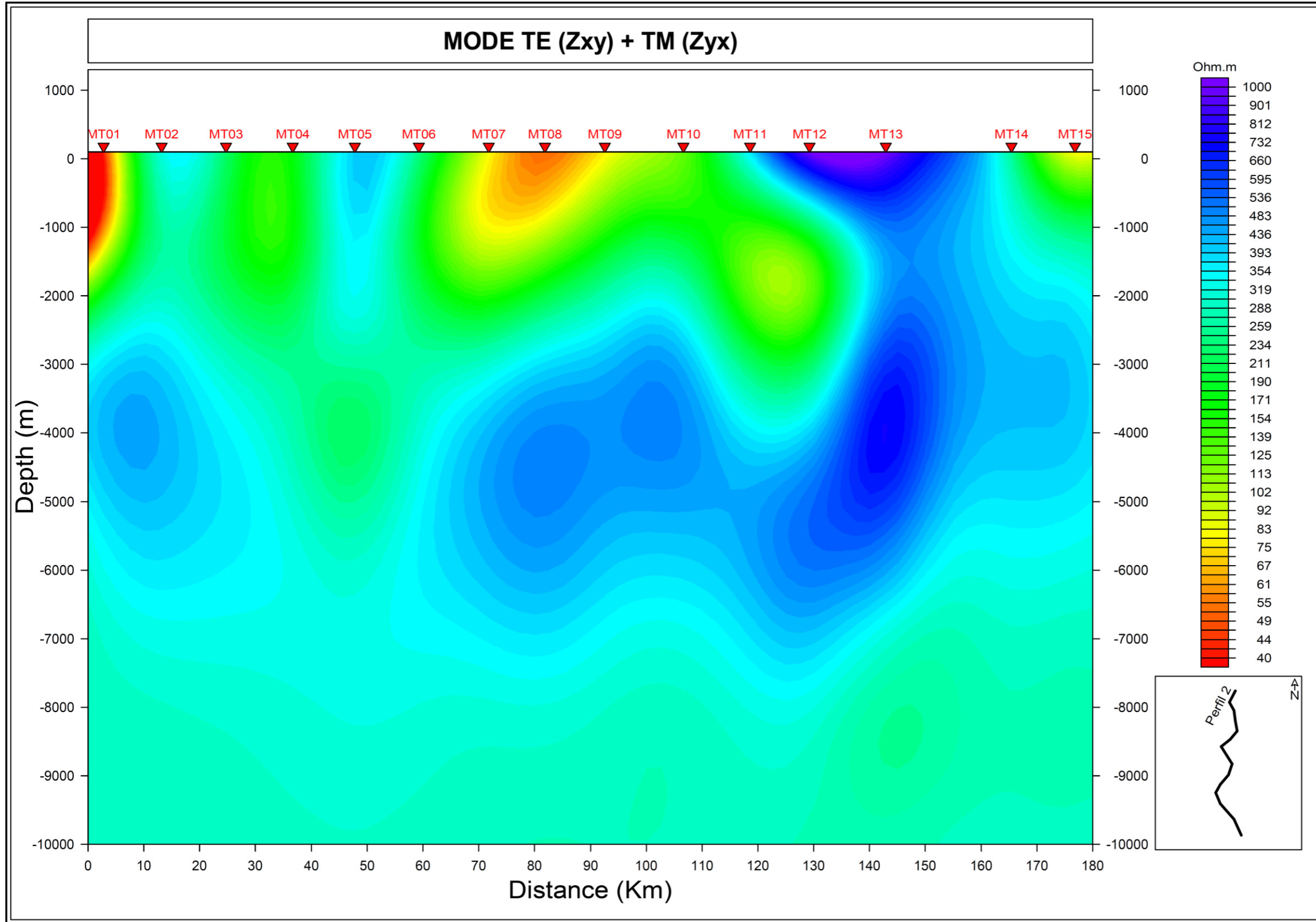
Source: by the author.

It is worth mentioning that prior to the MT modeling the impedance tensors (Z) were rotated, a grid compatible with the observed data was generated, and finally the data were interpolated.

The interpretive geological model was obtained by integrating MT data, surface geological data and previous geological works (Pastana, 1995; Veiga Junior, 2000; CPRM, 2012).

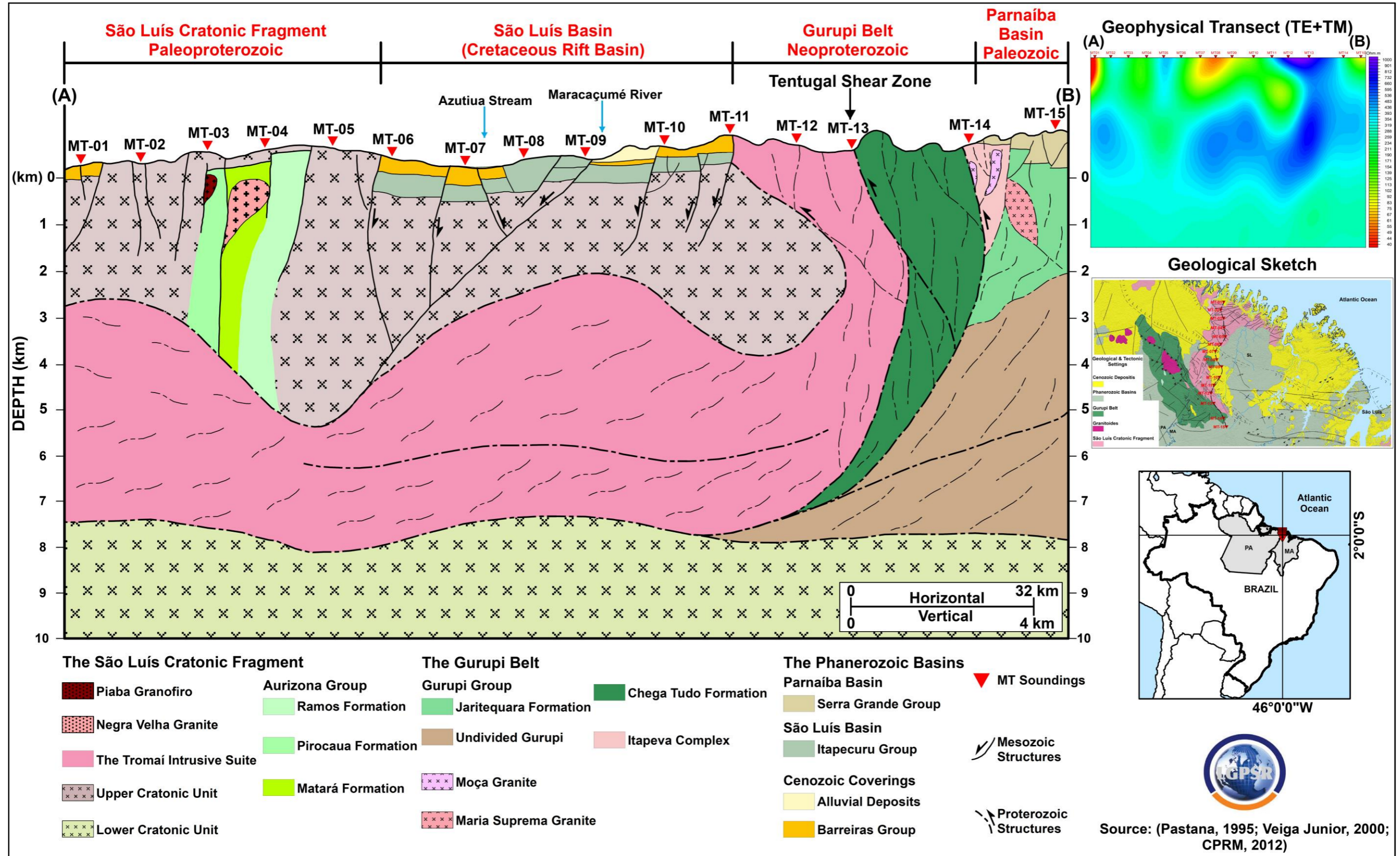
Figures 29 and 30 show, respectively, the combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) geophysical model and the geological interpretation.

Figura 29 – 2D inversion of the combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes for the MT transect.



Source: by the author.

Figura 30 – Interpretative geological model of the study area.



Source: by the author.

5.0 DISCUSSIONS

By means of the acquisition of the time-series, processing and calculation of impedance tensors, dimensionality analysis, inversion and integration of existing geophysical and geological data, it was possible to obtain a regional geological and geophysical transect for the study area, representing a line of 180 km of length and an investigation depth of 10 km.

