

## Interpretação de anomalias magnéticas interferentes: estudo aplicado ao VMS de Brunswick No. 12, Canadá

Vanessa Biondo Ribeiro\*, DGEO/UFPE; Marta S. M. Mantovani, IAG/USP, Vinicius H. A. Louro, IAG/USP

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII 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.

### Resumo

Brunswick No. 12 is a volcanogenic massive sulfide (VMS) classified as a world class deposit. Despite its strong magnetic contrast due to high concentration of pyrrhotite, the deposit signal is overshadowed by a strong anomaly generated by nearby iron formations. In this work, we isolated the magnetic signature of the Brunswick No. 12 and estimated the 3D magnetic model of the deposit. The apparent magnetization isosurface including areas with anomalous magnetic contrast associated with the deposit was compared and agreed with the geological model previously defined for Brunswick No. 12.

### Introdução e Geologia da Área

O Bathurst Mining Camp (BMC), Canadá, é um distrito mundialmente conhecido por hospedar mais de 30 depósitos tipo Volcanogenic Massive Sulphide (VMS) e dezenas de ocorrências menores. Goodfellow e McCutcheon (2003 apud Goodfellow et al., 2003) destacam que aproximadamente 70% dos depósitos no BMC foram descobertos através de investigações geológicas, geofísicas e geoquímicas. Segundo Goodfellow et al. (2003), a liberação dos mapas geofísicos de BMC levaram a descoberta do depósito de Camelback e a identificação de diversas anomalias ainda a serem avaliadas quanto ao seu potencial exploratório (Chung, 2003; Keating et al., 2003). Esse contexto evidencia o potencial para descobertas de novos depósitos não apenas no Canadá, mas no mundo inteiro. Entretanto, muitos alvos exploratórios não apresentam indícios de afloramento e o sinal geofísico pode estar mascarado pela presença de corpos com maior contraste (magnético, gravimétrico, etc.) próximos. Nesse caso, a identificação direta a partir dos dados geofísicos aéreos pode ser extremamente difícil. Exemplo disso é a assinatura magnética do depósito de Brunswick No. 12 (Fig. 1 e 2). Apesar desse VMS apresentar um contraste magnético significativo com a rocha encaixante (Fig. 2), sua anomalia é parcialmente mascarada pelo sinal gerado pela formação basáltica Nepisiguit Falls (Onf - Fig. 1).

O complexo de Brunswick, no Canadá, foi formado durante uma colisão do tipo continente-continente no final do Ordoviciano e início do Siluriano (450–440 Ma, Malehmir et al., 2013). Ainda segundo esses autores, a Formação Nepisiguit Falls (Fig. 01) contém rochas vulcânicas félsicas e vulcanoclásticas, e compõe a parte

mais antiga do Grupo Tetagouche. Os derrames de basaltos alcalinos da Formação Little River formam a porção mais nova desse grupo. A Formação Flat Landing Brook (FLBF) contem derrames de riolitos (Fig. 1). O depósito de Brunswick é observado na parte superior da Formação Nepisiguit Falls e inclui uma mistura de sulfetos, carbonatos, óxidos e fácies silicáticas. Esse horizonte é a chave para a exploração geofísica e geoquímica dos depósitos no BMC (Gross e McLeod, 1980).

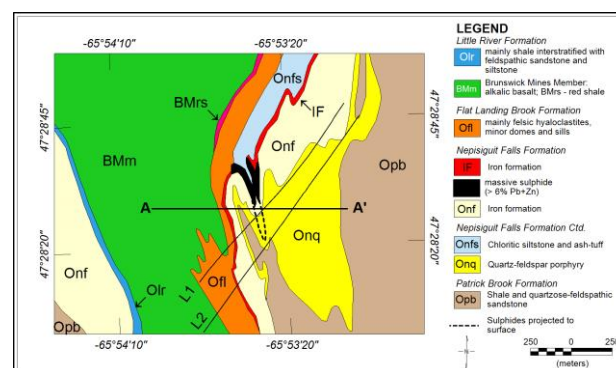


Fig. 1 – Mapa geológico simplificado da região de Brunswick No. 12 (Thomas et al., 2000).

