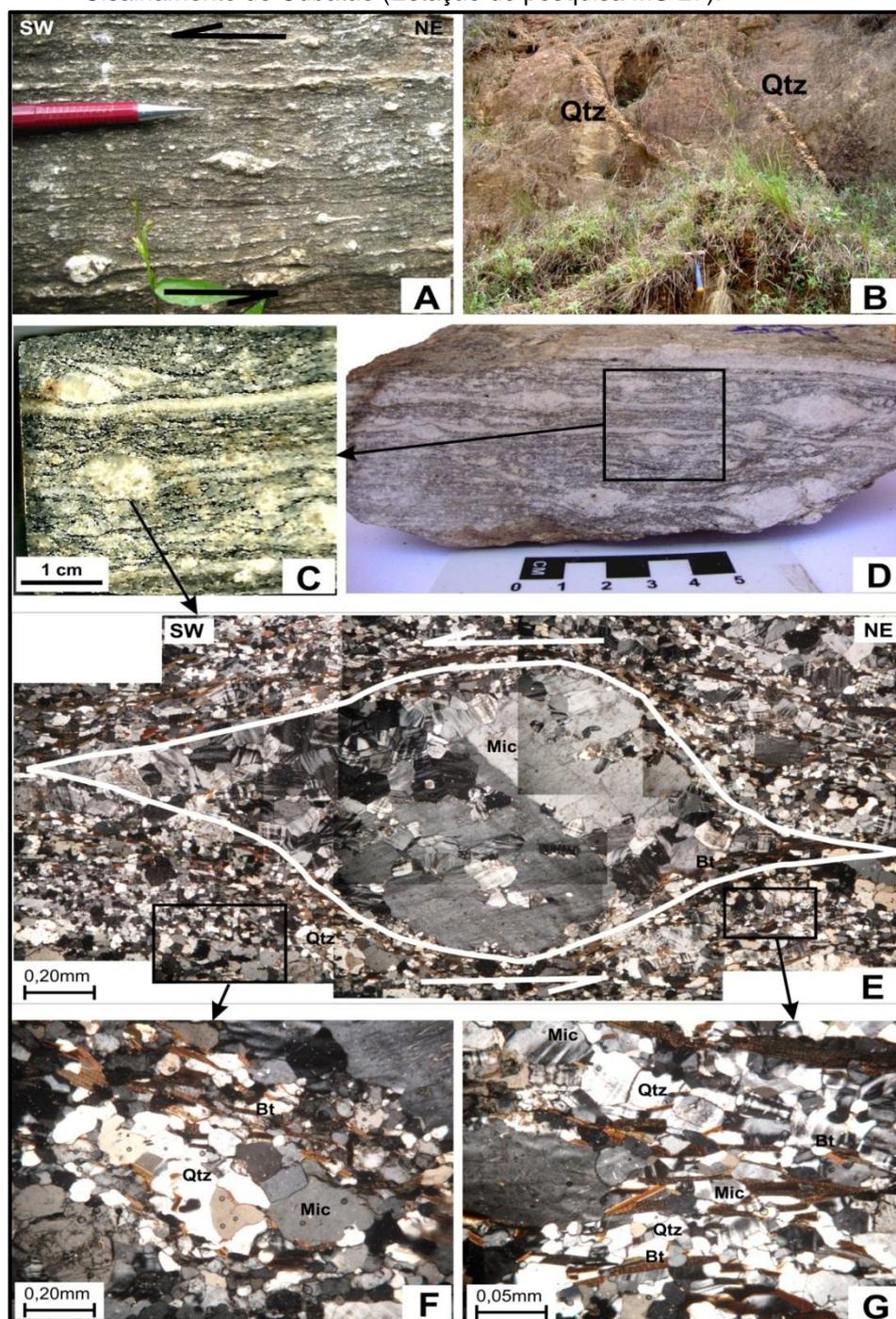


Figura 3.21: Gnaiss milonítico da Megassequência Andrelândia próximo à Zona de Cisalhamento de Cubatão (Estação de pesquisa MS-27).