Fifteen impedance tensors were calculated from the MT soundings. A good linearity and coherence >0.7 (70 %) were obtained, conferring reliability to the MT model. However, the higher noise in the MT07, MT08 and MT10 soundings made it difficult to obtain a smooth and linear curve. The apparent resistivity values (ρ_a) varied from 0.027 to 10.530 ohm.m at stations MT08 and MT12 respectively. Phase (Φ) varied between -15 to 90° at stations MT15 and MT05 respectively. These ample ranges of data result from the different geoelectric characteristics of the subsurface, expressing lithological, structural and geotectonic variations.

The WALDIM code indicated that the dimensionality of the data generally tended towards 3D, with a slight 2D influence. This result is compatible with the geotectonic characteristics of the area, which includes sedimentary basins (2D), cratonic regions (3D), intrusions (3D) and orogens (3D).

The WALDIM code is quite reliable because it makes use of eight invariants, differently from the four used by Bahr (1988; 1991). Galvanic distortion (effects of surface bodies) was not taken into account in this study, because our objective was the characterization of the subsurface. The dimensionality analysis pointed to the use of the 2D inversion of MT data to generate the final geophysical model. It is important to note that the 2D inversion can be used even in situations influenced by 3D environments (Simpson & Bahr, 2005; Santos, 2012).

The errors presented by the data fit curves show that the 2D geophysical model is extremely reliable. Except for the MT08 and MT10 soundings, all other soundings yielded RMS values below 3.48%. High RMS values at these soundings are due to man-induced noises (such as proximity to powerlines, as in Maracaçumé city). Despite the errors at these stations, the final RMS was 3.08%, which we consider very good, allowing analogies with important

MT surveys developed in northeastern Brazil in the last decade (Santos, 2012; Esposito, 2016; Silva, 2018). The adjustment of the curves and the low RMS produced a reliable geophysical model compatible with the acquired data.

Several initial blocks were analyzed for 2D inversion, including different conditions of homogeneous semi-space, 10k, 5k, 3k, 1k and 0.5k ohmm. The background with lowest RMS and consequently best data fit between calculated and observed data was 300 ohm.m.

All the values ascribed in the initial inversion block were controlled by means of a careful analysis of the resistivities presented in each MT sounding, with the objective of generating a reliable model for the study area. Subsequently, an inversion with 70 interactions was processed and a combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) geophysical MT model was generated.

The generated geophysical model can be divided into conductive, resistive and highly resistive portions.

The conductive portion is subdivided into three areas around the MT01, MT08 and MT15 stations. The highly resistive portion extends in area from station MT11 to MT14, and in depth up to 7 km. Finally, the resistive portion starts at 7.4 km to a maximum of 10 km in depth.

The considerations resulting from the analysis of the 2D inversion model, previous geological and geochronological data (CPRM, 2012), and field observations are listed below and illustrated in Figure 9:

- a) the São Luís Cratonic Fragment can be subdivided into two major units: the lower cratonic unit, unaffected by the Gurupi Orogeny, and the upper cratonic unit, affected by the Gurupi Orogeny and Phanerozoic events (rifting that generated the São Luís graben);
- b) the boundary of the São Luís Craton Fragment marked by the Tentugal Shear Zone is recognized around the MT13 station;
- c) the Tromaí Intrusive Suite represents a cratonic portion that was reworked in the Meso- and Neoproterozoic during the Gurupi (Grenvillian?) Orogeny. Its tectonic contact with the Chega Tudo Formation is via the Tentugal Shear Zone (cratonic limit);

- d) the thicknesses of the Phanerozoic and Cenozoic sedimentary deposits are compatible with those presented in the literature (CPRM, 2012);
- e) between the MT14 and MT15 stations a (400-m thick) sedimentary package is depicted and is treated here as the Serra Grande Group of the Parnaíba Basin, differing from the CPRM geological map (Fig. 2), which considers it as belonging to the Itapecuru Group of the São Luís Basin. This change was made on the basis of the sandstone outcrops near the MT14 station (Fig 3F). Moreover, this outcrop is located further the Ferrer-Urbano Santos Arc, which marks the southern limit of the São Luís Basin;
- f) the maximum thickness found for the Itapecuru Group in the São Luís Basin is around 500 m. Its depocenter is located east of the transect and has a thickness of 3,000 m (CPRM, 2012);
- g) two Cenozoic coverings are recognized in the transect: the Barreiras Group (MT01, MT06 to MT11), with a maximum thickness of 30 m, and alluvial deposits (MT09 and MT10) with a thickness of around 20 m;
- h) correlations between the São Luís and West African cratons have been made, considering the similarities between the Gurupi (Brazil) and the Rokelide (Liberia) mobile belts, e.g., mineral resources, such as gold deposits, occurring on both sides. However, the fact that the Phanerozoic sedimentation covers much of the Precambrian rocks on the Brazilian side, their mineral potential has been underestimated. Geophysical studies at shallow depths applying high-resolution techniques (e.g., Controlled-Source Audio-frequency Magnetotellurics – CSAMT) are important for the mineral exploration of the study area;
- i) the Neoproterozoic Gurupi-Rokelide, Brasiliano-Pan African and Paraguay-Araguaia mobile belts constitute the boundaries of a triple-point junction of the supercontinent Rodinia (1.0 Ga). The Parnaíba Basin developed along these belts, which represent today the boundaries of cratonic regions. The cratonic borders

amalgamated 600 Ma ago were reactivated during the Phanerozoic taphrogenesis via ancient lineaments, promoting the formation of the Phanerozoic sedimentary basins;

- j) a regional geophysical investigation is suggested in Liberia in the West African Craton, e.g. an E-W transect across the (N-S-trending) Rokelide belt, as an attempt to reach depths from 2.8 to 7.4 km. This would increase the possibilities of correlation between South American and African plates.

6.0 CONCLUSIONS

A combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) geophysical model was for the first time generated for the study area located in the north-western most part of the State of Maranhão. The following geotectonic domains were characterized according to their electrical resistivity contrasts: the São Luís Cratonic Fragment, the Gurupi Belt, Phanerozoic basins and Cenozoic coverings.

The 2D inversion model generated in this study resulted from the best data fit between the observed and calculated data. Despite some man-induced noise near two MT stations, the final RMS was 3.08%, which is considered very good and analogous to that obtained in a previous study in northeastern Brazil (Santos, 2012; Silva, 2018).

The MT transect is composed of three superficial conductive portions, interpreted as the Serra Grande Group (Parnaíba Basin), the Itapecuru Group (São Luís Basin) and Cenozoic coverings (Barreiras Group and alluvial deposits).

A highly resistive portion around the MT13 station is interpreted as being the Gurupi Belt domain. Another resistive portion is interpreted as being the São Luís Cratonic Fragment, here subdivided into upper and lower units.

The thicknesses of the sedimentary units mentioned above were also obtained: Serra Grande Group – approximately 400 m; Itapecuru Group – 500 m; Barreiras Group – 30 m, and alluvial deposits – maximum thickness of 20 m.

The Tromai Intrusive Suite (cratonic portion) was reworked during the Gurupi Orogeny in the Proterozoic and its tectonic contact with the Chega Tudo Formation is marked by the Tentugal Shear Zone.

Some discussion on the correlations between Gurupi (Brazil) and Rokelide (Liberia-Africa) was also made possible by this study. It is recommended that similar geophysical transects be obtained in the African counterpart, so as to enable further correlations between the São Luís cratonic fragment and the West African craton, e.g. a regional E-W geophysical transect in the Rokelide Belt.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank CAPES and INCT for financing field data acquisition. They also wish to thank the Geophysics, Prospecting and Remote Sensing Laboratory (LGPSR) – UFC for providing the equipment and support during the data processing stage.

REFERENCES

Almeida, F. F. M. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23., 1969, Salvador, BA. Anais... Salvador, BA: SBG, 1969. p. 29-46.

Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B. The Upper Precambrian of South América. Boletim Instituto de Geociências USP, v. 7, p. 45-80, 1976.

Almeida, F. F. M.; Neves, B. B. B.; Carneiro, C. D. R. The origin and evolution of the South American Plataform. Earth Science Reviews, v. 50, n. 1/2, p. 77-111, 2000.

Bahr, K., 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. Journal of Geophysics 62, 119–127.

Bahr, K., 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 66, 24–38.

Brito Neves, B. B.; Van Schmus, W. R.; Fetter, A. H. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema) Ensaio comparativo e problemas de correlação. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geo. USP Sér. Cient., São Paulo*, v.1, p.59-78, novembro 2001.

Caldwell, T.G., Bibby, H.M., Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International* 158, 457–469.

Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical. *Prospecting Geophysics*, 18(3): 605-635.