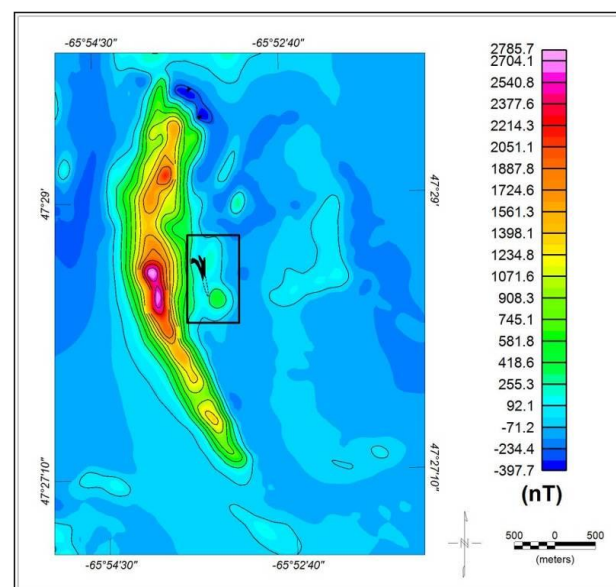


Fig. 2 – Campo magnético residual da região de Brunswick No. 12. O retângulo preto localiza a região omitida para a reinterpolação.

**Interpretação Magnética**

O campo magnético residual de Brunswick No. 12 foi interpolado pela mínima curvatura, considerando uma janela de 40 m (Fig. 2). A componente residual foi removida pela Natural Resources Canadá (<http://www.nrcan.gc.ca>) pela subtração do campo internacional de referência (*International Geomagnetic Reference Field - IGRF*) para o período da aquisição (Keating et al., 2003). Nesse mapa são observadas duas anomalias magnéticas positivas próximas ao contorno do sulfeto proposto por Thomas et al. (2000). Essas anomalias são paralelas a margem leste de uma anomalia positiva maior com intensidade acima de 2250 nT, associada aos basaltos alcalinos na região (BMm - Fig. 01). Uma vez que essa anomalia maior mascara a assinatura do depósito, decidimos implementar a estratégia proposta por Li e Oldenburg (1998) para realçar o sinal do VMS:

Passo 1 - Seleção da área correspondente à anomalia de interesse (depósito VMS – retângulo preto na Fig. 2),

Passo 2 - Subtração dessa área do mapa de campo magnético e reinterpolação do mesmo. O mapa magnético utilizado nessa etapa foi selecionado de forma a conter a anomalia regional observada inteira (Fig. 2).

Passo 3 – Inversão dos dados magnéticos reinterpolados após o passo 2 (Fig. 3). Essa inversão visa obter um modelo grosseiro da fonte magnética associada a anomalia regional.

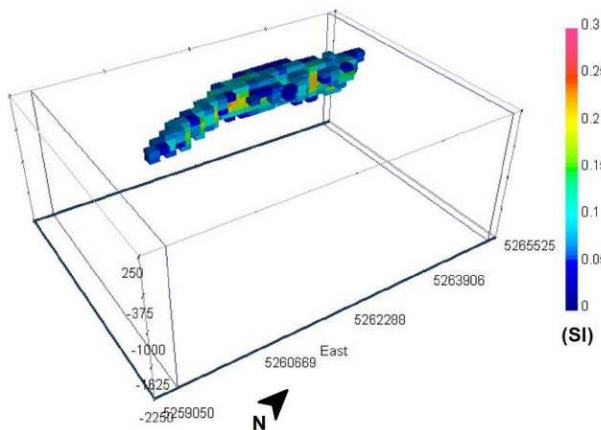


Fig. 3 – Modelo 3D em perspectiva obtido pela inversão da anomalia magnética associada aos basaltos alcalinos.