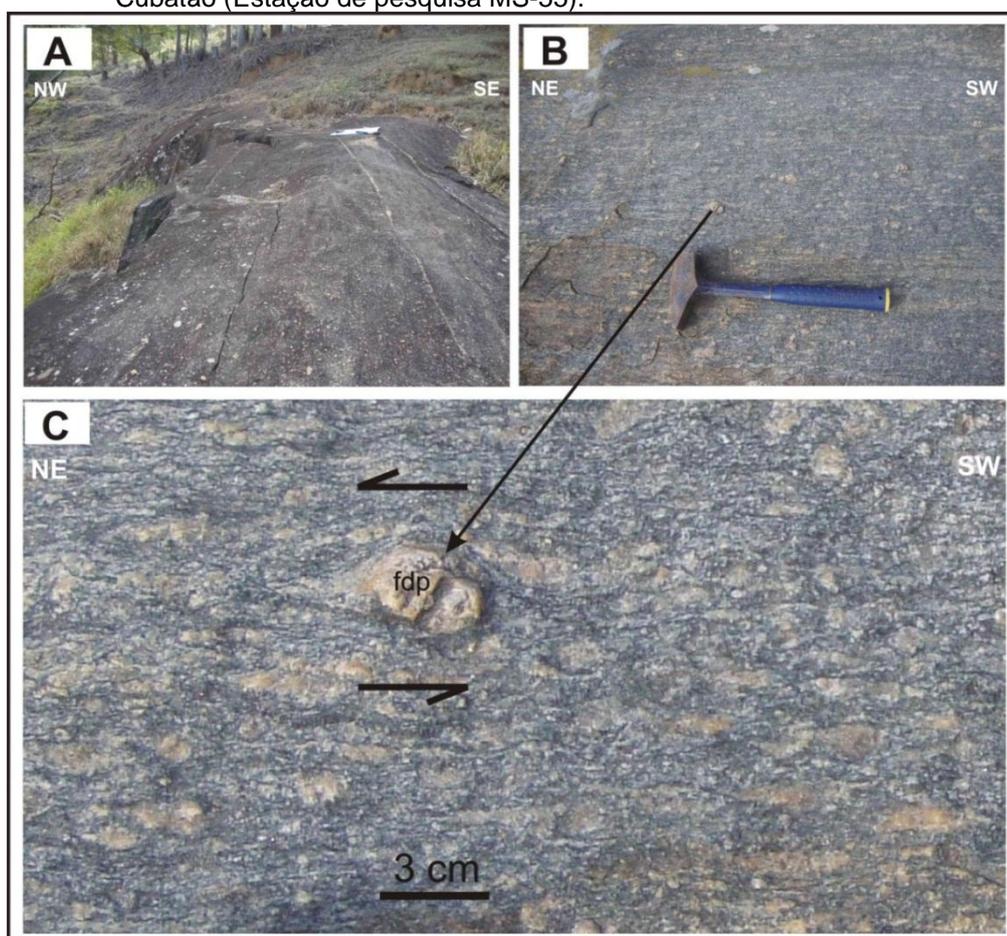
Legenda: A – Biotita gnaiss fino, milonítico, realçando os porfiroclastos de feldspatos; B – Veios de quartzo discordantes à foliação do gnaiss; C e D – Detalhes dos porfiroclastos de feldspatos; Fotomicrografias: E – Porfiroclastos sigmoidais de microclina com indicador de movimento sinistral; F e G – Dimensões diferentes dos cristais de quartzo (recristalizados), microclina e biotita, formando níveis diferenciados. Qtz: quartzo; Bt: biotita; Mic: microclina. (Figuras E, F e G: nicóis cruzados).

Fonte: O autor, 2015.

A Megassequência Andrelândia exibe mergulhos de alto ângulo (75° - 80°) para NW e lineação mineral para SW (Anexo C). Os poucos indicadores cinemáticos observados nos porfiroclastos de feldspato exibem movimento sinistral, com topo para SW.

O Ortognaisse Natividade da Serra exibe deformação diferenciada ao longo da área da tese, apresentando uma textura porfirítica de fluxo magmático a feições miloníticas quando próxima do lobo sul da Zona de Cisalhamento de Cubatão. Esta última pode ser observada entre as localidades da Serra Alto do Chapéu e Catioda (Figura 3.22-A), destacando porfiroclastos de k-feldspato (Figuras 3.22-B e 3.22-C).

Figura 3.22: Ortognaisse milonítico Natividade da Serra, próximo a Zona de Cisalhamento de Cubatão (Estação de pesquisa MS-55).



Legenda: A – Afloramento na Cachoeira do Rio do Chapéu; B – Detalhe do afloramento milonítico; C – Porfiroclasto de feldspato (fdp) contornado por matriz de granulometria fina constituída por cristais de quartzo e de biotita.

Fonte: O autor, 2015.

