



Inversão 2D de dados magnetométricos com modelos prismáticos: Aplicação em enxame de diques

Felipe Lisbona Cavalcante^{1,2}, Carlos Alberto Mendonça¹

¹IAG-USP; ²CAPES - PROEX

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

The inversion of magnetic data to characterize dyke swarms is a challenging problem due to complexity of the anomalies arisen from multiple sources in different depth levels and with variable magnetic properties. It makes difficult to account for the number of dyke unities along a profile as well as unambiguous estimates about position, depth to the top and magnetization properties for single unities. We develop a procedure to obtain mean properties for juxtaposed dykes by using non-linear data inversion for thin-sheet models, with subsequent cluster analysis of the obtained solutions. This procedure is implemented in Python by program INV DYKE according a sequential inversion approach, initially inverting a non-sensitive quantity to the magnetization direction and then the magnetic anomaly itself. INV DYKE is validated with numerical simulations and then applied to real data sets from the dyke swarm of the Ponta Grossa Arch to identify mean parameters describing the associated magnetic sources.

Introdução

Um problema na interpretação de dados de magnetometria para enxame de diques é que a diversidade de diques justapostos, com profundidades e propriedades diferentes, produz anomalias interferentes e complexas. Para agravar o problema, dependendo da polaridade da magnetização, a sobreposição das anomalias pode gerar efeitos destrutivo-constructivos dificultando a determinação de um número mínimo de diques compatível com as anomalias observadas. Essa limitação também compromete as estimativas de profundidade e de magnetização para as unidades que compõem o enxame.

O presente trabalho apresenta o programa INV DYKE, desenvolvido em Python, para modelagem (problema direto) e inversão de anomalias magnéticas bidimensionais (2D) tais como observadas em enxames de diques. Apesar da importância do tema em estudos de geologia regional, magmatismo continental em províncias ígneas e, mais recentemente, de hidrogeologia (Dickson et al., 2014), não existe técnica quantitativa que se aplica especificamente ao problema de enxames de diques.

No módulo de inversão, o INV DYKE incorpora uma abordagem de inversão por etapas, inicialmente invertendo uma grandeza invariante com a direção de magnetização (mas dependente da profundidade do topo e da intensidade de magnetização) para, em seguida, determinar a inclinação de magnetização a partir da inversão da anomalia magnética. A primeira etapa do procedimento permite a identificação de um número mínimo de diques, que se manifestam por máximos locais na intensidade de campo anômalo.

Nesse trabalho, o programa INV DYKE é testado considerando níveis crescentes de dificuldade. No primeiro nível, utilizam-se perfis com até uma dezena de fontes, com espaçamento suficientemente largo para se identificar o número correto de prismas. No segundo teste, o enxame de diques é representado por dezenas de fontes, produzindo um padrão complexo de anomalias que deixa muitas unidades sem expressão no campo resultante. Nessa condição a recuperação de todas as unidades não é obtida com unicidade. Visando avaliar a representatividade dos modelos obtidos por inversão nessa condição incorporou-se no programa INV DYKE, um módulo de análise estatística baseado na técnica de *cluster analysis* (Kaufman e Rousseeuw, 2005). Essa abordagem consiste em verificar se os parâmetros médios de profundidade e de magnetização podem ser recuperados pela solução obtida com a inversão de dados. Essa análise busca reconhecer se, na impossibilidade de se identificar todos os parâmetros que caracterizam os diques em um enxame, se pelo menos os parâmetros médios do agrupamento podem ser determinados. O número de agrupamentos pode ser inferido a partir do resíduo produzido pela análise de grupo utilizando um número crescente de grupos.

Por fim, aplicamos o INV DYKE para inverter perfis que interceptam o enxame de diques do Arco de Ponta Grossa, com subsequente análise convencional (“perfil curto”) e de grupo (“perfil longo”).

Metodologia

O programa INV DYKE utiliza a representação por prismas finos (*thin sheet*) de Ku&Sharp (1983) cujos parâmetros são representados na Figura 1.

