

DIVISÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICA

INSTRUÇÃO TÉCNICA DISEGE 01 – 01.07.2020

Orientações gerais para interpretações de dados aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria)

1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o Serviço Geológico do Brasil-CPRM produziu um grande volume de dados aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) em áreas do embasamento cristalino do Brasil. A quantidade de dados gerados e a dimensão das áreas levantadas ultrapassam em muito a capacidade de investigação em trabalhos de mapeamento geológico tradicionais.

Com o objetivo agregar valor aos dados aerogeofísicos, através da disponibilização de produtos de interpretação aerogeofísica, em 2012 foram realizados projetos experimentais na Diretoria de Geologia e Recursos Minerais (DGM) do Serviço Geológico do Brasil, fundamentados na interpretação geofísica-geológica, conforme exemplos mostrados na Figura 1.

Os produtos de interpretação de dados aerogeofísicos e integração geofísico-geológica devem ser entendidos como produtos iniciais para o mapeamento geológico e prospectivo de qualquer área. Aqui são priorizados os termos “interpretação” e “geofísica”, para passar ao leitor o caráter de inferência que o produto possui, e, portanto, não deve ser entendido como mapa geológico.

Esta instrução técnica visa a padronização “mínima” para geração produtos de interpretação de dados aerogeofísicos, fundamentais para subsidiar, principalmente o mapeamento geológico. Esta foi construída com base no relatório interno de Chiarini *et al.* (2013), que trata da proposição de métodos de representação e de interpretações de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria.

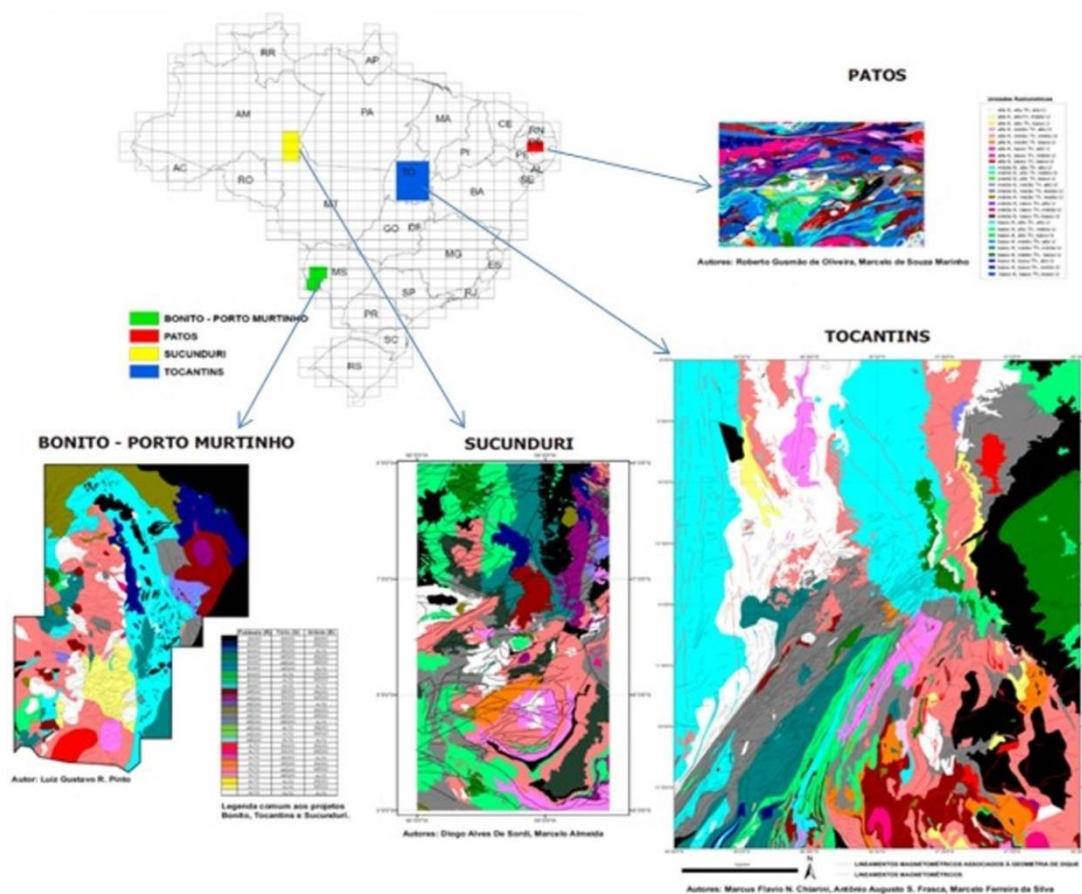


Figura 1 – Ilustração esquemática da distribuição de quatro projetos experimentais de interpretação de dados aerogeofísicos, desenvolvidos em áreas de dimensões e grau de conhecimento geológico distintos: Tocantins (8 folhas 1:250.000), Sucunduri (3 folhas 1:250.000), Bonito-Porto Murtinho (aproximadamente 3 folhas 1:250.000) e Patos (1 folha 1:250.000).

2 – OBJETIVOS

Todos os títulos a serem utilizados nos encartes geofísicos devem iniciar com o método geofísico, seguido do tema específico, como por exemplo:

- Aerogamaespectrometria – Contagem Total;
- Aeromagnetometria - Gradiente Total;
- Aerogravimetria – Anomalia Bouguer.

O principal objetivo deste informativo é a difusão de um padrão mínimo de representações e interpretações, que deve ser utilizado em projetos realizados em áreas com recobrimento aerogamaespectrométrico e aeromagnetométrico.