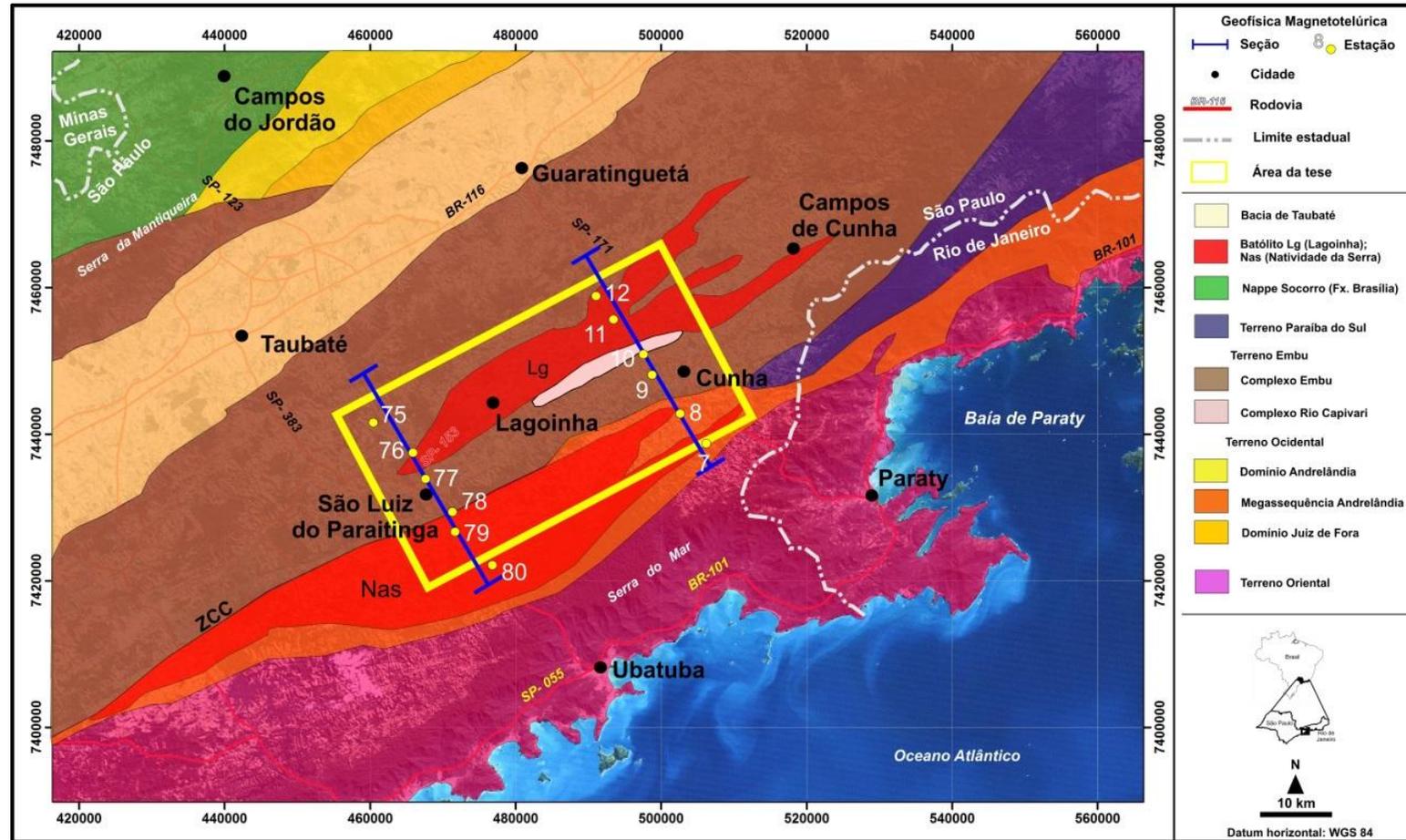
3.5 Continuidade da ZCC em profundidade

A continuidade, em profundidade, da Zona de Cisalhamento de Cubatão foi verificada por Solon *et al.* (2013), onde foram produzidos duas seções magnetotelúricas paralelas com cerca de 120 km cada a partir do litoral norte do Estado de São Paulo. O levantamento é parte do Projeto da PETROBRÁS denominado SubSal, realizado através de convênio entre o Observatório Nacional e a UERJ e executado pela Coordenação de Geofísica do Observatório Nacional.

O método magnetotelúrico corresponde a uma técnica não invasiva, realizada no domínio da frequência e capaz de estimar o contraste de resistividade em subsuperfície, desde poucos metros a até mais de uma centena de quilômetros. Este método envolve medidas ortogonais dos sinais naturais dos campos elétrico e magnéticos, adquiridas na superfície do terreno. São medidos dois componentes do campo elétrico (E_x e E_y) e três do campo magnético (H_x , H_y e H_z). A razão entre os componentes ortogonais destes campos fornece o tensor de impedância. O campo eletromagnético terrestre é decomposto em dois modelos de propagação das ondas: Transverso Elétrico (TE) e Transverso Magnético (TM). No primeiro considera-se a relação entre o componente elétrico E_x e o componente magnético H_y , este perpendicular ao primeiro. No modo TM, utilizam-se os componentes magnético (H_x) e elétrico (E_y), este último ortogonal ao primeiro.

As estações de levantamento, espaçadas aproximadamente em 5 km, geraram dados detalhados em profundidades rasas (crustais), devido à aplicação de equipamentos magnetotelúricos de banda larga. Doze estações estão localizadas na área da tese (Figura 3.23).