Chave, A. D.; Jones, A. G. *The magnetotelluric method: theory and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

Costa, J. L. (Org.). Castanhal: folha SA.23-V-C: Estado do Pará, escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 2000. 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil –PLGB.

CPRM, 2012. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão*. Organizadores, Evandro Luiz Klein, Cristiane Silva de Sousa. Escala 1:750.000. Belém: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2012.

Daly, M.C.; Fuck, R.A.; Julià, J.; Macdonald, D.I.M. & Watts, A.B. 2018. Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil. *Geological society of London*. 472: 1-15.

ESPOSITO, R. *Application of Magnetotelluric Method in Sedimentary Environments and Analysis of the Resistivity Dispersion in Presence Of 3d*

Polarizable Structures. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 2016. 108p.

Groom, R.W., Bailey, R.C., 1989. Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research* 94, 1913–1925.

Hasui, Y.; Abreu, F. A. M.; Villas, R. N. N. Província Parnaíba. In: Almeida, F. F. M.; Hasui, Y. (Eds.) *O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.p. 36-45.

Klein, E. L.; Fuzikawa, K. A mineralização aurífera do prospecto Pedra de Fogo, Cráton São Luís: geologia e características físico-químicas do sistema hidrotermal. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 1, p. 59-68, mar. 2005a.

Klein, E. L.; Moura, C. A. V.; Pinheiro, B. L. S. Paleoproterozoic crustal evolution of the São Luís Craton, Brazil: evidence from zircon geochronology and Sm-Nd isotopes. *Gondwana Research*, v. 8, n. 2, p. 177-186, 2005b.

Klein, E. L.; Lopes, E. C. S. Formação Igarapé de Areia: Tarkwa no Cinturão Gurupi? In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 2.*, 2009, Gramados, RS. Resumos...Gramados, RS: SBG, 2009. 1 CD-ROM.

Lesquer, A.; Beltrão, J. F.; Abreu, F. A. M. Proterozoic links between northeastern Brazil and West Africa: a plate tectonic model based on gravity data. *Tectonophysics*, v. 110, p. 9-26, 1984.

Markwitz, V; Hein, K. A. A; Miller, J. 2016. Compilation of West African mineral deposits: Spatial distribution and mineral endowment. *Precambrian Research*: 274, 61-81.

Martí, A; Queralt, P; Ledo, J. 2009 WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor. 2009. *Computers & Geosciences* 35 (2009) 2295–2303.

McNeice, G., Jones, A.G., 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics* 66, 158–173.

Naganjaneyulu, K., Santosh, M. 2011. Crustal architecture beneath Madurai Block, southern India deduced from magnetotelluric studies: implications for subduction–accretion tectonics associated with Gondwana assembly. *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 132–143.

Naganjaneyulu, K; Aggarwal, L; Santosh, M. Magnetotelluric studies in the Central India Tectonic Zone: Implications for intraplate stress regimes and generation of shallow earthquakes. 2013. *Journal of Asian Earth Sciences* p *Journal of Asian Earth Sciences* 78 (2013) 318–326

Pastana, J. M. do N. (Org.). Turiçu: folha SA.23-V-D, Pinheiro SA.23-Y-B, Estados do Pará e Maranhão, escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1995. 205 p., il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

Porsani, J. L.; Fontes, S. L. O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO APLICADO À BACIA DO SÃO FRANCISCO, MINAS GERAIS. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19(2), 2001

Rossetti, D. F.; Truckenbrodt, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, MA. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Série Ciências da Terra*, v. 9, p. 31-43, 1997.

Rossetti, D.F. 2000. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, 133:295-324.

Silva, F.M. 2018. Aplicação de métodos geofísicos, geológicos e detecção remota, na investigação da sismicidade induzida na barragemdo Castanhão, região nordeste do Brasil. FACULDADE DE CIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE LISBOA, Tese de Doutorado, 228p.

Santos, A.C.L. 2012. Imageamento magnetotelúrico de estruturas da litosfera na porção SE da Província Borborema. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 160p.

Simpson, F.; Bahr, K. 2005. Practical Magnetotellurics. Cambridge University, Press Cambridge, 270p.

Solon, S. L. Fontes, E. F. LA. Electrical conductivity structure across the Parnaíba Basin, NE Brazil. F. F. TERRA Geological society of London. 472: 109-126.

Tikhonov, A. N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, USSR. Doklady Akademii Nauk, 73(2): 395-297.

Uchoa, E. B.; Magini, C.; Castelo Branco, R. M. G.; Silva, N. C. V.; Silva, F. M. Diretrizes para Aquisição e Processamento de Dados Geofísicos Magnetotelúricos: O Caso do Fragmento Cratônico São Luís/Ma. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 2020. No prelo.

Vasquez, M. L.; Rosa-Costa, L. T. (Orgs.). Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará: escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008. p. 39-110. Sistema de Informações Geográficas – SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB.

Veiga Júnior, J. P. São Luís NE/SE, Folhas SA- 23-X e SA-23-Z: Estados do Maranhão e Piauí: escala 1:500.000. Brasília, DF: CPRM, 2000. p. 5-23. Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB.

Villeneuve, M; Cornée, J. J. 1994. Structure, Evolution and paleogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic. *Precambrian Research*: 69, 307-326.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese forneceu uma contribuição fundamental no campo dos métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados em terrenos Pré-cambrianos (áreas cratônicas, faixas móveis) recobertos, na sua maior parte, por sedimentos e rochas sedimentares Fanerozoicas no NE brasileiro, além de ensaios de correlação pré-drifte com o lado africano.

As conclusões deste trabalho estão sustentadas através de dois manuscritos que foram submetidos a duas revistas indexadas.

Foi elaborado um *guideline* de aquisição MT através de um estudo de caso do fragmento cratônico São Luís/MA com foco nos profissionais de diversas áreas (principalmente geociências) que pretendem utilizar o método MT nas suas diversas aplicações. Este trabalho é de extrema importância, pois traz todas as nuances e desafios de um levantamento com dados MT reais (não sintéticos), exibindo todas as etapas desde a aquisição até os produtos finais. Apesar de cada área de aplicação MT apresentar resultados distintos, este é um trabalho que poderá ser utilizado como guia para profissionais da iniciativa privada e acadêmica.

Através da aquisição e processamento dos dados MT foi possível elaborar um modelo geofísico MT 2D inédito na área estudo do fragmento cratônico São Luís e cinturão Gurupi. Este modelo forneceu o aporte necessário para caracterização geométrica de subsuperfície de uma seção de 180 km (comprimento) x 10 km (profundidade).

Procedeu-se, portanto, com a elaboração de um modelo geológico interpretativo com todos os detalhes dos contatos dos domínios tectônicos, que possibilitou ainda fomentar a retomada das discussões de reconstrução pré-drifte entre as placas Sul-Americana e Africana.

Através dos resultados e discussões apresentados na forma de 02 artigos científicos, foram elencadas as demais conclusões:

- a) Foi elaborado diretrizes para o aprimoramento de equipes técnicas em levantamentos geofísicos MT. A área modelo utilizada foi a do fragmento cratônico SL, Maranhão;
- b) Foram realizadas 15 sondagens MT distribuídas ao longo de um transecto de 180 km de comprimento e direção NNW-SSE;

- c) As séries temporais com dados ruidosos foram submetidas a filtros automáticos (filtro notch) e manuais, e conseqüentemente, possível fazer o cálculo dos tensores de impedância com baixa interferência de sinais externos;
- d) No cálculo dos tensores de impedância (Z) alguns autores (Borah *et al.*, 2015) sugerem modelos com valores específicos para cada range de frequência processado. No entanto, é necessário um estudo mais detalhado sobre a quantidade e influência dos sinais ruidosos para tal controle;
- e) As pseudoções TE e TM indicaram um bom grau de confiabilidade após a remoção dos ruídos, uma vez que apresentaram uma similaridade entre os dados observados e calculados;
- f) A seção geofísica MT regional elaborada possui caráter inédito e investigou domínios geotectônicos importantes na área de estudo: fragmento cratônico SL, faixa móvel Gurupi, bacias fanerozoicas (Parnaíba e São Luís) e coberturas cenozoicas;
- g) A inversão do modelo geofísico MT apresentou um bom ajuste entre os dados observados e calculados. Embora algumas sondagens tenham sido adquiridas em locais com ruídos antropogênicos, o RMS final do modelo foi de 3,08 %, considerado muito bom, comparativo a levantamentos anteriores no NE do Brasil;
- h) Quanto à caracterização geoeletrica observou-se: 3 porções condutivas superficiais interpretadas como Grupo Itapecuru (bacia de São Luís), Grupo Serra Grande (bacia do Parnaíba) e coberturas cenozoicas (Grupo barreiras e depósitos aluvionares). Uma faixa altamente resistiva próximo à estação MT13 é interpretado como faixa Gurupi. O restante da seção mostra porções resistivas que foram atribuídas às rochas do fragmento cratônico São Luís que foi subdividido em superior e inferior.
- i) O principal contato entre o fragmento cratônico SL e a faixa Gurupi dá-se através da Suíte Intrusiva Tromai com a Formação Chega Tudo marcado pela zona de cisalhamento Tetugal (limite cratônico). Esta suíte paleoproterozoica foi retrabalhada durante a orogenia Gurupi no Neoproterozoico;