Os produtos gerados (Mapa de Interpretação Geofísica-Geológica) devem servir de subsídio inicial para o mapeamento geológico tradicional.

Objetivos específicos dos produtos de interpretação:

- Ampliar o entendimento do potencial de recursos minerais da área de trabalho, mediante uma avaliação consistente e detalhada dos dados geofísicos e geológicos, e da relação com ocorrências e depósitos minerais conhecidos;
- Melhorar a compreensão do arcabouço tectônico-estrutural da área de trabalho, por meio de uma interpretação consistente dos lineamentos magnetométricos;
- Gerar um produto que permita a seleção de áreas para detalhamentos geológicos e pesquisas de novos recursos minerais, e por consequência, a diminuição dos custos e prazos;
- Acelerar o conhecimento e a integração geológica de alvos e assinaturas geofísicas observadas nos aerolevantamentos;
- Produzir um método padrão simples de interpretação que possa ser empregado nas diversas regiões.

É importante ressaltar que as peculiaridades de cada projeto devem ser abordadas de forma específica, e que os dados aerogeofísicos podem ser tratados de formas e para finalidades diversas. Os intérpretes não devem concluir sua tarefa com o tipo de produto apresentado aqui, que representa o início da abordagem em uma determinada área.

Os processamentos e representações das interpretações propostas possuem o intuito de serem o mais simples possível, de modo a ser realizado por profissionais com perfis distintos, tornando possível a integração de duas ou mais interpretações adjacentes espacialmente.

O intérprete tem que deixar clara a separação dos fatos e das interpretações. A ambiguidade é intrínseca à qualquer método geofísico. Por exemplo: uma anomalia radiométrica negativa é um fato (pode ser interpretada como relacionada à água, areia, arenito, quartzito, rochas ultramáficas, etc.), no entanto associá-la à determinada rocha sem o mapeamento geológico em campo, é uma interpretação, em geral duvidosa. Outra observação que merece destaque é o fato de que um domínio de ocorrência de determinada rocha pode possuir mais de uma assinatura geofísica, dependendo de fatores como: grau de intemperismo, cobertura vegetal, umidade do solo, diferenças de altura e velocidade da aquisição do dado aerogeofísico, entre outros. Assim como um mesmo domínio de resposta geofísica pode representar mais de um tipo de rocha, como acontece em geral com quartzito e arenito. Daí a importância do mapeamento geológico, que é indispensável.

3 – INTERPRETAÇÃO DE DADOS MAGNETOMÉTRICOS

3.1 – Lineamentos magnetométricos

Na interpretação de lineamentos magnetométricos, sugere-se não discriminar inicialmente que tipo de estrutura está associada aos lineamentos. A interpretação deve basear-se na geometria dos lineamentos. Posteriormente, a discriminação de estruturas pode ser realizada sempre que houver segurança, com a caracterização na legenda dos mapas, representando-se por cores diferentes determinadas estruturas interpretadas que mereçam destaque. Também é interessante avançar no entendimento dos lineamentos magnetométricos quanto a profundidade das fontes, sua representação na superfície/relevo (a partir da interpretação de imagens de sensoriamento remoto), e como estes estão representados em outros produtos geofísicos (gravimetria, sísmica, até mesmo a gamaespectrometria canal do tório, etc.).

Na interpretação de lineamentos magnetométricos, deve-se utilizar os conceitos aqui propostos, que os discriminam em lineamentos de 1ª e 2ª ordens, abaixo caracterizados. A Tabela 1 mostra os principais produtos e suas respectivas características realçadas para interpretação de lineamentos magnetométricos.

3.1.1 – Lineamentos magnetométricos de 1ª Ordem

São os mais expressivos, representados por anomalias com baixa frequência (profundas) e com expressão regional. Em geral marcam grandes estruturas. Apresentam predominantemente traços longos e curvilíneos, que delimitam domínios magnéticos (Figura 2).

As interpretações geológicas mais comuns para esses lineamentos são contatos entre domínios tectônicos, zonas de cisalhamento dúcteis, zonas de cavalgamento, nappes, falhas regionais. Por vezes caracterizam contatos geológicos.

3.1.2 – Lineamentos magnetométricos de 2ª Ordem

São representados por anomalias com alta frequência (rasas), de expressão local. Normalmente, apresentam-se como lineamentos curtos e retilíneos, que definem a trama interna dos domínios magnéticos. Também pode ser a representação local de lineamentos de 1ª ordem. Geralmente, são interpretados como traços superficiais de zonas de cisalhamento rúptil, falhas, fraturas ou superfícies “S”, como foliações (Figura 2).

3.1.3 – Lineamentos magnetométricos associados à geometria de diques

Uma terceira classe de lineamentos foi proposta para destacar os diques de rochas magnéticas, que em geral são corpos geológicos com resposta magnetométrica bem definida e assinatura característica, com padrões regulares, e por vezes extensões regionais.

3.2 – Domínios magnetométricos

Domínios magnetométricos são áreas de movimentação, comprimento de onda, *trend* e amplitudes semelhantes.

A geometria e o arranjo relativos aos domínios magnetométricos fornecem informações acerca da cinemática. Os limites entre domínios magnetométricos podem representar desde fácies em corpos ígneos, contatos, falhas até suturas tectônicas (Figura 3).

Tabela 1 – Resumos dos principais produtos utilizados na interpretação magnetométrica, em que M é o campo magnético anômalo, x e y são direções horizontais e z é a direção vertical. Fonte: Ferreira *et al.* (2010).