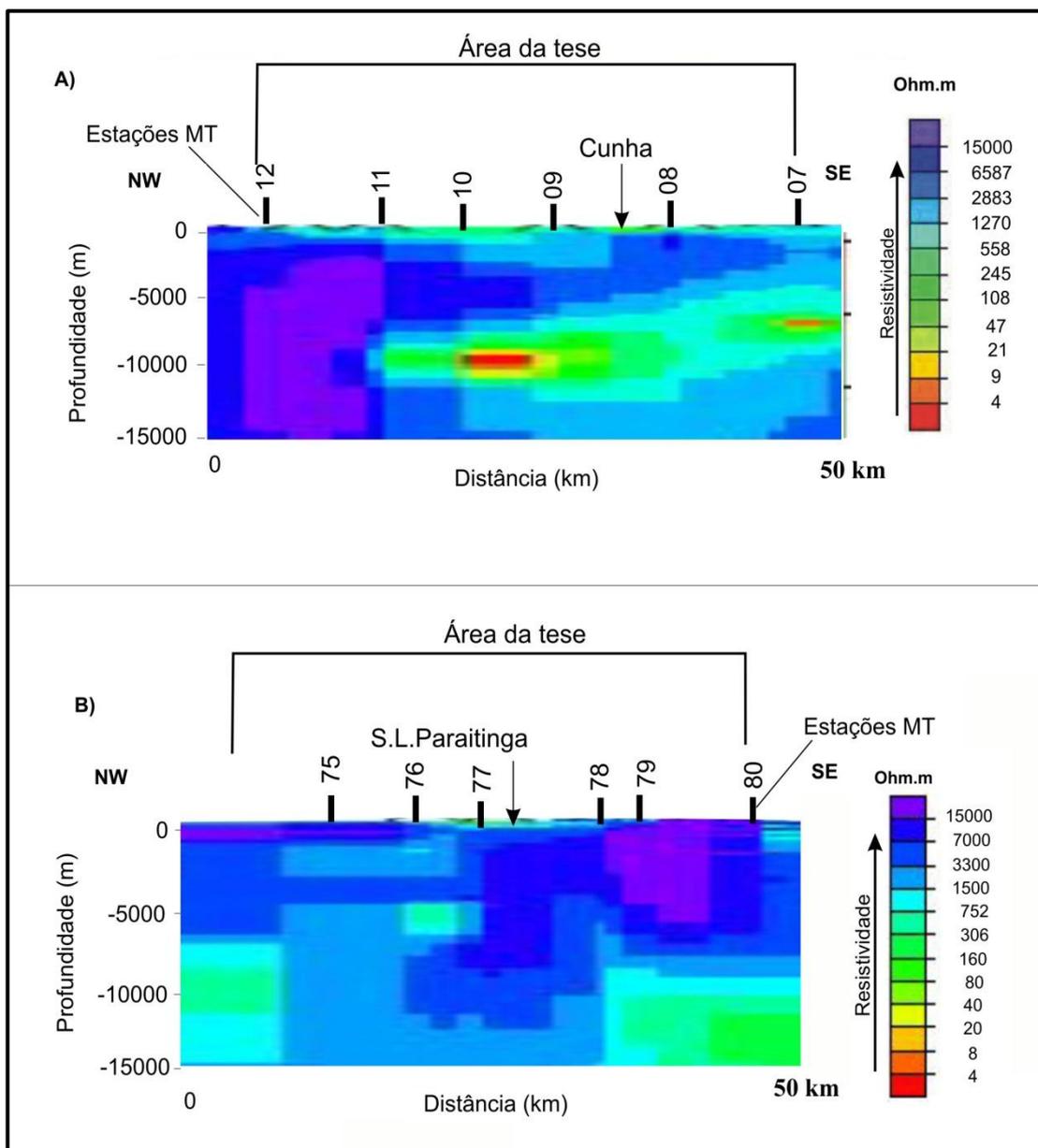
Figura 3.23: Mapa geológico com as estações e as seções geofísicas magnetotelúricas ao longo da área da tese.



Fonte: HEILBRON *et al.*, 2004; PERROTA *et al.*, 2005. Modificado pelo autor, 2015.

Os produtos deste levantamento foram duas seções de inversão 2D com escala de cores associada às mudanças laterais de condutividade/resistividade (Figura 3.24).

Figura 3.24: Seções geofísicas magnetotélúricas de inversão 2D.



Legenda: A – Perfil Norte; B – Perfil Sul. Localização das seções na Figura 3.23.

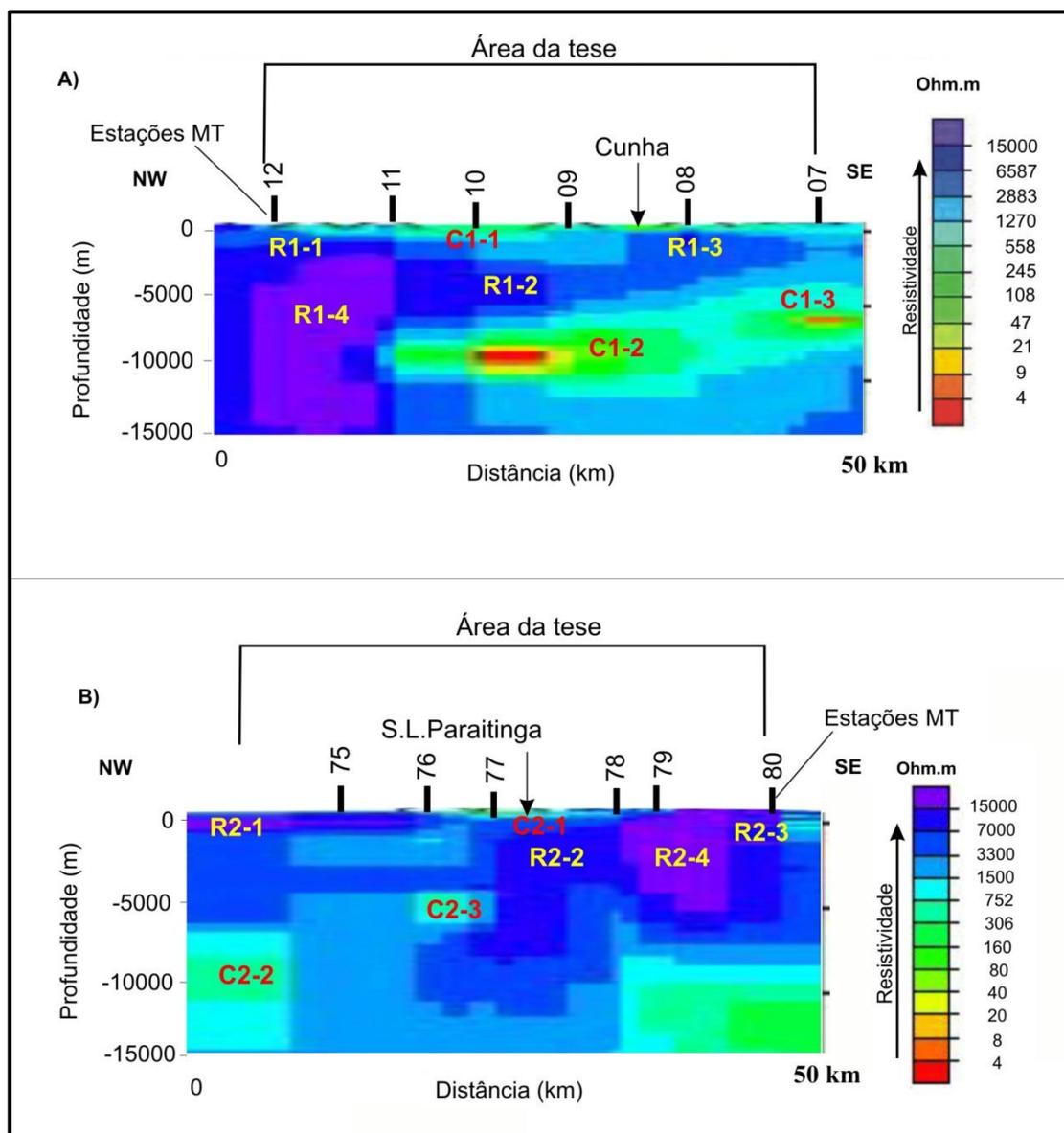
Fonte: SOLON *et al.*, 2013. Modificado pelo autor, 2015.

A Coordenação de Geofísica do Observatório Nacional utilizou a técnica robusta proposta por Egbert e Booker (1986) como método de processamento. As seções magnetotelúricas de inversão 2D foram produzidas através do algoritmo NLCG (Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm), utilizando o *software* Winglink. Os modos TE e TM foram utilizados simultaneamente na elaboração de cada seção. A análise inicial permitiu identificar características condutoras e resistoras em ambas as seções (Figura 3.25).

Os domínios com alta condutividade exibem de 4 a 300 Ohm.m e são observados em dois níveis de profundidades. As anomalias mais rasas (C1-1 e C2-1) alcançam profundidades máximas de 2500 metros e são subparalelas à superfície. As anomalias condutivas mais profundas chegam a 10000 metros (C1-2, C1-3, C2-2) e exibem um mergulho para NW (perfil norte) e para SE (perfil sul).

Quanto às características resistivas, duas feições são identificadas. A primeira ocorre desde a superfície até profundidades de 5000 metros (R1-1, R1-2, R1-3, R2-1, R2-2, R2-3) e valores acima de 1200 Ohm.m. O segundo padrão, com anomalias superiores a 15000 Ohm.m, está no intervalo de 2500 a 15000 metros na seção norte (R1-4) e de 0 a 7000 metros de profundidade na seção sul (R2-4).

Figura 3.25: Seções geofísicas Magnetotelúricas 2D com a identificação de domínios condutivos e resistivos.

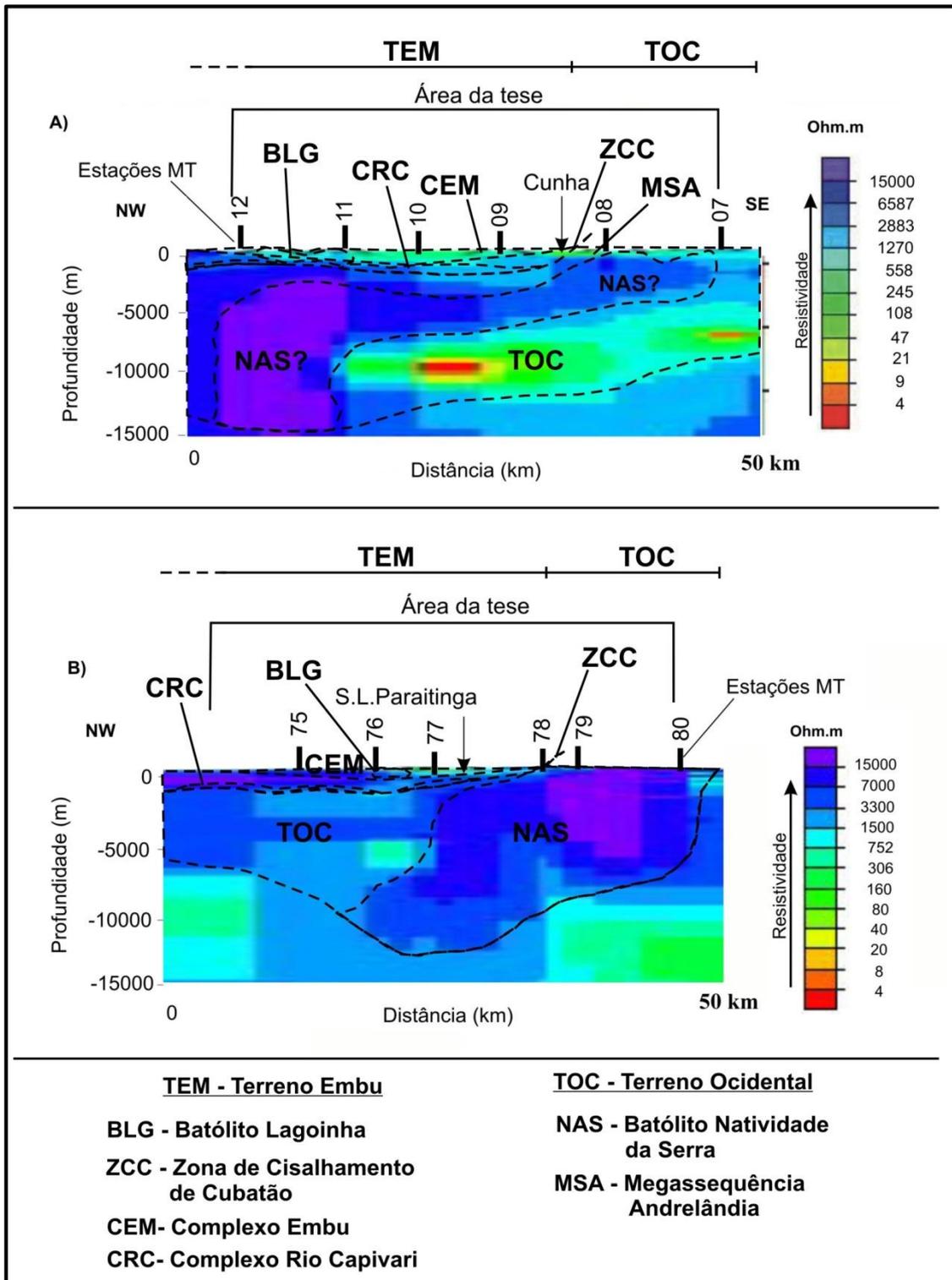


Legenda: A - Seção Norte; B - Seção Sul. Domínios condutivos (C) e resistivos (R). Localização das seções na Figura 3.23.

Fonte: SOLON *et al.*, 2013. Modificado pelo autor, 2015.

A integração entre os dados geológicos e geofísicos para cada seção magnetotelúrica permitiu a elaboração de modelo 2D com a identificação dos aspectos geométricos dos domínios lito-estruturais nos Terrenos Embu e Ocidental (Figura 3.26).

Figura 3.26: Seções geofísicas Magnetotelúricas 2D com a identificação de domínios lito-estruturais.



Legenda: A - Seção Norte; B - Seção Sul. ZCC: Zona de Cisalhamento de Cubatão.

Fonte: SOLON *et al.*, 2013. Modificado pelo autor, 2015.

Os níveis mais rasos do Terreno Embu (Complexo Embu) exibem valores menores de resistividade (abaixo de 700 Ohm.m, na seção norte), e podem estar relacionados à presença de níveis quartzíticos que atuam como condutores. Próximo à ZCC (Figura 3.26-B) observa-se um contraste de valores de resistividade, concordante com o limite lito-estrutural entre os Terrenos Embu (Complexo Embu) e Ocidental (Batólito Natividade da Serra). Os valores no Complexo Embu exibem valores máximos de 700 Ohm.m., enquanto que o Batólito Natividade da Serra possui valores superiores a 7000 Ohm.m. O Batólito Lagoinha, intrusivo no Terreno Embu, exhibe anomalias entre 1200 e 1500 Ohm.m.

No Terreno Ocidental são observados dois padrões de anomalias: o primeiro, menos resistivo, exhibe valores entre 20 e 200 Ohm.m e corresponde aos metassedimentos da Megassequência Andrelândia. O segundo padrão, mais resistivo, possui anomalias superiores a 7000 Ohm.m e estão associadas ao expressivo Batólito Natividade da Serra (Figuras 3.26-A e 3.26-B). A Zona de Cisalhamento de Cubatão registra valores entre 40 e 700 Ohm.m.

Discussões

A Zona de Cisalhamento de Cubatão (ZCC) corresponde à base do Complexo Embu e constitui o seu limite com o Terreno Ocidental. É formada por muscovita biotita filito/xisto miloníticos com espessura aparente entre 500 metros e 3 km, exibindo deformação mais intensa do que aquela observada nos seus terrenos adjacentes, com características de contribuição hidrotermal. Fora da ZCC, os metassedimentos do Complexo Embu registram uma deformação milonítica com espessuras aparentes variáveis. Nos trechos onde a ZCC é menos espessa, a deformação no Complexo Embu alcança espessuras de até 2,5 km. Nos metassedimentos da Megassequência Andrelândia (MSA), a observação da deformação torna-se difícil em função de suas características texturais pretéritas. O Ortognaisse Natividade da Serra exhibe texturas variadas, de fluxo magmático a intensamente deformada (milonítica).

A reativação da Zona de Cisalhamento de Cubatão parece estar associada às falhas NW e à intrusão de corpos pegmatíticos e graníticos, cujos fluidos contribuíram para geração de filonitos, espessamento da ZCC e para a deformação das rochas do Terreno Ocidental. De fato, o Batólito Natividade da Serra exhibe textura milonítica próximo ao lobo sul da ZCC, indicando uma proximidade da zona de cisalhamento reativada.

Quanto às características geofísicas magnetotelúricas, o Terreno Embu exhibe variações de resistividade ao longo de seu domínio. Seus níveis mais rasos possuem valores menores de resistividade ($< 700 \text{ Ohm.m}$), podendo estar relacionado à presença de níveis quartzíticos que atuam como condutores. Longe da Zona de Cisalhamento de Cubatão, o Complexo Embu apresenta altos valores de resistividade, com anomalias acima de 2800 Ohm.m . No Terreno Ocidental os metassedimentos geraram anomalias entre 20 e 200 Ohm.m , sendo, portanto, mais condutivos (ou menos resistivos) que as rochas paraderivadas do Terreno Embu. A Zona de Cisalhamento de

Cubatão registra valores no intervalo de 40 a 700 Ohm.m, englobando tanto os intervalos de resistividade dos metassedimentos do CEM quanto os da MSA.