- j) As espessuras das bacias e coberturas foram: 400 m (B. Parnaíba), 500 m (B. São Luís), 30 e 20 m para o Grupo barreiras e depósitos aluvionares, respectivamente.
- k) Um ajuste litoestratigráfico foi realizado na porção sedimentar na parte Sul do modelo geológico onde foi atribuído como pertencente às rochas da Bacia do Parnaíba (informações de campo);
- l) Através do modelo interpretativo é possível discutir sobre a correlação entre as faixas Gurupi e Rokelide (Cráton do oeste africano – Libéria). No entanto é necessário uma seção geofísica similar (lado africano) para detectar e correlacionar as profundidades investigadas;
- m) Como fator econômico sugere-se a aplicação de métodos geofísicos de investigação rasa (ex: CSAMT) ao longo do cráton SL para investigar potenciais depósitos minerais recobertos pelas rochas Fanerozoicas no lado brasileiro;
- n) As faixas Gurupi-Rokelide, Brasileiro-Panafricana, Paraguaia-Araguaia representam o ponto tríplice da quebra do supercontinente Rodínia (1.0 Ba). A bacia do Parnaíba desenvolveu-se ao longo desses limites que hoje representam as porções cratônicas sotopostas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N.; HASUI, Y. Esboço estratigráfico do Pré-cambriano da região do Gurupi: Estados do Pará e Maranhão. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Camboriú. **Resumos...** Camboriú: SBG, 1980. v. 2, p. 647-658.
- AGUIAR, G. A. Revisão geológica da Bacia paleozóica do Maranhão. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG, v.3, p. 113-122, 1971.
- ALMEIDA, F. F. M. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 23., 1969, Salvador, BA. **Anais...** Salvador, BA: SBG, p. 29-46, 1969.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B. The Upper Precambrian of South América. **Boletim Instituto de Geociências USP**, v. 7, p. 45-80, 1976.
- ALMEIDA, F. F. M.; NEVES, B. B. B.; CARNEIRO, C. D. R. The origin and evolution of the South American Plataform. **Earth Science Reviews**, v. 50, n. 1/2, p. 77-111, 2000.
- ANJOS, Célio Eustáquio dos; DIAS, Ricardo Ribeiro. **Projeto de Gestão Ambiental Integrada da Região do Bico do Papagaio**. Zoneamento Ecológico-Econômico. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente (Seplan). Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico (DZE). Carolina. Geologia da Folha SB.23-Y-C. Estado do Tocantins. Escala 1:250.000. Org. por Ricardo Ribeiro Dias. 2.ed. Palmas, Seplan/DZE, 2004.
- BAHR, K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. **Journal of Geophysics** 62, p. 119–127, 1988.
- BAHR, K. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types. **Physics of the Earth and Planetary Interiors** 66, p. 24-38, 1991.
- BORAH, U. K.; PATRO, P. K.; SURESH, V. Processing of noisy magnetotelluric time series from Koyna-Warna seismic region, India: a systematic approach. **Annals of Geophysics**, [S.I.], v. 58, n. 2, p. G0222, jun. 2015. ISSN 2037-416X. Disponível em: <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/6690>. Acesso em: 12 jan. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.4401/ag-6690>.
- CAGNIARD, L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical. **Prospecting Geophysics**, 18(3), p. 605-635, 1953.
- CALDWELL, T. G., BIBBY, H. M., BROWN, C. The magnetotelluric phase tensor. **Geophysical Journal International** 158, p. 457-469, 2004.

CAMPBELL, D. F.; ALMEIDA, L. A.; SILVA, S. O. **Relatório preliminar sobre a geologia da bacia do Maranhão**. Boletim do Conselho Nacional de Petróleo, Rio de Janeiro: nº 1, 160 p., 1949.

CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, v. 2. p. 740-753, 1984.

CAROZZI, A. V. **Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, Série Ciência Técnica do Petróleo, n. 7, 1975.

CHAPMAN, S.; PRICE, A. T. The electric and magnetic state of the interior of the earth as inferred from terrestrial magnetic variations. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, A229, p. 427-460, 1930.

CHAVE, A. D.; JONES, A. G. **The magnetotelluric method**: theory and practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 603p.

CORDANI, U. G.; RAMOS, V. A.; FRAGA, L. M.; CEGARRA, M.; DELGADO, I.; SOUZA, K. G.; GOMES, F. E. M.; SCHOBENHAUS, C. **Tectonic Map of South America**. Explanatory notes. Second edition, 2016. Scale 1:5 000 000. Commission for The Geological Map of The World: Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

COSTA, J. L.; ARAUJO, A. A.; VILLAS BOAS, J. M.; FARIA, C. A. S.; SILVA NETO, C. S.; VAMDERLEY, V. J. R. **Projeto Gurupi**. Belém: CPRM, 1977. 258 p.

COSTA, J. L.; ALMEIDA, H. G. G.; RICCI, P. S. F. Metamorfismo e divisão tectono-estratigráfica do Grupo Gurupi no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. *In*: Simpósio de Geologia da Amazônia, 5., 1996, Belém. **Resumos**. Belém: SGB-Núcleo Norte, p. 110-112, 1996.

COSTA, J. L. (Org.). **Castanhal**: folha SA.23-V-C: Estado do Pará, escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 2000. 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

COSTA NETO, M. C.; LOPES, E. C. S.; ANJOS, G. C.; MELO, A. F. F. **Geologia e recursos minerais da Folha Imperatriz**: SB.23-V-C-V, Estado do Maranhão: escala: 1: 100.000. Belém: CPRM, 2014. 89p.

DALY, M.C.; FUCK, R. A.; JULIÀ, J.; MACDONALD, D. I. M.; WATTS, A. B. Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil. **Geological society of London**. 472, 2018. p. 1-15. Disponível em: https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:be5b7119-0f01-4001-b279-4d591557e720/download_file?file_format=pdf&safe_filename=Daly%20et%20al.%2052C%20Cratonic%20Basin%20Formation.pdf&type_of_work=Journal+article. Acesso em: 15 jan. 2019.

DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba

basin, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, São Leopoldo, n. 3, p. 24-35, 2002.

EGBERT, G. D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. **Geophys. J. Int.**, 130, p. 475-496, 1997.

ESPOSITO, R. **Application of Magnetotelluric Method in Sedimentary Environments and Analysis of the Resistivity Dispersion in Presence Of 3d Polarizable Structures**. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 2016. 108p.

FARIA JR., L. E. C.; TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo, Permiano da Bacia do Maranhão. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Camboriú, SC. **Anais...** Camboriú, SC: SBG, v. 2, p. 740-754, 1980.

FONTES, S. L.; HARINARAYANA, T.; DAWES, G. J. K; HUTTON, V. R. S. Processing of noisy magnetotelluric data using digital filters and additional data selection criteria. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 52, p. 30-40, 1988.

FRANCISCO, B. H. R.; SILVA, O. F; LOEWENSTEIN, P.; SILVA, G. G. Contribuição à Geologia da Folha São Luís (SA.23), no Estado do Pará. Brasil. **Avulso do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, n. 157, 1971. 40p. 23 cm. [Série Geologia].

GAMBLE, T. D.; GOUBAU, W. M.; CLARKE, J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. **Geophysics**, 44, p. 53-68, 1979.

GÓES, A. M. O. **Estudos sedimentológicos dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru no nordeste do Estado do Pará e nordeste do Maranhão**. 1981. 55 f. Tese (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Belém, 1981.

GÓES, A. M. O.; TRAVASSOS, W. A.; NUNES, K. C. **Projeto Parnaíba: reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias**. Belém: PETROBRAS, 1993. (Relatório interno).

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 57-67, jan./mar. 1994.

GRAHN, Y.; MELO, J. H. G.; STEEMANS, P. Integrated chitinozoan and miospore zonation of the Serra Grande Group (Silurian-Lower Devonian), Parnaíba Basin Northeast Brazil. **Revista Española de Micropaleontologia**, Madrid, v. 37, n. 2, p. 183-204, 2005.