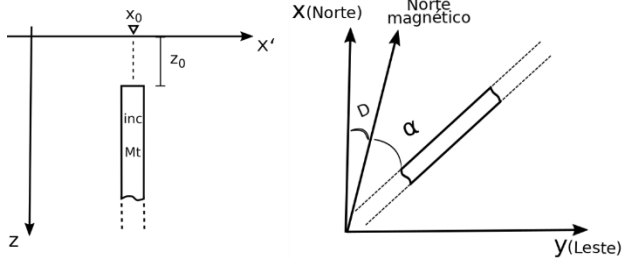


Figura 1: Modelo de prismas fino. Visão em seção (esquerda) e em planta (direita). Parâmetros do modelo: posição do prisma ao longo do perfil (x_0), profundidade do topo (z_0), inclinação da magnetização (i), produto entre intensidade de magnetização e espessura (Mt), ângulo entre strike e norte magnético (α), declinação magnética (D). Profundidade (z) positiva para baixo e direção do perfil (x') crescente na direção Sul-Norte transversal ao dique.

Abordagens de inversão por etapas de dados magnéticos (Tuma, 2006; Liu et al, 2015), têm em comum a inversão de grandezas invariantes com a direção de magnetização. A Figura 2 esquematiza as formulações dos problemas direto e inverso, que representa o enxame de diques por um conjunto de n prismas, cada um associado a quatro parâmetros.

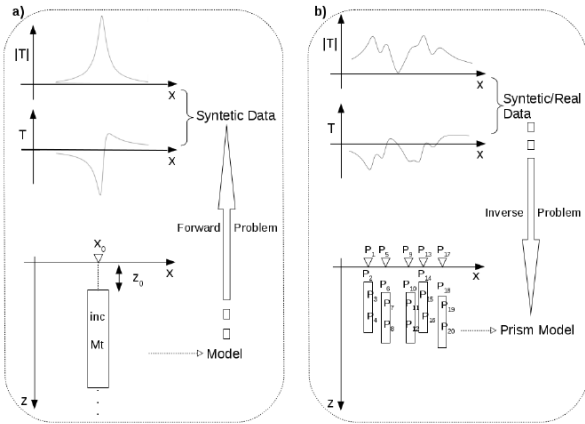


Figura 2: a) Problema direto: cálculo da resposta magnética para um modelo prismático. b) Problema inverso: a partir dos dados medidos em perfil, determina os parâmetros para um modelo com n prismas ($n = 4$ na figura).

Na abordagem utilizada pelo INVDYKE, a inversão é feita em duas etapas (Figura 3). A primeira etapa inverte a intensidade do campo anômalo ($|T|$)

$$|T| = \sqrt{T_x^2 + T_y^2},$$

sendo T_x e T_y as componentes horizontais ortogonais da anomalia de campo total. Para fontes 2D, a grandeza $|T|$ não depende da intensidade de magnetização, permitindo que os parâmetros de posição (x_0) e, profundidade (z_0), bem como o produto Mt (intensidade de magnetização, M e espessura do dique, t) sejam determinados atribuindo-se valores arbitrários para a inclinação de magnetização. Após a obtenção desses parâmetros inverte-se a anomalia de campo total (T_t)

tendo como referência os parâmetros obtidos na etapa anterior, incorporando porém como incógnita a inclinação da magnetização.

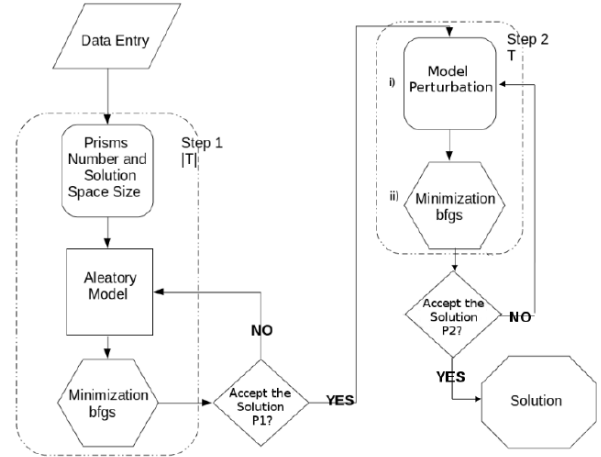


Figura 3: Fluxograma de inversão por etapas do programa INVDYKE.

Testes com dados sintéticos

A Figura 4 apresenta o resultado da inversão para um modelo contendo 10 prismas que, como tal, se enquadra no primeiro nível de complexidade discutido anteriormente.