Tema	Sigla	Fórmula	Objetivo/Interpretação	Unidade	Referência
Gradiente horizontal (direção x)	DX	$\frac{\partial M}{\partial x}$	Realce de estruturas na direção y	nT/m	-
Gradiente horizontal (direção y)	DY	$\frac{\partial M}{\partial y}$	Realce de estruturas na direção x	nT/m	-
Gradiente vertical (direção z)	DZ	$\frac{\partial M}{\partial z}$	Realce de fontes rasas	nT/m	-
Gradiente horizontal total*	GHT	$\sqrt{\frac{\partial M^2}{\partial x} + \frac{\partial M^2}{\partial y}}$	Os máximos marcam as bordas dos corpos.	nT/m	Cordell e Grauch (1985)
Gradiente total	GT	$\sqrt{\frac{\partial M^2}{\partial x} + \frac{\partial M^2}{\partial y} + \frac{\partial M^2}{\partial z}}$	Centraliza fontes. Todavia perde resolução com a profundidade dos corpos	nT/m	Roest, verhoef e Pilkington (1992); Li (2006)
Inclinação do sinal analítico	ISA	$\tan^{-1}\left(\frac{Dz}{GHT}\right)$	Equaliza fontes. Corpos rasos e profundos com amplitudes similares	rad	Miller e Singh (1994)
Theta map*	ThetaMap	$\cos^{-1}\left(\frac{GHT}{GT}\right)$	Equaliza fontes. Os máximos marcam os centros dos corpos	rad	Wijns, Perez e Kowalczyk (2005)
Inclinação do gradiente horizontal total*	IGHT	$\tan^{-1}\left(\frac{GHT}{ Dz }\right)$	Equaliza fontes. Os máximos marcam as bordas dos corpos	rad	Cooper e Cowan (2006)
Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total*	ISA_GHT	$\tan^{-1}\left(\frac{\frac{\partial GHT}{\partial z}}{\sqrt{\frac{\partial GHT^2}{\partial x} + \frac{\partial GHT^2}{\partial y}}}\right)$	Equaliza fontes. Os máximos marcam as bordas dos corpos.	rad	Ferreira <i>et al.</i> (2013)
Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico	GHT_ISA	$\sqrt{\frac{\partial ISA^2}{\partial x} + \frac{\partial ISA^2}{\partial y}}$	Independente da inclinação do campo magnético. Os máximos marcam as bordas dos corpos.	rad/m	Verduzco <i>et al.</i> (2004)

*Comumente utilizados em dados reduzidos ao polo.

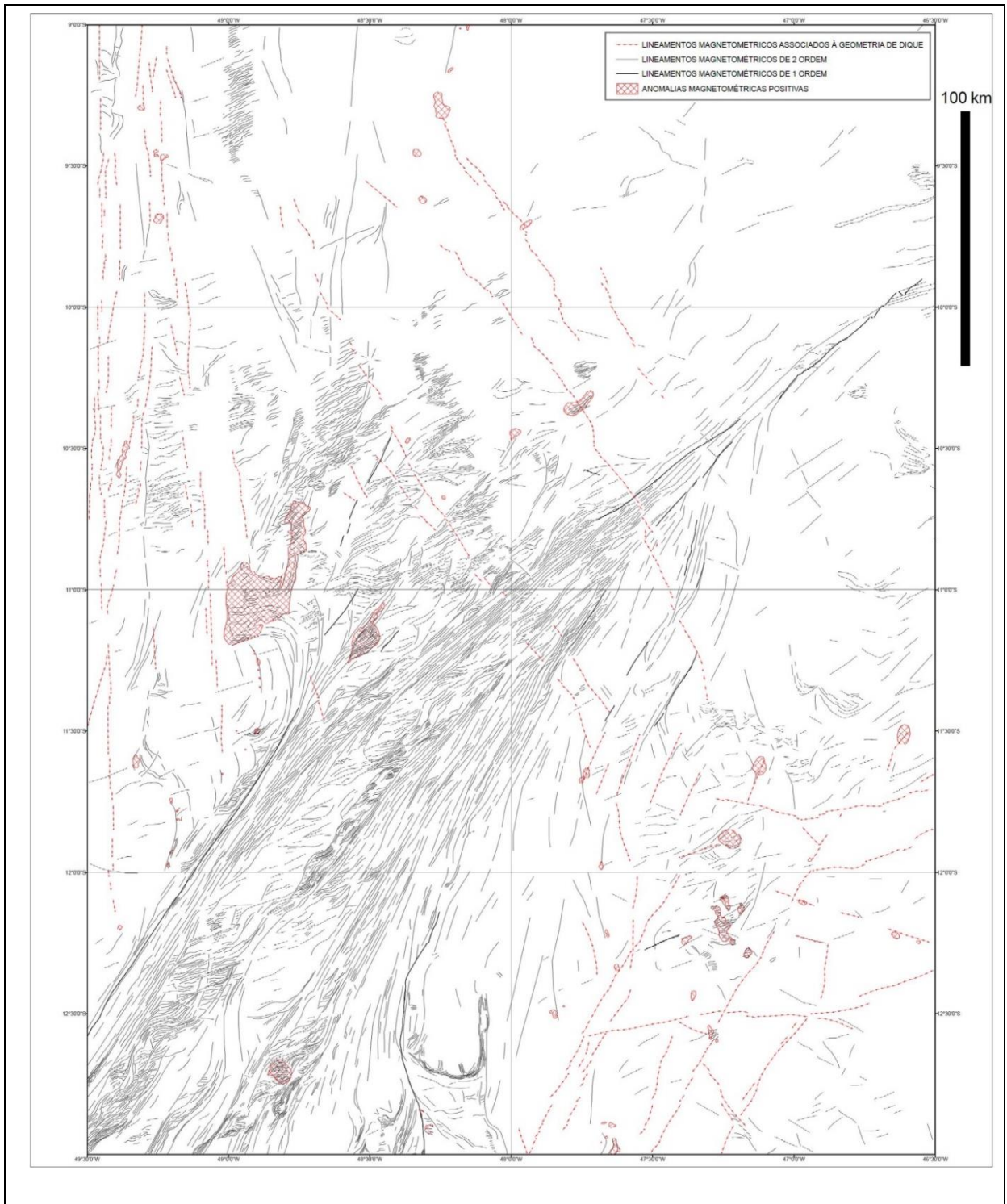


Figura 2 – Exemplo de mapa de interpretação de lineamentos magnetométricos.