GROOM, R. W., BAILEY, R. C. Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. **Journal of Geophysical Research** 94, p. 1913-1925, 1989.

HASUI, Y.; ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N. Província Parnaíba. *In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Eds.) O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, p. 36-45, 1984.

HIRAYAMA, M. On the relations between the variations of earth potential gradient and terrestrial magnetism. **J. Meteorol. Soc. Japan**, 12, p. 16–22, 1934 (in Japanese).

KAO, D.; RANKIN, D. Enhancement of Signal-to-Noise Ratio. **Magnetotelluric Data Geophysics**, 42, p. 103-110, 1977.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V. Age constraints on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís craton and Gurupi belt, northern Brazil: implications for lithostratigraphy and geological evolution. **International Geology Review**, v. 43, p. 237-253, 2001.

KLEIN, E. L.; KOPPE, J. C.; MOURA, C. A. V. Geology and geochemistry of the Caxias gold deposit, and geochronology of the gold-hosting Caxias Microtonalite, São Luís Craton, northern Brazil. **Journal of South American Earth Science**, v. 14, p. 837-849, 2002.

KLEIN, E. L. **Evolução geológica Pré-cambriana e aspectos da metalogênese do ouro do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi, NE-Pará/NW-Maranhão, Brasil**. 2004. 303 p. Tese (Doutorado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

KLEIN, E. L.; FUZIKAWA, K. A mineralização aurífera do prospecto Pedra de Fogo, Cráton São Luís: geologia e características físico-químicas do sistema hidrotermal. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 59-68, mar. 2005.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V.; Pinheiro, B. L. S. Paleoproterozoic crustal evolution of the São Luís Craton, Brazil: evidence from zircon geochronology and Sm-Nd isotopes. **Gondwana Research**, v. 8, n. 2, p. 177-186, 2005.

KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Formação Igarapé de Areia: Tarkwa no Cinturão Gurupi? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 2., 2009, Gramado, RS. **Resumos...** Gramado, RS: SBG, 2009. 1 CD-ROM.

KLEIN, Evandro Luiz; SOUSA, Cristiane Silva de (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Maranhão**: texto explicativo. Belém: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2012. 150 p. Escala 1:750.000. Sistema de Informações Geográficas - SIG; Mapas Geológicos Estaduais; Programa Geologia do Brasil – PGB.

LEÃO NETO, R. **Projeto Carutapera**: baixada maranhense: informe anual de projeto. Recife, PE: CPRM, 1993. (Relatório inédito).

LESQUER, A.; BELTRÃO, J. F.; ABREU, F. A. M. Proterozoic links between northeastern Brazil and West Africa: a plate tectonic model based on gravity data. **Tectonophysics**, v. 110, p. 9-26, 1984.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética**. Relatório final, etapa III. Belém: DNPM; CPRM, v. 1, 1978. 190 p.

LIMA, H. P.; ARANHA, L. G. F.; FEIJÓ, F. J. Bacias de Bragança, São Luís e Graben de Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 111-116, mar. 1994.

LISBOA, M. A. R. The Permian geology of Northern Brazil. **American Journal of Science**, New Haven, v. 37, n. 221, Série 4, p. 425-443, maio 1914.

MARKWITZ, V.; HEIN, K. A. A; MILLER, J. Compilation of West African mineral deposits: Spatial distribution and mineral endowment. **Precambrian Research**: 274, p. 61-81, 2016.

MARTÍ, A.; QUERALT, P.; LEDO, J. WALDIM: a code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor. **Comput. Geosci.**, 35, p. 2295-2303, 2009.

MARZOLI, A.; RENNE, P.; PICCIRILLO, E. M.; ERNESTO, M.; BELLIENE, G.; DE MIN, A. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. **Science**, v. 284, p. 616-618, 1999.

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S.; STREEL, M. Latest Devonian to early Late Carboniferous biostratigraphy of northern Brazil: an update. **Bulletin Du Centre De Recherches Elf Exploration Production**, v. 20, n. 1, p. 13-33, 1998.

MELO, R. S. P. F. **Paleoictiofauna da Formação Pastos Bons (Bacia do Parnaíba)**: reconstrução paleoambiental e posicionamento cronoestratigráfico. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, IBRAG-Instituto de Biologia Alcantara Gomes, Rio de Janeiro, 2006.

MENEZES, P. T. L. **Fundamentos do método magnetotelúrico na exploração de hidrocarbonetos**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013.

MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. P. Estratigrafia das Bacias paleozóicas e cretáceas do Maranhão. **Boletim Técnico da Petrobras**, v. 7, n. 2, p. 137-164, abr./jun. 1964.

MCNEICE, G., JONES, A. G., Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. **Geophysics** 66, p. 158-173, 2001.

NAGANJANEYULU, K.; SANTOSH, M. Crustal architecture beneath Madurai Block, southern India deduced from magnetotelluric studies: implications for subduction–accretion tectonics associated with Gondwana assembly. **Journal of Asian Earth Sciences** 40, 132-143, 2011.

NAGANJANEYULU, K.; AGGARWAL, L. SANTOSH, M. Magnetotelluric studies in the Central India Tectonic Zone: Implications for intraplate stress regimes and

generation of shallow earthquakes. **Journal of Asian Earth Sciences** 78, p. 318-326, 2013.

NAGATA, H.; MIKADA, H.; GOTO, T. N.; TAKEKAWA, J.; KASAYA, T. Data processing of magnetotelluric survey data in time domain using digital filter - An Example at the Nankai trough. *In: 21st EM INDUCTION WORKSHOP, Extended Abstract, Darwin*, p. 1-4, 2012.

NEVES, B. B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; FETTER, A. H. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema) Ensaio comparativo e problemas de correlação. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geo. USP Sér. Cient.*, São Paulo, v.1, p. 59-78, novembro 2001.

NEVES, A. S. D. **The generalized magneto-telluric method**. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1957.

NORTHFLEET, A. A.; Neves, S. B. **Semi-detulhe da região SW de Balsas**. Belém: Petrobras, 1967. 60 p. (Relatório Técnico, 260).

NUNES, A. B., LIMA, R. F. F.; BARROS FILHO, C. N. Geologia da Folha SA.23 - São Luís e parte da folha SA.24 Fortaleza. *In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Folha SA.23 - São Luís e parte da folha SA.24 - Fortaleza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, 1973. il. p. 1/3–1/33. Projeto Radam; Levantamentos de recursos naturais, 3.

OLIVEIRA, K. M. L. **Integração de Dados Geofísicos (Magnetometria, Gravimetria e Magnetotelúrico) Na Borda Nordeste da Bacia do Parnaíba, NW do Ceará, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 2016, 112p.

OLIVEIRA, J. G. F.; SILVA, R. C. S. **Geologia e recursos minerais da folha Belém, SA.22-X-D-III: Estado do Pará**, escala: 1: 100.000. Belém: CPRM, 2011. 91 p. Programa Geologia do Brasil - PGB; Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

PASTANA, J. M. N. (Org.). **Turiaçu: folha SA.23-V-D, Pinheiro SA.23-Y-B, Estados do Pará e Maranhão**, escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1995. 205 p., il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Petrography of gypsum-bearing facies of the Codó Formation (Late Aptian), Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, p. 557-572, 2006.

PEDRÃO, E. ARAI, M.; BARRILARI, I. M. R.; CARVALHO, I. S. Análise palinológica de uma amostra de superfície de Querru (Formação Itapecuru), Município de Itapecuru-Mirim (MA). *In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 13.; Simpósio Paleontológico do Cone Sul, 1., 1993, São Leopoldo, RS. Boletim de Resumos*. São Leopoldo, RS: SBP; UNISINOS, p. 175, 1993.

PEDRÃO, E.; CARVALHO, I. S.; MARTINS, F. J. C.; SANTOS, M. H. B. Palinostratigrafia e análise quantitativa de amostras de superfície (Formação

Itapecuru, Bacia de São Luís). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 2, p. 268, 1996.

PEDROSA JUNIOR, N. C. **Interpretação e Modelagem de Dados Geofísicos no Estudo da Evolução Geotectônica do Rifte de Jaibaras – NE do Brasil**. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2015. 221p.

PETIAU, G.; DUPIS, A. Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations. **Geophys. Prosp.**, 28, p. 792-804, 1980.

PETIAU, G. Second generation of lead–lead chloride electrodes for geophysical applications. **Pure Appl. Geophys.**, 157, p. 357-382, 2000.