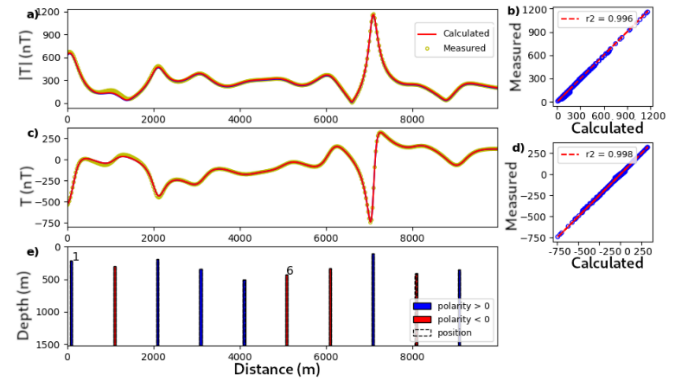


Figura 4: Resultado da inversão com INVDYKE. a) Ajuste para a intensidade do campo anômalo, curva vermelha refere-se ao calculado pelo programa e os círculos aos dados medidos. b) r^2 para $|T|$. c) Ajuste para anomalia de campo total. d) r^2 para T_t . e) Disposição de prismas obtida pelo INVDYKE. Tracejado representa a posição dos prismas geradores do dado sintético, azuis e vermelhos prisma obtidos pela inversão com polaridades reversa e normal da inclinação da magnetização respectivamente.

Os testes de consistência com dados sintéticos mostram a eficácia do programa INVDYKE em termos de convergência e capacidade de recuperar parâmetros do modelo verdadeiro. Na Figura 4, destaca-se o posicionamento correto dos prismas obtidos na inversão de dados, que praticamente se sobrepõem aos prismas

do modelo verdadeiro. O ajuste dos dados tem R^2 próximo de 1.

A Figura 5 mostra o resultado para a inversão de um modelo sintético contendo 50 prismas, subdivididos em três grupos, simulando o segundo nível de complexidade.

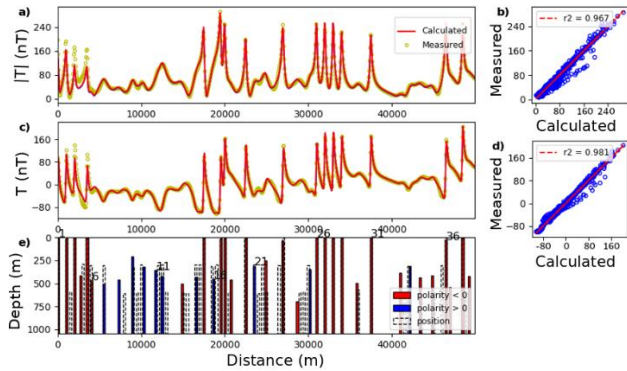


Figura 5: Resultado da inversão com INVDYKE para modelo sintético composto por 50 prismas.

O resultado da inversão para o modelo composto por 50 prismas (Figura 5) ilustra outro aspecto importante; os padrões construtivos e destrutivos na composição das anomalias fazem com que alguns prismas não sejam identificáveis, seja na anomalia de campo total ou na intensidade do campo anômalo. Como consequência, o ajuste aos dados pode ser realizado utilizando um número menor de prismas (39, nesse caso). Mesmo nessas condições, a *cluster analysis*, (Figura 6) identifica três grupos distintos, mostrando que a população de diques obtida na inversão de dados pode ser considerada (em termos de agrupamento) como sendo uma amostragem do modelo verdadeiro. Nota-se que os centroides do modelo verdadeiro e do modelo obtido por inversão são muito próximos. Tal comportamento mostra que é possível utilizar o modelo obtido por inversão, não para recuperar os parâmetros de todos os prismas, mas para recuperar os parâmetros médios e de agrupamento. Para casos reais, essa abordagem pode fornecer informações relevantes sobre um enxame de diques ao reconhecer propriedades comuns que eventualmente podem assinalar episódios distintos de intrusão (gerações de diques).

A Figura 6 mostra o comparativo entre os resultados do módulo de *cluster analysis*, para o modelo sintético (50 prismas/três grupos) e sua inversão.