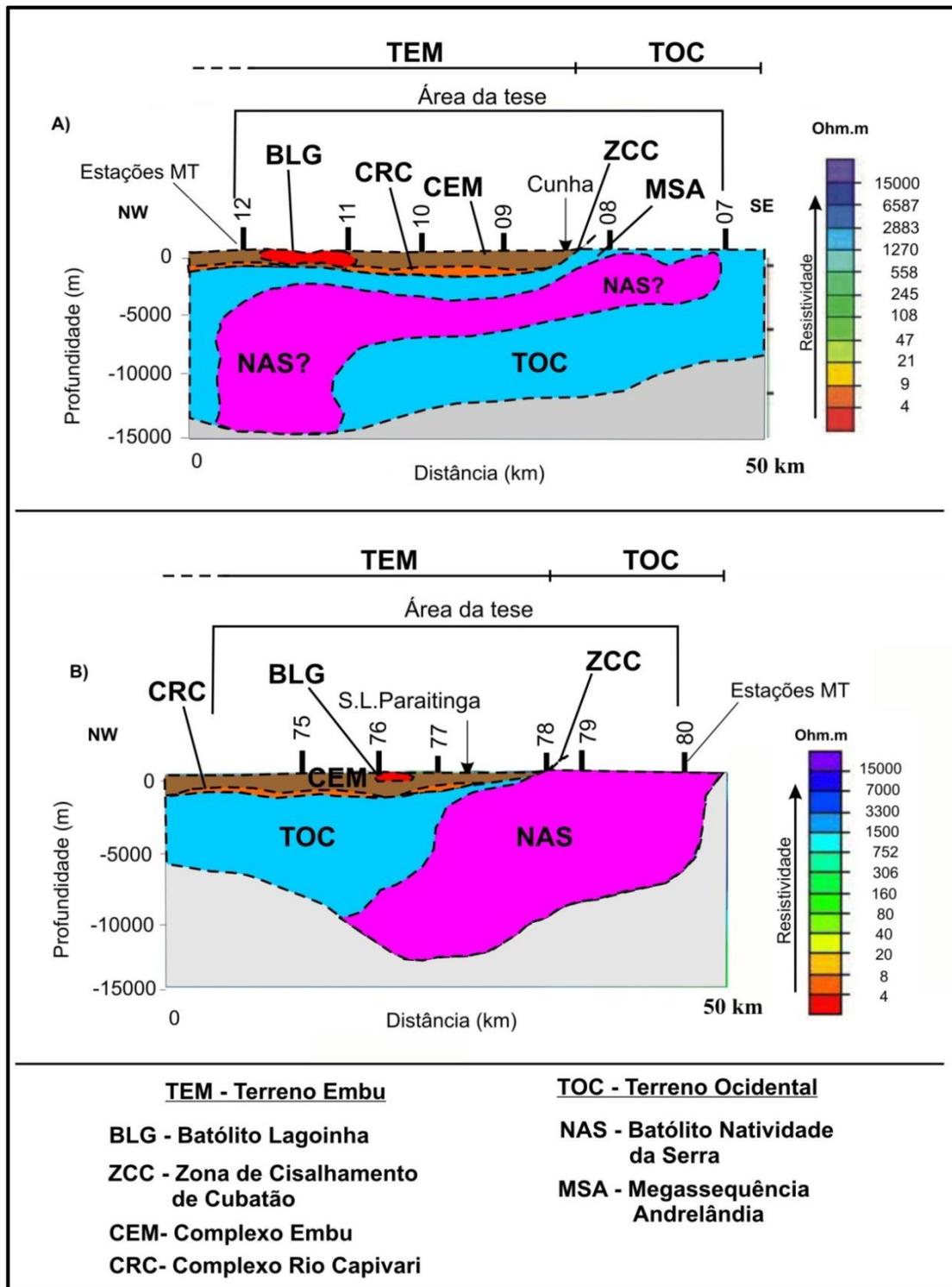
As rochas ortoderivadas em ambos os terrenos exibem valores semelhantes de resistividade. O Batólito Lagoinha, intrusivo no Terreno Embu, apresenta anomalias superiores a 6500 Ohm.m e próximas aos valores observados para o Batólito Natividade da Serra (Terreno Ocidental), com resistividade acima de 7000 Ohm.m.

A geometria da Zona de Cisalhamento de Cubatão, em subsuperfície, é concordante com as informações estruturais observadas em campo, com mergulho de médio ângulo (40°) para NW.

A Figura 3.27 integra as informações dos perfis geológicos com aquelas provenientes da interpretação geofísica magnetotelúrica. O Terreno Embu está sobreposto ao Terreno Ocidental, com limite tectônico de baixo/médio ângulo.

O Batólito Natividade da Serra está intrusivo na Megassequência Andrelândia e, próximo à cidade de São Luiz do Paraitinga, está em contato com os metassedimentos do Complexo Embu. O Batólito Lagoinha aflora a NW da cidade de Cunha e intrude o Complexo Embu.