Passo 4 – o campo magnético gerado pelo corpo basáltico invertido (Fig. 4) foi subtraído do campo magnético residual original (Fig. 2). Essa fase nos permitiu isolar a anomalia magnética do depósito de Brunswick No. 12 (Fig. 5).

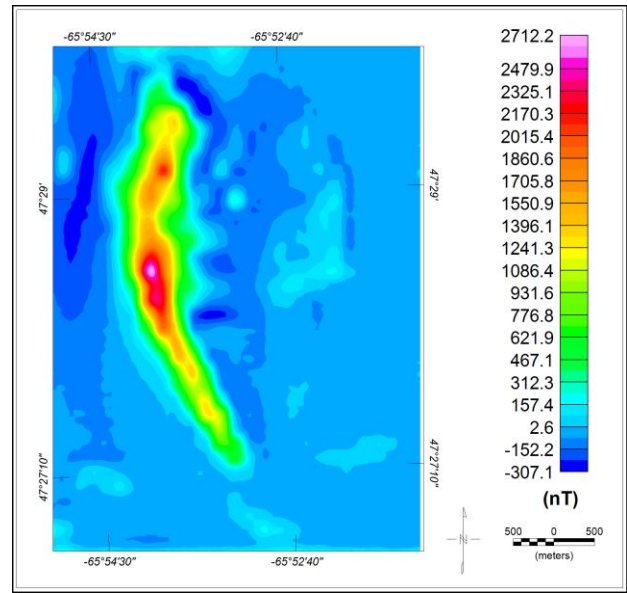


Fig. 4 – Mapa do campo magnético gerado pelo corpo 3D modelado na Fig. 3.

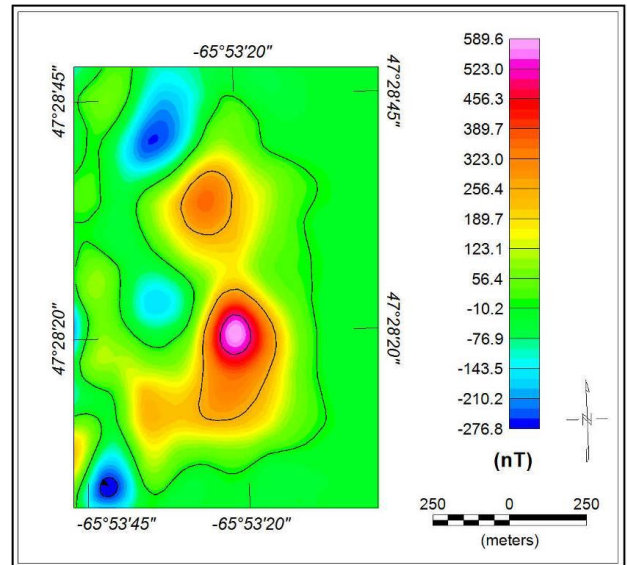


Fig. 5 – Mapa do campo magnético residual de Brunswick No. 12 obtido após a subtração da componente magnética (Fig. 4) associada à formação basáltica.

**Modelo 3D de Brunswick No. 12**

Todos os parâmetros das inversões realizadas nesse trabalho foram definidos com base nas características do aerolevante (espaçamento de linhas e altura de voo) e da geologia local (contraste de susceptibilidade

entre as litologias). As inversões foram feitas através do algoritmo MAG3D (University of British Columbia – Geophysical Inversion Facility/UBC-GIF) (Li e Oldenburg, 1996).

O MAG3D considera uma malha de células retangulares regulares. O algoritmo busca ajustar o contraste de susceptibilidade dentro de cada célula sem alterar suas dimensões durante a inversão.

O dado magnético não contém informações sobre a profundidade, portanto uma função peso para a profundidade foi aplicada à matriz de sensibilidade. Essa função balanceia o decaimento natural da resolução do sinal magnético com a profundidade. Para evitar a ambiguidade nos resultados finais, todas as inversões realizadas utilizaram como vínculos contrastes de susceptibilidade e furos de sondagem disponíveis em Luff et al. (1992) apud Langton (1992), Telford et al. (1990) e Thomas et al. (2000).

A inversão da anomalia regional forneceu um corpo com contraste de susceptibilidade magnética aparente positivo na porção oeste do mapa (Fig. 4), consistente com o comportamento dos basaltos alcalinos da formação BMm (Fig. 1).

Para o resultado da inversão 3D ser considerada uma solução matemática aceitável, os mapas de resíduos obtidos em cada etapa foram analisados e, caso apresentasse valores acima de 10% do valor máximo da amplitude magnética amostrada, a inversão era descartada e o processo reiniciado. Os parâmetros e vínculos utilizados na inversão da anomalia associada à formação BMm (Fig. 1) é apresentada na Tabela 1.

O mapa obtido para a anomalia magnética isolada de Brunswick No. 12 (Fig. 5) apresenta duas anomalias ovais associadas ao sulfeto muito mais intensas (~590 nT) do que as observadas no mapa inicial (~350 nT, Fig. 02).

A inversão da anomalia de Brunswick No. 12 isolada (Fig. 5) apresentou um contraste de susceptibilidade aparente positivo com a rocha encaixante. O corpo gerado tem um formato alongado em profundidade com extensão maior na direção N-S (Fig. 06). O modelo 3D obteve um contraste de susceptibilidade aparente de 0,022 a 0,063 (S.I.), consistente com os valores de Thomas et al. (2000) para amostras de furos efetuados em Brunswick No. 12 (sulfetos maciços:  $0,051 \pm 0,124$  S.I.) e da encaixante ( $0,39 \pm 0,82 \cdot 10^{-3}$  S.I.). Os vínculos utilizados nessa inversão são apresentados na Tabela 2.

O modelo invertido para Brunswick 12 obteve resíduo máximo de 10.2 nT, representando 1.73% da amplitude máxima da anomalia magnética associada ao depósito (Fig. 6). Atendendo a prerrogativa de um erro menor do que 10% estabelecido. O modelo recuperou uma distribuição de susceptibilidade continua em profundidade. Ele possui uma profundidade máxima de 850 m, aproximadamente 250 m mais superficial do que o modelo geológico apresentado por Thomas et al. (2000) (Fig. 7). Esse modelo representa uma solução matemática aceitável para o campo magnético invertido,

e não necessariamente representa os limites heterogêneos da litologia em profundidade. Adicionalmente, o ponto forte dos métodos potenciais é a delimitação lateral da fonte anômala, mas não são tão eficazes na determinação da profundidade. Por essa razão são esperadas divergências entre a extensão vertical do modelo geológico e da inversão.

O modelo 3D obtido para o depósito (Fig. 6) apresenta boa correlação com a seção vertical com direção N-S do modelo geológico proposto Luff et al. (1992 apud Langton, 1992) a partir de furos de sondagem (Fig. 8).