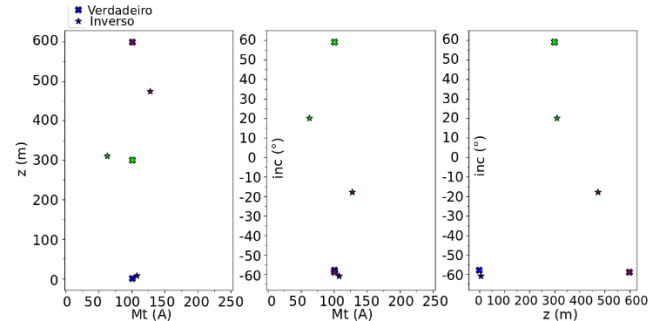


Figura 6: Resultado do módulo de cluster analysis do INVDYKE para o modelo sintético com 50 prismas. Símbolos: x = centroide do modelo verdadeiro (sintético), estrela = centroide para resultado da inversão.

Aplicação em dados reais

Para testar o programa INVDYKE em dados reais, utilizamos dois perfis do aerolevante Paraná – Santa Catarina (1095) executado pela CPRM, que cobre a porção sudeste do Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG) Figura 7. Dois perfis (A e B) foram considerados; o primeiro representando um perfil curto; o segundo representando o cenário de transecta, no qual uma caracterização regional do enxame é considerada. Em afloramentos, o EDAPG apresenta densidade de diques entre 1,5 a 4 diques/km, originados em pelo menos nove episódios intrusivos (Raposo,1995). As anomalias magnéticas mostram padrões interferentes, no geral impossibilitando o reconhecimento de um número mínimo de prismas que poderia representar a anomalia magnética observada.

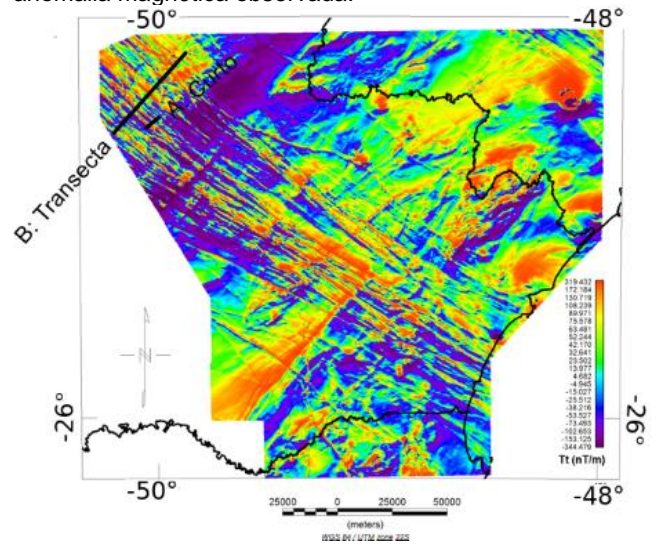


Figura 7: Anomalia magnética de campo total (T_t), do Projeto Paraná – Santa Catarina com localização dos perfis A e B (transecta) transversais às anomalias associadas ao Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG).

A Figura 8 mostra o resultado da inversão para o perfil A que pode ser representado por um número m 18 prismas.

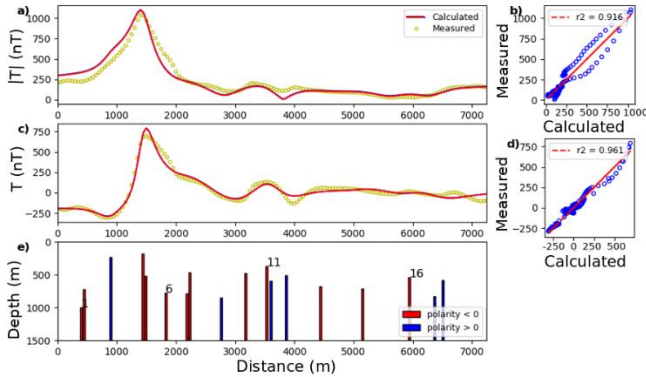


Figura 8: Resultado da inversão com INVDYKE para o perfil A (curto). Direção de magnetização normal (azul) e reversa (vermelha). Ajuste aos dados com R^2 maior que 0,9 para $|T|$ e T .

Para o perfil **A** (curto), a inversão pelo INVDYKE identifica um número mínimo de 18 prismas (Figura 8) e fornece ajuste aos dados que recupera as principais feições dos dados medidos. O ajuste difere dos dados em detalhes ou feições localizadas, provavelmente associadas a fontes locais (ruído geológico).

A Figura 9 mostra o resultado da inversão para o perfil **B** (transecta), cujo modelo, para garantir ajuste aos dados, teve que incorporar 51 prismas.

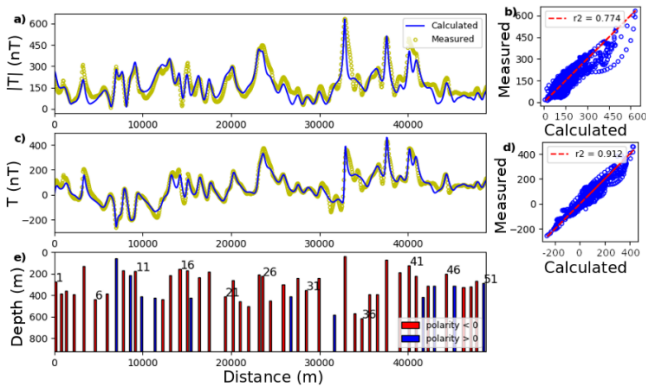


Figura 9: Resultado da inversão com INVDYKE para o perfil **B: Transecta**. Ajuste aos dados com R^2 maior que 0,7 para $|T|$ e maior que 0,9 para T .

Para o perfil **B** mesmo utilizando 51 prismas (204 incógnitas na inversão), o programa obteve convergência, recuperando as principais feições na maior parte do perfil. O ajuste difere dos dados também em feições localizadas mas o parâmetro R^2 de ajuste é menor que no caso anterior.

O algoritmo *k-means* (Hartigan e Wong, 1979) utilizado no módulo de *cluster analysis* requer que o número de grupo seja estabelecido a priori. A Figura 10 apresenta a variação da norma do resíduo (distância entre cada elemento na população em relação ao centróide do grupo) calculado para um número crescente de grupos.

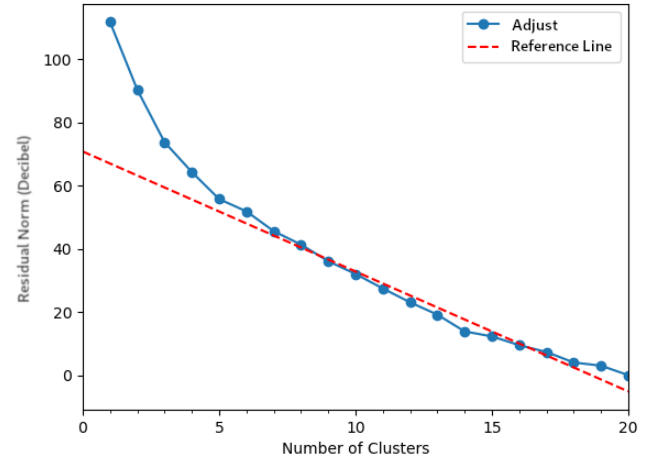


Figura 10: Gráfico da norma do resíduo pelo número de clusters (20 primeiros) para o perfil B. Infere-se um número mínimo de grupos (igual a 5, nesse caso) tendo como referência a aproximação linear (reta vermelha) obtida por ajuste das soluções $n > 10$ (nesse caso). A partir do ponto de inflexão (ou de descolamento) a norma dos resíduos é ajustada pela linha de referência. Decibel calculado em relação ao resíduo para $n=20$.

Pela Figura 10 observa-se que a norma do resíduo decai a zero, no limite em que o número de grupos se iguala ao número de elementos na população. A linha de referência mostra que a partir do número de grupos igual a 5, o resíduo decai monotonicamente. A partir desse ponto de inflexão (ou de descolamento da tendência linear) o grau de ajuste depende apenas da escolha do número de grupos. Pode-se, assim, considerar que o ponto de descolamento representa o número mínimo de grupos que permite caracterizar intrínsecos à população.

A Figura 11 mostra o resultado da *cluster analysis* utilizando 5 grupos.