Fonte: Chiarini e Frasca (2012).

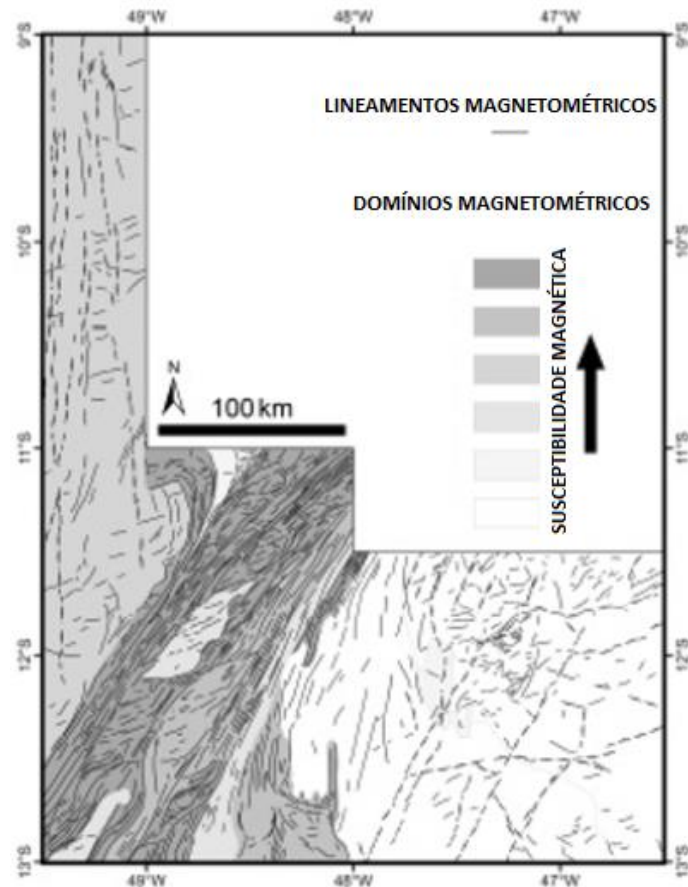


Figura 3 – Domínios magnetométricos interpretados. Fonte: Chiarini e Frasca (2012).

Na individualização de domínios magnetométricos, e para não poluir o mapa de interpretação, deve-se optar por representar anomalias positivas (altos gradientes de amplitude) em polígonos vazados, com trama isométrica (não direcional). Se o interesse maior da área forem anomalias magnetométricas negativas, como por exemplo na pesquisa de granitos reduzidos com potencial para estanho, a melhor opção seria representar somente as anomalias negativas.

4 – INTERPRETAÇÃO DE DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

A discriminação de domínios com assinaturas gamaespectrométricas similares deve ser realizada em todos os projetos, em sua fase inicial, pois esta análise é fundamental para subsidiar a cartografia geológica. Produtos gamaespectrométricos também são importantes para pesquisa de recursos minerais, por exemplo, realçam alteração hidrotermal, que pode ser evidenciada nos mapas do Potássio Anômalo e Fator F.

Para interpretação dos produtos gamaespectrométricos e geração dos mapas geofísico-geológicos, idealmente a representação dos domínios gamaespectrométricos interpretados deve ser realizada de modo que se tenha similaridade entre os mapas produzidos por diferentes intérpretes. Deve ser realizada uma avaliação discriminatória qualitativa entre concentrações de cada radioelemento em três classes, de baixo, médio e alto teor relativo.

As discussões acerca da linha de corte entre as classes baixa/média e média e alta são pertinentes e subjetivas. Mesmo os dados estando convertidos em concentração, ainda não é possível integrá-los, pois restam algumas correções minuciosas que devem ser realizadas. Na prática, quando o conjunto de dados possui grandes dimensões, os parâmetros estatísticos tendem a se assemelhar. Como a distribuição dos teores dos elementos radioativos não seguem uma distribuição normal (Gaussiana) perfeita (caudas simétricas em relação à média), e sim tendem a log-normal, se atribuirmos uma constante a ser somada e

subtraída da média como linha de corte entre as classes, as classes não ficariam com o mesmo número de amostras. Por exemplo: média - ½ do desvio padrão (baixa/média) e média + ½ do desvio padrão (média/alta). Neste caso haveria mais amostras para os teores baixos. Como não se quer “privilegiar” nenhuma classe, sugere-se que as linhas de corte sejam 33,33...% e 66,66... % da frequência acumulada. Desta forma todas as classes terão o mesmo número de amostras.

Como a subjetividade da interpretação por vezes supera a diferença entre alguns métodos, estamos tratando de algo próximo ao preciosismo.

O número de 27 classes se aproxima da mesma ordem de grandeza da legenda de um mapa geológico, além da simplicidade que é desejada. Lembrando que nem sempre todas as classes ocorrerão, por exemplo é raro ocorrer baixo K, baixo eTh e alto eU.