PLUMMER, F. B.; PRICE, L. I.; GOMES, F. A. Estados do Maranhão e Piauí. *In*: BRASIL. **Conselho Nacional do Petróleo**: relatório de 1946. Rio de Janeiro: [s. n.], p. 87-134, 1948.

PORSANI, J. L.; FONTES, S. L. O Método Magnetotelúrico Aplicado à Bacia do São Francisco, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Geophysics**, Vol. 19(2), 2001.

RIKITAKE, T. Electromagnetic induction within the earth and its relation to the electrical state of the earth's interior, part I(2). **Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo**, 28, p. 219-262, 1951.

RODRIGUES, R. **Estudo sedimentológico e estratigráfico dos depósitos silurianos e devonianos da Bacia do Parnaíba**. Belém: Petrobras, 1967. (Rel. interno).

RODRIGUES, T. L. N.; ARAUJO, C. C.; CAMOZZATO, E.; RAMGRAB, G. E. **São Luís Folha SA.23-Z-A, Cururupu Folha SA.23-X-C: Estado do Maranhão**. Escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1994. 185 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, MA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**: Série Ciências da Terra, v. 9, p. 31-43, 1997.

ROSSETTI, D. F. Facies architecture and sequential evolution of an incised-valley estuarine fill: the Cajupe formation (Upper cretaceous to? Lower tertiary), São Luís Basin, northern Brazil. **Journal of Sedimentary Research**, v. 68, n. 2, p. 299-310, 1998.

ROSSETTI, D.F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, 133, p. 295-324, 2000.

ROSSETTI, D. F. Evolução sedimentar miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. **Geologia USP**: série científica, v. 6, n. 2, p. 7-18, 2006.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Caracterização paleoambiental de depósitos albianos na borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: modelo de delta fluvial

influenciado por tempestade. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 3, p. 299-312, 2003.

SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: reconstituição paleobiológica**. Rio Janeiro: CPRM, 2009. 215 p.

SANTOS, A. C. L. **Imageamento magnetotelúrico de estruturas da litosfera na porção SE da Província Borborema**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2012. 160p.

SANTOS JR., A. E. **Análise integrada dos depósitos de caulim na região do Rio Capim: fácies, estratigrafia, petrografia e isótopos estáveis**. 107 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2006.

SCHUSTER, A. The diurnal variation of terrestrial magnetism. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, A180, p. 467-518, 1989.

SILVA, N. C. V. **Estrutura Geométrica da Crosta Superior Revelada por Dados Magnetotelúricos 2D na Bacia do Jaibas, NW do Ceará, Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará 2016. 96p.

SILVA, F. M. **Aplicação de métodos geofísicos, geológicos e detecção remota, na investigação da sismicidade induzida na barragem do Castanhão, região nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2018. 228p.

SIMPSON, F.; BAHR, K. **Practical Magnetotellurics**. Cambridge University, Press Cambridge, 2005. 270p.

SOLON, F. F.; FONTES, S. L.; LA TERRA, E. F. Electrical conductivity structure across the Parnaíba Basin, NE Brazil. *In*: Cratonic Basin Formation: A Case Study of the Parnaíba Basin of Brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, V. 472, p. 109-126, 2018.

SUGUIO, K.; NOGUEIRA, A. C. R. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. **Geociências**, v. 18, n. 2, p. 461-479, jul./dez. 1999.

STANLEY, W. D.; BOEHL, J. E.; BOSTICK, F. X.; SMITH, H. W. Geothermal significance of magnetotelluric sounding in the eastern Snake River Plain–Yellowstone region. **J. Geophys. Res.**, 82, p. 2501-2514, 1977.

TEIXEIRA, K. S. L.; MOURA, C. A. V.; TRUCKENBRODT, W.; KLEIN, E. L.; CHEMALE JÚNIOR, F. Petrografia, geoquímica e geocronologia da Formação Igarapé de Areia, NE-Pará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 11., 2007, g ç g p Atibaia, SP. **Anais...** Atibaia, SP: SBGq, 2007. 1 CD-ROM.

TIKHONOV, A. N. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, USSR. **Doklady Akademii Nauk**, 73(2), p. 395-297, 1950.

UCHOA, E. B.; MAGINI, C.; CASTELO BRANCO, R. M. G.; SILVA, N. C. V.; SILVA, F. M. Diretrizes para Aquisição e Processamento de Dados Geofísicos Magnetotelúricos: O Caso do Fragmento Cratônico São Luís/Ma. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, 2020. No prelo.

VASCONCELOS, A. M.; RIBEIRO, J. A. P.; COLARES, J. Q. S.; GOMES, I. P.; FORGIARINI, L. L.; MEDEIROS, M. F. Folha SB.23-Teresina. *In*: SCHOBENAHUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS, M. A. B.; JESUS, J. D. A. (eds.) **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**: sistema de informações geográficas. Brasília, DF: CPRM-Serviço geológico do Brasil, 2004. Programa Geologia do Brasil – PGB. 1 CD-ROM.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. (Orgs.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará: escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008. p. 39-110. Sistema de Informações Geográficas – SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 253-263, 2007.

VEIGA JÚNIOR, J. P. **São Luís NE/SE, Folhas SA- 23-X e SA-23-Z: Estados do Maranhão e Piauí**: escala 1:500.000. Brasília, DF: CPRM, 2000. p. 5-23. Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB.

VILLENEUVE, M.; CORNÉE, J. J. Structure, Evolution and paleogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic. **Precambrian Research** 69, p. 307-326, 1994.

VOZOFF, K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. **Geophysics**, 37(1), p. 98-141, 1972.

VOZOFF, K. The magnetotelluric method. *In*: NABIGHIAN, M. N. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**, Vol. 2, *Applications*, ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, p. 641-711, 1991.

YAMAGUTI, H. S.; VILLAS, R. N. N. Estudo microtermométrico dos fluidos hidrotermais relacionados com a mineralização aurífera de Montes Áureos, NW do Maranhão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 1, p. 21-32, mar. 2003.

**APÊNDICE A – TABELA EXIBINDO AS COORDENADAS GEOGRÁFICAS E UTM
(ZONA 23S) DAS ESTAÇÕES DO LEVANTAMENTO MT NO MARANHÃO**

Ponto	x (m)	y (m)	Lat	Long	z (m)
MT01	385906	9861232	01° 15' 18.984"	46° 01' 31.884"	25
MT02	382216	9851534	01° 20' 34.747"	46° 03' 31.404"	34
MT03	385761	9840877	01° 26' 21.840"	46° 01' 36.853"	37
MT04	386346	9828947	01° 32' 50.348"	46° 01' 18.104"	50
MT05	388201	9817954	01° 38' 48.364"	46° 00' 18.252"	68
MT06	382319	9808356	01° 44' 00.818"	46° 03' 28.764"	60
MT07	375505	9799277	01° 48' 56.337"	46° 07' 9.451"	41
MT08	377164	9788888	01° 54' 34.677"	46° 06' 15.972"	29
MT09	383383	9779965	01° 59' 25.376"	46° 02' 54.878"	52
MT10	380478	9766612	02° 06' 40.144"	46° 04' 29.192"	72
MT11	373659	9756817	02° 11' 58.945"	46° 08' 10.146"	82
MT12	369911	9746762	02° 17' 26.272"	46° 10' 11.727"	66
MT13	373406	9733924	02° 24' 24.411"	46° 08' 18.927"	58
MT14	385866	9715200	02° 34' 34.470"	46° 01' 36.009"	84
MT15	389550	9704436	02° 40' 25.092"	45° 59' 36.999"	98