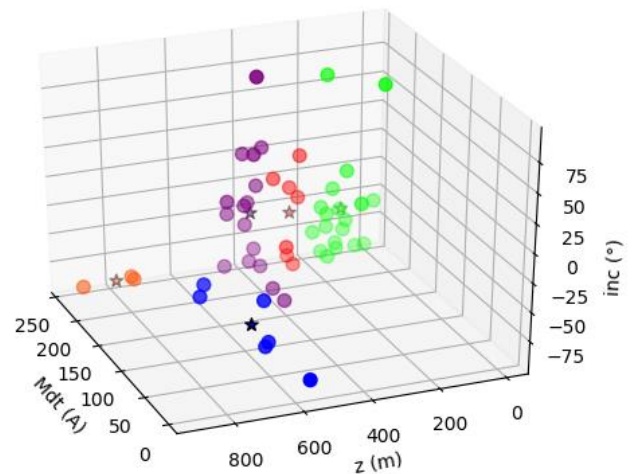


Figura 11: Resultado do módulo de *cluster analysis* do INVDYKE para o perfil B. Os círculos coloridos indicam os grupos inferidos pelo algoritmo e as estrelas seus centróides.

Conclusões

A aplicação do módulo de *cluster analysis* no perfil B (transecta) identificou cinco grupos (Figura 11) no modelo de mostrado na Figura 9. Basicamente essa análise reconhece grupos de diques (gerações?) com profundidades médias entorno de 100, 300, 400, 600 e 800 m, e dois agrupamentos de inclinação de magnetização em -45 e -83° , muito embora exista amostras de duas polaridades de magnetização (normal/reversa) no resultado da inversão. Estudos de simulação (não apresentados nesse trabalho) apontam que a inclinação da magnetização é um dos parâmetros com caracterização mais difícil pela análise de grupo. Em termos de produto Mt os diques apresentam valores centrados entre 93 e 225 A. Isso pode indicar diques com espessuras em dois grupos, caso a intensidade de magnetização não variar significativamente. O real significado da inferência pela análise de grupo requer a inserção de novas informações que, além da caracterização por afloramentos, incorporem também dados de poço, pois nem todas as unidades são aflorantes. A inferência de cinco grupos, entretanto, é compatível com resultados (9 gerações) obtidos por Raposo (1995) que, no caso, considerou também diques com orientação NE, sem expressão marcante nos dados aeromagnéticos. De um modo geral, é de se esperar que o número de grupos obtidos por dados remotos (aerogeofísicos) seja menor que o obtido em escala de afloramento, até mesmo se considerarmos que diques menores ou mais profundos podem passar sem resposta magnética marcante.

Os testes realizados mostram que o programa INVDYKE é eficaz no estudo de enxame de diques, visto que se mostrou efetivo nos diversos testes aplicados. Acreditamos que a abordagem implementada nesse programa pode contribuir com diversos estudos relacionados a enxame de diques, tanto em problemas de geologia regional quanto de estudos mais localizados buscando, por exemplo, modelos de transmissividade hidráulica em estudos de hidrologia (Dickson et al., 2014).

Agradecimentos

À CAPES – PROEX pelo financiamento do projeto de Mestrado de Felipe Lisbona Cavalcante. À CPRM pelo fornecimento dos dados e apoio.

Referências

Dickson, N. E. M., Comte, J-C., McKinley, J., & Offerdinger, U. 2014. Coupling ground and airborne geophysical data with upscaling techniques for regional groundwater modelling of heterogeneous aquifers: Case study of a sedimentary aquifer intruded by volcanic dykes in Northern Ireland. *Water Resources Research*, 50(10), 7984-8001. 10.1002/2014WR015320.

Hartigan, J. A., Wong, M. A., (1979). Algorithm AS 136: A k-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* Vol.28, No. 1 (1979), pp. 100-108.

Ku, Chao C. e Sharp, John A., 1983. Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and

its Refinement using Marquart's inverse modelling. *Geophysics* vol. 48, p. 754 – 774.

Liu, S., Hu, X., Xi, Y., Liu, T. and Xu, S., 2015. 2D sequential inversion of total magnitude and total magnetic anomaly data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, 80(3), K1-K12.

Tuma, S. L., 2006. Inversão por etapas de anomalias magnéticas bidimensionais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Projeto Paraná – Santa Catarina (1095) :http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/sobre_geosgb.html

Raposo, M. I. B., 1995. Episódios intrusivos no Arco de Ponta Grossa, determinados através de um estudo paleomagnético. *Brazilian Journal of Geology*, 25(1), 03-19.