A tabela 2 ilustra a composição de cores sugerida. Nos dados utilizamos 16.777.216 composição de cores RGB (256 x 256 x 256) e nas interpretações arbitramos 27 cores (3 x 3 x 3) “equiespaçadas em tonalidade” para conferir o maior contraste possível e facilitar a analogia com os dados. A Figura 4 ilustra as características que devem ser adotadas nas representações de domínios gamaespectrométricos.

Tabela 2 – Composição de cores utilizada na interpretação de gamaespectrometria.

K eTh eU	RÓTULO	RGB	COR
baixa.baixa.baixa	111	000.000.000	
baixa.baixa.média	112	000.000.128	
baixa.baixa.alta	113	000.000.255	
baixa.média.baixa	121	000.128.000	
baixa.média.média	122	000.128.128	
baixa.média.alta	123	000.128.255	
baixa.alta.baixa	131	000.255.000	
baixa.alta.média	132	000.255.128	
baixa.alta.alta	133	000.255.255	
media.baixa.baixa	211	128.000.000	
media.baixa.média	212	128.000.128	
media.baixa.alta	213	128.000.255	
média.média.baixa	221	128.128.000	
média.média.média	222	128.128.128	
media.média.alta	223	128.128.255	
media.alta.baixa	231	128.255.000	
media.alta.média	232	128.255.128	
media.alta.alta	233	128.255.255	
alta.baixa.baixa	311	255.000.000	
alta.baixa.média	312	255.000.128	
alta.baixa.alta	313	255.000.255	
alta.média.baixa	321	255.128.000	
alta.média.média	322	255.128.128	
alta.média.alta	323	255.128.255	
alta.alta.baixa	331	255.255.000	
alta.alta.média	332	255.255.128	
alta.alta.alta	333	255.255.255	

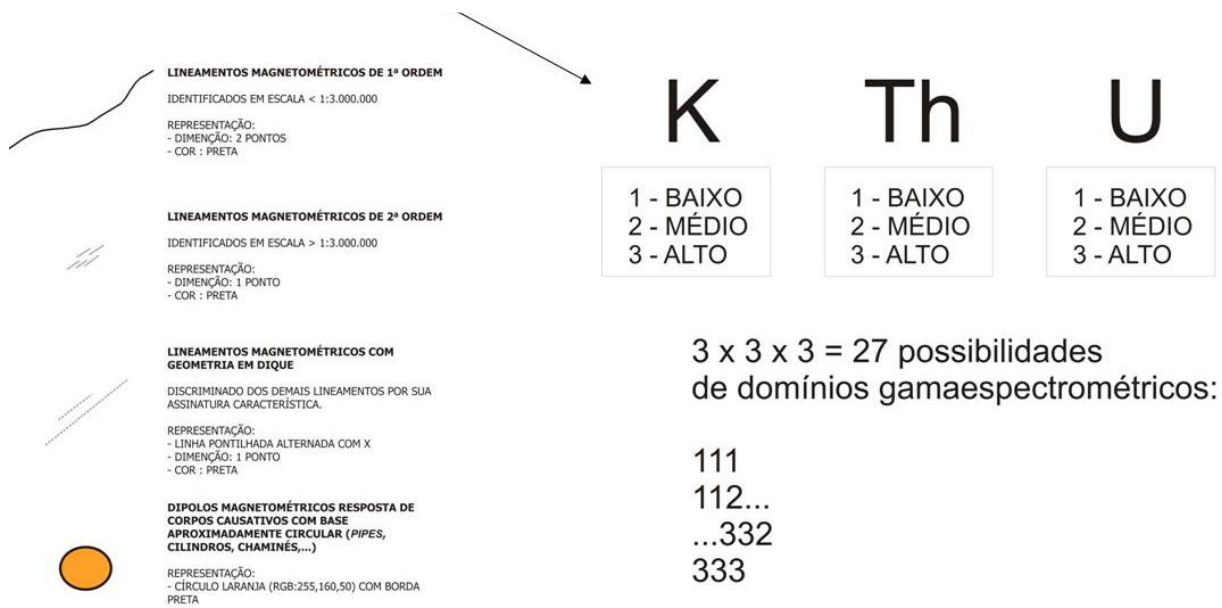


Figura 4 – Ilustração da atribuição de cores (RGB) aos domínios discriminados.

O intérprete pode e deve usar da subjetividade para ressaltar geometrias e feições que forneçam informações estruturais e cinemáticas, do contrário, bastaria uma classificação automática dos dados. A figura 5 exemplifica essa subjetividade.

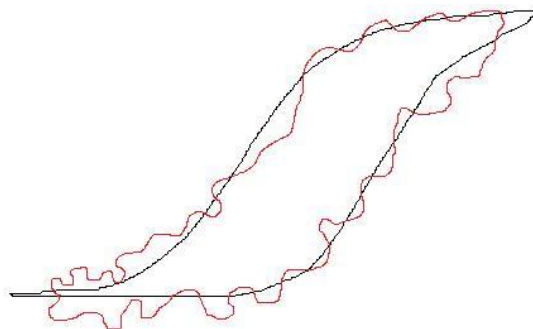


Figura 5 – Exemplo de extrapolação do intérprete (linha preta) para atribuir feições com indicadores cinemáticos, ou seja, uso da subjetividade. A linha vermelha representa o limite da classe levando-se em conta o valor dos pixels.

Os seguintes aspectos devem ser considerados durante a interpretação:

- Plotar recursos minerais com o intuito de estudar assinaturas e/ou feições diagnósticas;
- Balizar os domínios gamaespectrométricos em estruturas magnetométricas (quando possível);
- Utilizar do Modelo Digital de Elevação (MDE) ou Modelo Digital do Terreno (MDT) oriundo de sensores remotos de alta resolução, utilizando principalmente as quebras negativas, como auxílio no traço dos limites dos domínios gamaespectrométricos;
- Atentar à geometria dos polígonos e relações de corte, pois estas fornecem interpretações cinemáticas e cronológicas;
- Evitar lineamentos magnetométricos de 1º ordem com excesso de segmentos.
- Em áreas com mineralizações controladas por estruturas, utilizar a deconvolução de Euler.
- As figuras 6 e 7 exemplificam o resultado final da interpretação dos dados aerogeofísicos.

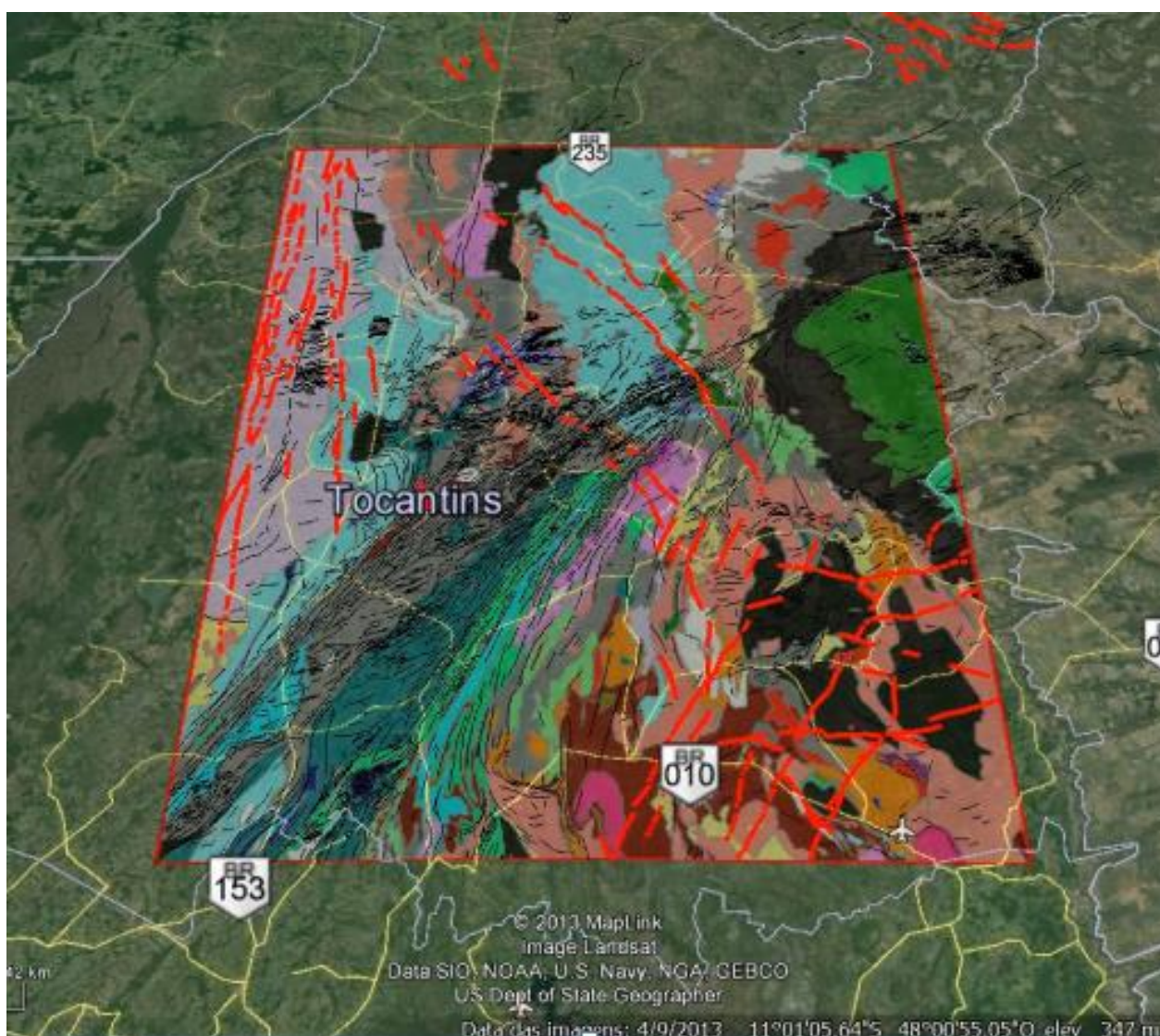


Figura 6 – Imagem esquemática do mapa produzido no Projeto de Interpretação e Integração Geofísica-Geológica – Tocantins (8 folhas na escala 1:250.000) em perspectiva no *Google Earth*. Fonte: Chiarini e Frasca (2012).