Figura 3.27: Identificação das unidades metassedimentares e das ortoderivadas presentes nos terrenos Embu e Ocidental com base nas informações geológicas e geofísicas magnetotelúricas.



Legenda: A - Seção norte; B - Seção sul. ZCC - Zona de Cisalhamento de Cubatão.

Fonte: O autor, 2015.

4 ANÁLISE DE PROVENIÊNCIA NAS SEQUÊNCIAS METASSEDIMENTARES

Visando à diferenciação das rochas paraderivadas dos terrenos Embu e Ocidental, foram realizadas análises químicas de rocha total e estudos de proveniência através de geocronologia U-Pb em zircões detríticos.

Os estudos geoquímicos têm como objetivo verificar os padrões dos elementos-traço nas amostras do Complexo Embu, da Megassequência Andrelândia e da Zona de Cisalhamento de Cubatão. As análises visam a identificar se os metassedimentos que afloram na ZCC estão relacionados ao Complexo Embu, à Megassequência Andrelândia ou a ambos.

A geocronologia foi utilizada para diferenciar as idades de proveniência dos metassedimentos dos dois terrenos, aplicada em zircões detríticos através da metodologia U-Pb (ICP-MS-MC-LA).

4.1 Geoquímica das rochas paraderivadas

Foram coletadas 24 amostras de rochas das unidades litológicas do Complexo Embu (Terreno Embu), da Megassequência Andrelândia (Terreno Ocidental) e da Zona de Cisalhamento de Cubatão (Tabela 4.1), visando à caracterização química destes terrenos. A localização das amostras está no Anexo A. As amostras foram fisicamente preparadas no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA), da Faculdade de Geologia da UERJ. Este processo envolveu a britagem e a moagem das rochas, e cada amostra gerou 50g de material pulverizado (rocha total). A análise química foi realizada no *Activation Laboratories (Actlabs)*, no Canadá, através do método ICP (*Inductively Coupled Plasma Techniques*).

Na área desta tese, a escassez de afloramentos de rochas metassedimentares da Megassequência Andrelândia acarretou em uma menor quantidade de análises químicas.

Tabela 4.1: Amostras paraderivadas analisadas quimicamente.

| Amostra | Litotipo | Unidade litológica |
|----------------|----------------------------|--|
| GL-88G | Gnaiss porfiroblástico | Complexo Embu |
| GL-88H | Granada gnaiss | Complexo Embu |
| GL-201B | Gnaiss bandado xistoso | Complexo Embu |
| GL-200F | Biotita gnaiss | Complexo Embu |
| MS-74-B | Gnaiss migmatítico | Complexo Embu |
| SB-L-22-B | Gnaiss | Complexo Embu |
| SB-L-22-E | Gnaiss | Complexo Embu |
| SB-L-22-D | Gnaiss | Complexo Embu |
| SB-L-22-C | Gnaiss migmatítico | Complexo Embu |
| SB-LG-18-B | Biotita gnaiss | Complexo Embu |
| SB-LG-19-B | Gnaiss | Complexo Embu |
| GL-69 | Gnaiss | Complexo Embu |
| MS-64-B | Gnaiss migmatítico | Complexo Embu |
| 10-10-P | Granada biotita gnaiss | Complexo Embu |
| 10-10-W | Biotita gnaiss migmatítico | Complexo Embu |
| 10-10-I | Granada biotita gnaiss | Complexo Embu |
| 10-10-Y | Biotita gnaiss | Complexo Embu |
| 98-1-A | Granada gnaiss | Complexo Embu |
| 98-1-H | Granada gnaiss | Complexo Embu |
| MS-39-E | Biotita filito/xisto | Zona de Cisalhamento de Cubatão (Complexo Embu) |
| MS-39-D | Biotita filito/xisto | Zona de Cisalhamento de Cubatão (Complexo Embu) |
| MS-28-C | Filito/xisto | Zona de Cisalhamento de Cubatão (Megassequência Andrelândia) |
| CN-LG-10-B | Gnaiss milonítico | Megassequência Andrelândia |
| CN-AL-07-B | Gnaiss milonítico | Megassequência Andrelândia |

Fonte: O autor, 2015.

A concentração dos elementos maiores é apresentada na forma de óxidos e em percentagem, com teores superiores a 1%. A concentração dos elementos-traço e de terras raras é apresentada em ppm. Os resultados das análises químicas estão no Anexo D.

Para auxiliar nas interpretações dos dados químicos foi utilizado o software *Petrograph*, versão 2 (PETRELLI *et al.*, 2007). As análises foram distribuídas em três conjuntos: Complexo Embu, Megassequência Andrelândia e Zona de Cisalhamento de Cubatão. Foram gerados os diagramas dos elementos-traço normalizados para crosta continental superior (TAYLOR;

MCLENNAN, 1981) e dos elementos terras raras em relação ao padrão *NASC* (*North American Shale Composite*, HASKIN; FREY, 1966).

4.1.1 Complexo Embu

As amostras selecionadas foram coletadas em afloramentos e em testemunhos de sondagens. As amostras paraderivadas do Complexo Embu foram distribuídas em dois grupos (gnaisse migmatítico e gnaisse com biotita e/ou granada) e analisadas no diagrama padrão de elementos-traço normalizados para crosta continental superior (Figuras 4.1-A e 4.1-B).