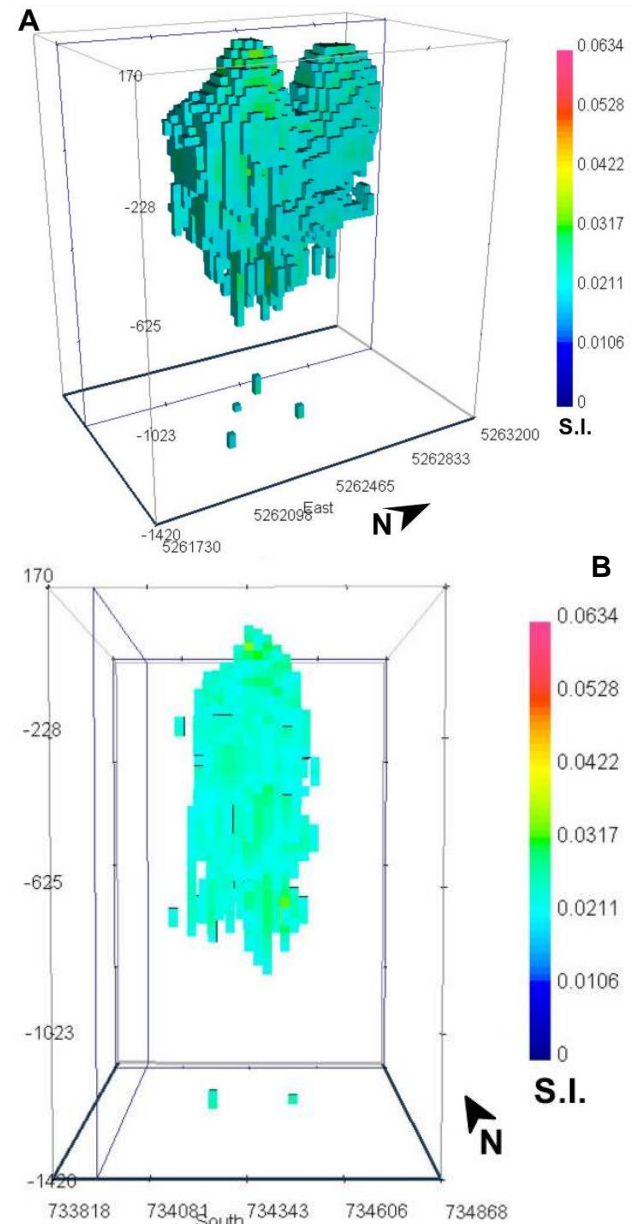


Fig. 06 – Modelo 3D da anomalia magnética “isolada” de Brunswick No. 12 em (A) perspectiva e (B) visão sul.

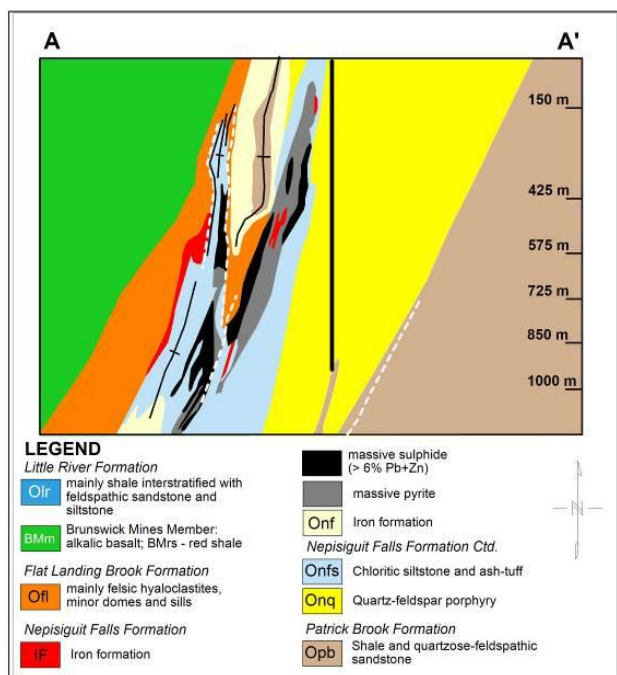


Fig. 07 – Seção perpendicular do perfil A-A' (Fig. 1) do modelo geológico proposto por Thomas et al. (2000) para o depósito de Brunswick No. 12.

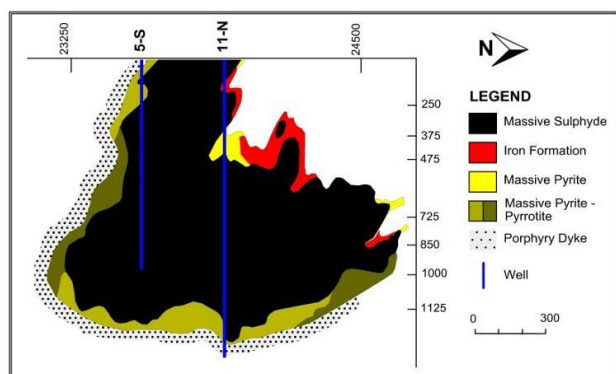


Fig. 08 – Visão leste do modelo geológico proposto por Luff et al. (1992 apud Langton, 1992) com base em furos de sondagem.