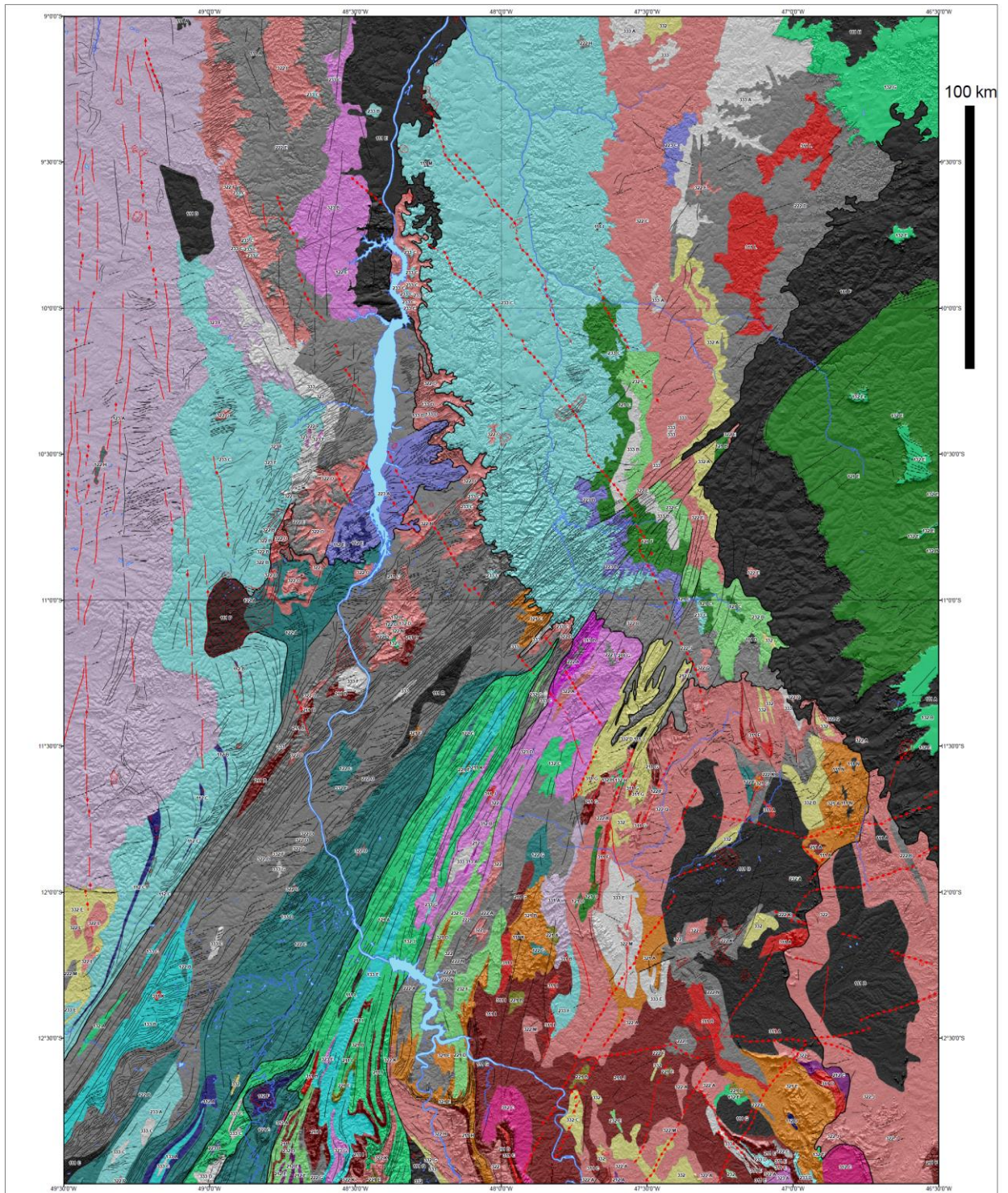


Figura 7 – Ilustração esquemática do Mapa de integração geofísico-geológica do projeto referido na figura 6. Fonte: Chiarini e Frasca (2012).

5 – INTEGRAÇÃO E CORRELAÇÃO DAS INTERPRETAÇÕES COM A BASE DE DADOS LITOLÓGICOS

Domínios gamaespectrométricos com propriedades semelhantes podem representar assinaturas geofísicas de vários tipos de rocha, exemplo: o rótulo 111 (baixo K, baixo eTh e baixo eU) pode estar associado a ultramáficas, areia, arenito, quartzito, água, etc., assim como o rótulo 333 (alto K, alto eTh e alto eU) pode representar granito, sienito de alto potássio, etc.

Na etapa de correlação das interpretações com dados de litologia sugere-se a discriminação desses domínios de mesmo rótulo geofísico, associando um tipo de rocha predominante, conforme apresentado na Figura 8.

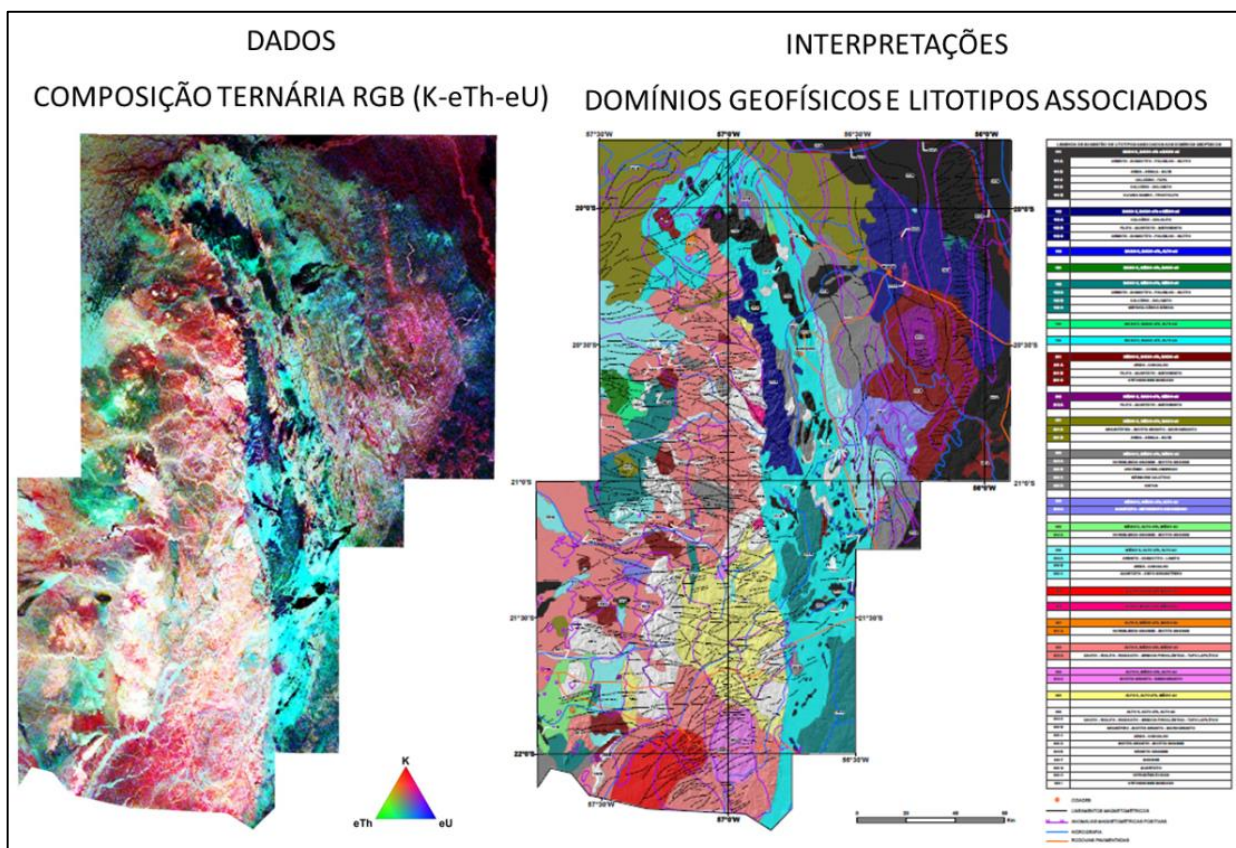


Figura 8 – Ilustração que permite a comparação dos dados (à esquerda) às interpretações (à direita). As interpretações foram realizadas com a integração de informações de mapa geológico no milionésimo, Modelo Digital de Terreno, estações geológicas e dados estruturais de projetos históricos. Fonte: Pinto (2012).

Para a integração dos domínios gamaespectrométricos aos dados geológicos deve-se utilizar a base de dados de afloramentos, base de litologia disponível, além de informações da bibliografia sobre a área de estudo, a mais completa possível, incluindo relatórios da CPRM, dissertações, teses, periódicos, etc...

O modelo padrão de layout do mapa geofísico-geológico resultante da interpretação e integração de dado é disponibilizado como anexo a este documento.

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Cada área possui suas peculiaridades que devem ser estudadas com processamentos e interpretações dirigidas, que podem ser variáveis em função da experiência do responsável pela interpretação. O método aqui apresentado é aplicável a qualquer projeto realizado em uma área com dados de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria, com espaçamento entre linhas de 500 m ou próximo a este valor. As particularidades de cada área, assim como os objetivos do projeto, devem ser

abordadas de maneira exclusiva, para atender as especificidades, conforme exemplos abaixo:

- Projeto com interesse na pesquisa de granitos estaníferos (reduzidos): enfatizar as anomalias negativas magnetométricas;
- Projeto com interesse em avaliar potencial de ETR: realçar os altos valores gamaespectrométricos (normalizados).

Esta instrução visou fornecer orientações gerais para interpretações de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, que devem estar em constante evolução, e contribuições sempre serão muito bem-vindas. É importante ressaltar que interpretação de dados indiretos não substitui dados de campo, de modo que um mapa geológico só pode ser assim chamado, mediante levantamentos geológicos sistemáticos de campo.

7 – REFERÊNCIAS

CHIARINI, M. F. N.; FRASCA, A. A. S. **Projeto de Interpretação e Integração Geofísica-Geológica – Tocantins**. Relatório Interno. [S.l.]: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012.

CHIARINI, M. F. N. *et al.* **Proposição de métodos de representação e de interpretação de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria**. Relatório Interno. [S.l.]: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2013. 29 p.

COOPER, G. R. J; COWAN D. R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 10, p. 1585-1591, 2006.

CORDELL, L.; GRAUNCH, V. J. S. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. *In*: HINZE, W. J. (ed). **The Utility of regional gravity and magnetic anomalies maps**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1985. p. 181-197.

FERREIRA, J. F. F. *et al.* Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 4., 14-17 nov. 2010, Brasília, DF. **Resumos expandidos...** Brasília: SBGf, 2010.

FERREIRA, F. J. F. *et al.* Enhancement of the total horizontal gradiente of magnetic anomalies using the tilt angle. **Geophysics**, v. 78, n. 3, p. J33-J41, 2013.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p. L13-L16, 2006.

MILLER, H. G.; SINGH. V. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**, v. 32, n. 2-3, p. 213-217, 1994.

PINTO, L. G. R. **Projeto de interpretação e integração geofísica-geológica – Bonito – Porto Murinho**. Relatório Interno. [S.l.]: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2012.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57, n. 1, p. 116-125, 1992.

VERDUZCO, B. *et al.* New insights into magnetic derivatives for structural mapping. **The Leading Edge**, v. 23, n. 2, 116-119, 2004.

WIJNS, C.; PEREZ, C.; KOWALCZYK, P. Theta map: Edge detection in magnetic data. **Geophysics**, v. 70, n. 4, p. L39-L43, 2005.

AUTORES

Flávio Nogueira Chiarini
Luiz Gustavo Rodrigues Pinto
Antônio Charles de Oliveira