APÊNDICE B – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT01 À MT06



**APÊNDICE C – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT07 À
MT12**



MT-07



MT-08



MT-09



MT-10

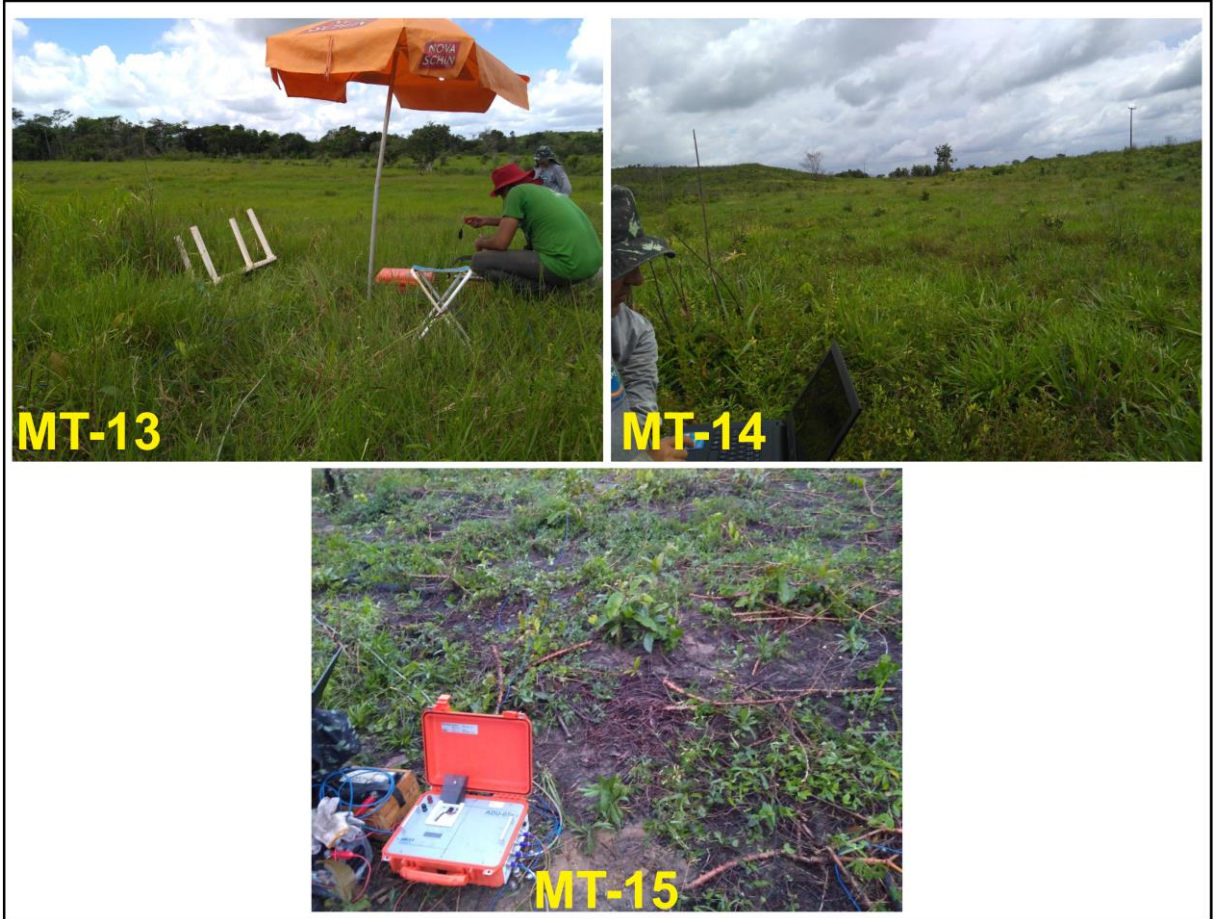


MT-11

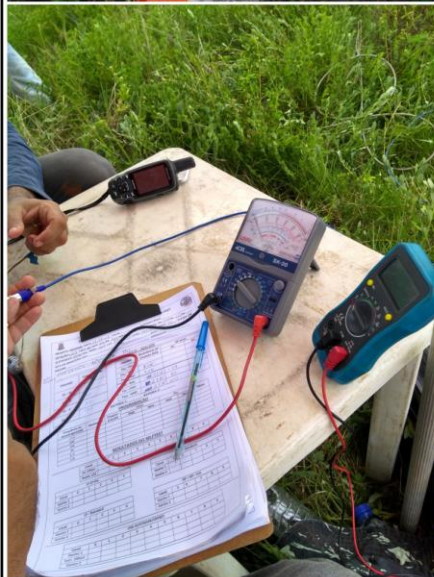


MT-12

**APÊNDICE D – PRANCHA DE FOTOS DOS LOCAIS DAS ESTAÇÕES MT13 À
MT15**



APÊNDICE E – FOTOS DURANTE A AQUISIÇÃO DOS DADOS MT (MAIO/2018)



APÊNDICE F – AFLORAMENTOS AO LONGO DO PERFIL GEOFÍSICO MT



APÊNDICE G – DOCUMENTO DE SUBMISSÃO DO MANUSCRITO NO *JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES*

Journal of South American Earth Sciences
MAGNETOTELLURIC TRANSECT ACROSS THE SÃO LUÍS CRATONIC FRAGMENT, THE GURUPI BELT AND THE PARNAÍBA BASIN, N-NE BRAZIL
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Magnetotellurics; São Luís Cratonic Fragment; Lineaments
Corresponding Author:	Elenilton Bezerra Uchoa, M.D Universidade Estadual do Ceara BRAZIL
First Author:	Elenilton Bezerra Uchoa, M.D
Order of Authors:	Elenilton Bezerra Uchoa, M.D Nilton Cesar Vieira Silva Christiano Magini Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco Reinhardt Adolfo Fuck Fabiano Mota da Silva Jackson Alves Martins Charles Régis Maia e Silva
Abstract:	The study area is located in the N-NE region of Brazil where Precambrian rocks of the São Luís Cratonic Fragment and the Gurupi belt are overlain by Phanerozoic sediments of the Parnaíba and São Luís basins, making the assessment of the extents of these geotectonic domains difficult. One of the main objectives of the present study was to elaborate a NNW-SSE-trending, 180-km long magnetotelluric transect, aiming to identify the geotectonic domains of the study area by means of their geoelectric characteristics. The magnetotelluric (MT) technique is a geophysical method that detects the natural variations of the terrestrial electric and magnetic fields so as to investigate the geoelectric characteristics of the subsurface. By means of a MT survey for field data acquisition, calculation of impedance tensors and 2D inversion modeling, the geophysical transect and additionally an interpretive geological model were elaborated for the study area. The combined transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) geophysical model revealed superficial conductive (Parnaíba and São Luís basins and sedimentary coverings), resistive (São Luís Cratonic Fragment) and very resistive (Gurupi mobile belt) portions up to depths of the order of 15 km. These results attested for correlations between the São Luís Craton (South American Plate) and the West African Craton (African Plate), especially regarding the Gurupi Belt (in Brazil) and the Rokelide Belt (in Liberia), which are considered to be the boundaries of a triple junction related to the supercontinent Rodinia taphrogenesis. Besides presenting an unprecedented geophysical investigation along the São Luís Cratonic Fragment and the Gurupi Belt, this study promotes the discussion on the correlations between the Brazilian Gurupi and the African Rokelide belts for metallogenetic purposes.
Suggested Reviewers:	DAVID LOPES CASTRO david@geologia.ufrn.br Professor at UFRN (Brazil) with a lot of experience in Geophysics Applied to Regional Geophysical Cartography and the Study of Sedimentary Basins, Hydrogeology and Environment. Important reviewer to contribute to the geophysical aspects of the work. Cicero Roberto Teixeira Regis cicero@ufpa.br Professor at UFPA (Brazil) and with experience in Geophysics with an emphasis on Theory of Electromagnetic Methods: inversion of electromagnetic geophysical data.



FICHA DE CAMPO - ESTAÇÃO MAGNETOTELÚRICA/TEM-FAST



PROJETO: GEOMEL DATA: 19/05/18 LOCAL: AMAPÁ DO MARANHÃO SUPERFICIÁRIO:
 ESTAÇÃO: AF06 TIPO: MT ADU: 07e SN: 263 MAGNETOMETROS: MFS07e Hx: 252 Hy: 253 Hz: —
 ELETRODOS: EF06 DEC. MAG.: -22.5° LAT: 9808356 LONG: 382319 ELEV: 60 WGS84-245
 GPS DA MAQUINA: LAT: 1:44:1 S LONG 46:3:29 W ELEV: 58.9m
 EQUIPE: ELENILTON, CHRISTIANO, JACKSON, CHARLES OPERADOR: NEUS (NILTON)
1°44'0.958" S - 46°3'28.882"

MAGNETOTELÚRICO - ADU-07E

Eletrodo	Comprimento (m)	Dipolos	Resistência de Contato (KΩ)	SP (mV)	
				DC	AC
Ex - N	25m	EXN - EXS	5,5K	-16	0
Ex - S	-25m	EXN - GND	2,0K	51	0
Ey - E	25m	EXS - GND	2,5K	67	0
Ey - W	-25m	EYE - EYW	2K	0	0
		EYE - GND	2K	43	0
		EYW - GND	2K	43	0

BATERIA 1: 12,96 BATERIA 2: 13,29 (Normal)

PROGRAMAÇÃO

Frequência de Amostragem(Hz)	Decimação	Chopper (on/off)	Início		Fim		Filtros
			Data	Hora	Data	Hora	
131K	—						
64K	—						
16K	—						
4K	—						
512	—	on					
128	—	on	19/05/18	17:28:48	20/05/18	14:28:48	