## Discussão e Conclusões

Segundo Thomas et al. (2000), a maior parte dos afloramentos do depósito de Brunswick No. 12 coincide com a porção sul da anomalia magnética localizada ao norte da área apresentada, com amplitude de aproximadamente 350 nT (Fig. 2). Esses autores também sugerem que a extensão não aflorante do corpo com direção S-SE (linha pontilhada na Fig. 1 e 2) é associada a amplitudes menores do campo magnético. Eles relacionam esse decaimento do campo magnético com uma possível mudança na mineralogia do sulfeto, com

minerais como pirita, calcopirita, pirrotita, esfarelita e galena, presentes em diferentes concentrações, dependendo da área (Luff, 1992 apud Langton, 1992).

Após remover a componente magnética associada aos basaltos alcalinos da formação BMm (Fig. 1), foi observado um comportamento geofísico bem diferente para o depósito (Fig. 5). O mapa residual da anomalia isolada (Fig. 5) apresentou um sinal magnético mais forte ao sul do depósito, e não ao norte como observado por Thomas et al. (2000) no mapa de campo magnético residual da área inteira (Fig. 2).

King et al. (2007) estabelece que a pirrotita em particular pode apresentar razões de Königsberg (Q) altas, com valores acima de 10. Essa razão é definida pela divisão entre a componente remanescente e a induzida da magnetização total. De acordo com esses autores, isso permite que corpos com susceptibilidade relativamente baixa gerada por pirrotita disseminada produzam anomalias significativas com uma componente de magnetização remanescente expressiva. No caso de Brunswick No. 12, a magnetização remanescente associada a pirrotita pode ser responsável pela anomalia mais forte observada ao sul do corpo sulfetado.

Muitos depósitos do BMC, e no mundo, são associados com anomalias magnéticas discretas ou mascaradas por outras maiores. O procedimento adotado para isolar e destacar a anomalia de Brunswick No. 12 nesse trabalho provou ser uma etapa muito importante para uma compreensão melhor de anomalias magnéticas contidas nesse tipo de cenário. O modelo 3D obtido por esse procedimento recuperou comportamento em profundidade condizente com o esperado por vários trabalhos geológicos publicados em literatura sobre esse depósito.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que o procedimento estabelecido para realçar a anomalia magnética do depósito de Brunswick No. 12 compõe uma ferramenta importante para a identificação e caracterização de possíveis novos alvos exploratórios.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Natural Resources Canada (<http://www.nrcan.gc.ca>) por fornecer os dados essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

## Referências

- Chung, C. F. 2003. Use of aero geophysical surveys for constructing mineral potential maps. *Economic Geology Monograph* 11, p. 879–891.
- Goodfellow, W. D. 2003. Geology and genesis of the Caribou deposit, Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canadá: *Economic Geology Monograph* 11, p. 327–360.
- Goodfellow, W. D; McCutcheon, S. R. 2003. Geologic and genetic attributes of volcanic sediment-hosted massive

sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick — a synthesis. *Economic Geology Monograph* 11, p. 245–301.

Gross, G. A.; McLeod, C. R. 1980. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formations in Canadá. *Can. Mineral*, n. 18, p. 223–229.

Keating, P.; Thomas, M. D.; Kiss, F. 2003. Significance of a high resolution magnetic and electromagnetic survey for exploration and geologic investigations, Bathurst Mining Camp. *Economic Geology Monograph* 11, p. 783–798.

King, A. 2007. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *Ore deposits and exploration technology*. Paper 45.

Langton, J. P. (compiler). 1992. Massive sulphide deposits and geology in Northern New Brunswick. Geological Association of Canadá, Mineralogical Association of Canadá, Joint Annual Meeting, Wolfville. Field trip C-6, Guidebook, 53 p.

Li, Y.; Oldenburg, D. W. 1996. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, vol. 61, no. 2; p. 394-408.

Li, Y.; Oldenburg, D. W. 1998. Separation of regional and residual magnetic field data. *Geophysics*, vol. 63, no. 2, p. 431–439.

Luff, W. M., Goodfellow, W. D., Juras, S. J. 1992. Evidence for a feeder pipe and associated alteration at the Brunswick No. 12 massive-sulfide deposit. *Exploration and Mining Geology*, vol. 1, p. 167-185.

Malehmir, A., (8 co-autores). 2013. A review of reflection seismic investigations in three major metallogenic regions: The Kevitsa Ni–Cu–PGE district (Finland), Witwatersrand gold fields (South Africa), and the Bathurst Mining Camp (Canadá). *Ore Geol. Rev.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.003>.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sherif, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 860.

Thomas, M. D. (5 co-autores). 2000. *Geophysical Atlas of Massive Sulphide Signatures Bathurst Mining Camp, New Brunswick*. Geological Survey of Canadá Open File D3887. New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Minerals and Energy Division, Open File 2000-9. ISSN 1205-7150. ISBN 1-55236-753-3.

*Tabela 01 – Parâmetros utilizados na inversão dos dados magnéticos da formação BMm (Fig. 1).*

<b>Parâmetros da malha de interpolação</b>			
<b>Eixos</b>	<b>X (Leste)</b>	<b>Y (Norte)</b>	<b>Z (Vertical)</b>
Extensão total	4725 m	6475 m	4375 m
Número de células	27	37	25
Tamanho das células	175	175	175
Coordenadas do ponto superior SW	732250 m	5259050 m	250 m acima do nível do mar
<b>Vínculos da Inversão</b>			
Limite superior de susceptibilidade (S.I.)	0.3		
Limite inferior de susceptibilidade (S.I.)	0.0001		
Modelo inicial	0.001		
Modelo de referência	0		
Length Scales (L <sub>x</sub> , L <sub>y</sub> , L <sub>z</sub> )	1	1	1
<b>Parâmetros da Inversão</b>			
Direção e magnitude do campo IGRF	Inclinação: 71.40°	Declinação: -20.40 °	Amplitude: 54888. nT
Parâmetros do campo MAG3D (incl, decl, geomag)	71.40°, 20.40°, 54888 nT		
Parâmetros do campo MAG3D (aincl, adecl, dir)	71.40°, 20.40°, 1		
Número de dados de entrada	5704		
Erro do dado de entrada	5 nT mais 2% amplitude do campo no ponto		
Resíduo obtido pela inversão	356.7		

Tabela 02 – Parâmetros utilizados na inversão do depósito de Brunswick No. 12.

<b>Parâmetros da malha de interpolação</b>			
<b>Eixos</b>	<b>X (Leste)</b>	<b>Y (Norte)</b>	<b>Z (Vertical)</b>
Extensão total	1160	1520	1670
Número de células	36	48	53
Tamanho das células	1*50, 2*40, 30*30, 2*40, 1*50	1*50, 2*40, 42*30, 2*40, 1*50	40*30, 10*35, 3*40
Coordenada do ponto SW superior da malha	733818 m	5261730 m	250 m acima do nível do mar
<b>Vínculos da inversão</b>			
Limite superior de susceptibilidade (S.I.)	0.055		
Limite inferior de susceptibilidade (S.I.)	0.0001		
Modelo inicial	0.001		
Modelo de referência	0.050		
Length Scales (L <sub>x</sub> ,L <sub>y</sub> ,L <sub>z</sub> )	0.1	0.1	1
<b>Parâmetros de inversão</b>			
Direção e magnitude do campo IGRF	Inclinação: 71.40°	Declinação: -20.40 °	Amplitude: 54888 nT
Parâmetros do campo MAG3D (incl, decl, geomag)	71.40°, 20.40°, 54888 nT		
Parâmetros do campo MAG3D (aincl, adecl, dir)	71.40°, 20.40°, 1		
Número de dados de entrada	9280		
Erro dos dados de entrada	5 nT mais 2% amplitude do campo no ponto		
Resíduo obtido pela inversão	10.2 nT		