RESULTADOS DO SELFTEST

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DC Offset	-15,6	1,2	-0,49	0,72	0,08	-14,8	1,37	0,14	0,11	0,05
Resist. (Ω)	5334	1695	30184	29405	2770	5319	1679	29241	28534	27,56

LF-LP-4Hz

Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	16	16	16	16	16
Ganho 2	1	1	8	9	9

HF - Standard

Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	1	1	8	8	8

LF - Standard

Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	16	16	16	16	16
Ganho 2	1	2	8	9	9

HF - HP - 1Hz

Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	8	1	8	8	8

USE AUTOGAIN/OFFSET

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganho 1										
Corr. Offset										
Ganho 2										

Obs:



FICHA DE CAMPO - ESTAÇÃO MAGNETOTELÚRICA/TEM-FAST



PROJETO: GEOMEL DATA: 20/05/ LOCAL: JUNCO DO MARANHÃO SUPERFICIÁRIO: —
 ESTAÇÃO: MT08 TIPO: MT ADU: 07e SN: 263 MAGNETOMETROS: MFS07e Hx: 253 Hy: 252 Hz: —
 ELETRODOS: EFPO6 DEC. MAG.: -22.5° LAT: 97888888 LONG: 377164 ELEV: 29 WGS84-23S
 GPS DA MAQUINA: LAT: 02:54:35 LONG 46:06:16 ELEV: 28,8—
 EQUIPE: NILTON, ELENILTON, JACKSON, CRISTIANO OPERADOR: NILTON

MAGNETOTELÚRICO - ADU-07E

Eletrodo	Comprimento (m)	Dipolos	Resistência de Contato (KΩ)	SP (mV)	
				DC	AC
Ex - N	30 ~	EXN - EXS	1K	0	0
Ex - S	-30 ~	EXN - GND	0,12K	77	0
Ey - E	30 ~	EXS - GND	2K	77	0
Ey - W	-30 ~	EyE - Eyw	0,15K	20	3
		EyE - GND	0,15K	42	5
		Eyw - GND	0,15K	61	5

BATERIA 1: 12,45 BATERIA 2: 12,94

PROGRAMAÇÃO

Frequência de Amostragem(Hz)	Decimação	Chopper (on/off)	Início		Fim		Filtros
			Data	Hora	Data	Hora	
131K	—						
64K	—						
16K	—						
4K	—						
512	—						
128	—		20/05/18	22:44:39	21/05/18	17:17:39	

RESULTADOS DO SELFTEST

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DC Offset	-3,29	-1,7	-0,46	0,75	0,09	-3,49	-1,15	0,14	0,07	0,03
Resist. (Ω)	1189	1359	30223	29557	2768	1175	1343	8648	27987	2756

LF-1P-4Hz					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	16	16	16	16	16
Ganho 2	1	1	8	4	4

HF - Standard					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	1	1	8	8	8

LF - Standard					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	16	16	16	16	16
Ganho 2	1	2	8	4	4

HF - HP - 1Hz					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	8	1	8	8	8

USE AUTOGAIN/OFFSET

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganho 1										
Corr. Offset										
Ganho 2										

Obs:



FICHA DE CAMPO - ESTAÇÃO MAGNETOTELÚRICA/TEM-FAST



PROJETO: GEOMEL DATA: 21/05/2018 LOCAL: POVÃO DE (MARACAÇUMÉ) JACV SUPERFICIÁRIO: —
 ESTAÇÃO: MT10 TIPO: MT ADU: 07e SN: 263 MAGNETOMETROS: MFS07e Hx: 282 Hy: 253 Hz: —
 ELETRODOS: EFPO6 DEC. MAG.: -22.5° LAT: 9766612 LONG: 380478 ELEV: 72 WGS84-295
 GPS DA MAQUINA: LAT: 02:06:40S LONG 46:04:29W ELEV: 75,37
 EQUIPE: ELEILTON/NILTON/CHRISTIANO/CHARLES OPERADOR: ELEILTON/NILTON

2°6'40,149"S - 46°4'29,333"W - 76m

MAGNETOTELÚRICO - ADU-07E

Eletrodo	Comprimento (m)	Dipolos	Resistência de Contato (KΩ)	SP (mV)	
				DC	AC
Ex - N	30 ~	EXN - EXS	17K	28	0
Ex - S	-30 ~	EXN - GND	14K	55	0
Ey - E	30 ~	EXS - GND	17K	24	0
Ey - W	-30 ~	EYE - EYW	12K	8	75
		EYE - GND	10K	35	8
		EYW - GND	12K	27	75

BATERIA 1: 1295 BATERIA 2: 1331 (MORDA)

PROGRAMAÇÃO

Frequência de Amostragem (Hz)	Decimação	Chopper (on/off)	Início		Fim		Filtros
			Data	Hora	Data	Hora	
131K	---						HP 1Hz
64K	---						HP 1Hz
16K	---						HP 1Hz
4K	---						LP 4Hz
512	---						LP 4Hz
128	---		<u>21/05/18</u>	<u>22:21:21</u>	<u>22/05/18</u>	<u>17:21:21</u>	LP 4Hz

RESULTADOS DO SELFTEST

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DC Offset	<u>31,82</u>	<u>9,43</u>	<u>-0,44</u>	<u>0,73</u>	<u>0,08</u>	<u>30,21</u>	<u>8,49</u>	<u>0,17</u>	<u>0,07</u>	<u>0,03</u>
Resist. (Ω)	<u>14304</u>	<u>9952</u>	<u>30200</u>	<u>29342</u>	<u>2769</u>	<u>14228</u>	<u>9987</u>	<u>21149</u>	<u>28904</u>	<u>2756</u>

LF-LP-4Hz					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>
Ganho 2	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>8</u>	<u>4</u>	<u>4</u>

HF - Standard					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>
Ganho 2	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>

LF - Standard					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>
Ganho 2	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>4</u>	<u>4</u>

HF - HP - 1Hz					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>
Ganho 2	<u>8</u>	<u>1</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>

USE AUTOGAIN/OFFSET

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganho 1										
Corr. Offset										
Ganho 2										

Obs:



FICHA DE CAMPO - ESTAÇÃO MAGNETOTELÚRICA/TEM-FAST



PROJETO: GEOMEL DATA: 24 105 147 LOCAL: CENTRO DO GUILHERME SUPERFICIÁRIO: —
 ESTAÇÃO: MT14 TIPO: MT ADU: 07e SN: 262 MAGNETOMETROS: MFS07e Hx: 254 Hy: 255 Hz: —
 ELETRODOS: EFPO6 DEC. MAG.: -22.5° LAT: 9715200 LONG: 385866 ELEV: 84 WGS84-24S
 GPS DA MAQUINA: LAT: 02°34'34.470" LONG 46°01'36.009" ELEV: 84
 EQUIPE: ELENILTON, NILTON, CHRISTIANO, CHARLES OPERADOR: ELENILTON

341 34,528" S
 36,041" W - 80m

MAGNETOTELÚRICO - ADU-07E

Eletrodo	Comprimento (m)	Dipolos	Resistência de Contato (KΩ)	SP (mV)	
				DC	AC
Ex - N	30 ~	EXN - EXS	2 K	-16	15
Ex - S	-30 ~	EXN - GND	1,6 K	65	6
Ey - E	30 ~	EXS - GND	2,5 K	82	7
Ey - W	-30 ~	EyE - Eyw	1,4 K	-16	30
		EyE - GND	1,9 K	71	12
		Eyw - GND	1,9 K	86	15

BATERIA 1: 1290v BATERIA 2: 1295 (HELIAR2)

PROGRAMAÇÃO

Frequência de Amostragem(Hz)	Decimação	Chopper (on/off)	Início		Fim		Filtros
			Data	Hora	Data	Hora	
131K	---						
64K	---						
16K	---						
4K	---						
512	---						
128	---		24/05/18	18:03:43	25/05/18	13:03:43	

RESULTADOS DO SELFTEST

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DC Offset	-2,56	-7,7	0,27	0,38	0,53	-2,38	-8,34	0,18	9,18	0,13
Resist. (Ω)	1698	3191	2998	931	253	2765	1680	3180	29137	30390

LF-LP-4Hz					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	8	16	16	16	16
Ganho 2	2	1	16	8	16

HF - Standard					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	8	8	8	8	8

LF - Standard					
Canal	0	1	2	3	4
Ganho 1	8	16	16	16	16
Ganho 2	1	2	16	8	16

HF - HP - 1Hz					
Canal	5	6	7	8	9
Ganho 1	8	8	8	8	8
Ganho 2	8	8	8	8	8

USE AUTOGAIN/OFFSET

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganho 1										
Corr. Offset										
Ganho 2										

Obs:

