

Modelagem e Inversão de dados Gravimétricos em Terrenos Granitóide-Greenstone: Regiões de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás

“O propósito dos modelos não é ajustar os dados mas afiar as questões”

SAMUEL KARLIN

“A meta da teoria inversa é determinar os parâmetros a partir das observações ou, em face das inevitáveis limitações das atuais medições, encontrar o máximo possível com elas.”

ROBERT L. PARKER.

8.1 APRESENTAÇÃO

Neste capítulo, os dados do levantamento gravimétrico feito nas regiões de Crixás e Itapaci (LGCI, Capítulo 6) são apresentados sob a forma de perfis, em sua maioria, transversais aos *greenstone belts* de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás.

O objetivo dessa apresentação é modelar, por inversão, os dados gravimétricos e aeromagnéticos para obter a maior quantidade de parâmetros possíveis. Como existe ambigüidade de solução para estes tipos de dados, mesmo trabalhados em conjunto, foram utilizadas informações adicionais como geologia conhecida (Figura 6.2), densidades obtidas em laboratório, por métodos indiretos ou em furos de sondagem (item 6.2.2) e susceptibilidades obtidas de testemunhos de sondagem. Cada anomalia foi associada a um tipo de informação pertinente, geralmente de caráter superficial, deixando a solução final, ou a mais adequada, aos processos de modelamento e inversão.

8.2 METODOLOGIA E RESULTADOS

A metodologia aqui utilizada envolve os trabalhos de Talwani *et al.* (1959), Marquardt (1963), Talwani (1965), Cordell & Henderson (1968), Webring (1985), Won & Bevis (1987). Foram utilizados os programas Gravcad e Magcad de Gradient Geology and Geophysics no modelamento 2-D de dados gravimétricos e magnéticos, respectivamente, e SAKI e GI4 do U.S. Geological Survey nas inversões em 2,5-D e 3-D, respectivamente. Os dois primeiros programas se utilizam da teoria encontrada em Talwani *et al.* (1959) e Talwani (1965) (v. item 4.4.9.1-B) com subrotinas desenvolvidas por Won & Bevis (1987). SAKI é um programa elaborado por Webring (1985) e efetua a inversão baseado em Marquardt (1963), que pode realizar, simultaneamente, inversão semi-automática 2,5-D¹³ de dados gravimétricos e magnéticos. GI4, baseado em Cordell & Henderson (1968), realiza inversão automática de dados gravimétricos para diversas profundidades.

Modelagens e inversões foram divididas em duas partes, a saber:

¹³ A inversão em 2,5 dimensões significa que é inserido um terceiro parâmetro além das dimensões “distância”, x, e “profundidade”, z. Esse parâmetro é a extensão do corpo transversalmente ao perfil.

8.2.1 MODELOS 2-D E INVERSÃO 2,5-D¹

Won & Bevis (1987) apresentaram dois algoritmos para a estimativa de anomalias gravimétricas e magnéticas devido a um polígono de n lados em um espaço bidimensional. Os algoritmos foram baseados em Talwani *et al.* (1959) e Talwani (1965). Por fazer muitas referências às funções trigonométricas, os autores utilizaram as reformulações de Grant & West (1965) para reduzir essas referências o que tornou o algoritmo mais rápido. Os programas Gravcad e Magcad foram baseados nesses algoritmos. Os programas, interativamente, modelam e invertem anomalias observadas e calculadas, respectivamente. O usuário simplesmente reposiciona os vértices dos polígonos até que a anomalia calculada tenha a melhor correspondência com a observada. Estes programas foram usados em combinação com a geologia para a geração dos modelos de partida na inversão.

Baseando-se em Marquardt (1963), Webring (1995) elaborou um algoritmo para inversão 2,5-D de dados gravimétricos e/ou magnéticos. O algoritmo ajusta por mínimos quadrados as respostas teóricas gravimétricas e magnéticas segundo um modelo ao perfil de dados observados. O modelo consiste de um conjunto de polígonos com n lados que mapeiam a distribuição de densidades e susceptibilidades em subsuperfície. A terceira dimensão do modelo forma um certo ângulo com a seção do modelo e se estende a uma distância suficiente para evitar efeitos de borda. Os parâmetros que podem variar livremente são os vértices, a densidade e a susceptibilidade de cada prisma. O programa SAKI é iterativo e usa esse algoritmo para aprimorar os parâmetros do modelo. Ambos os campos podem ser invertidos simultaneamente. Este programa foi utilizado na inversão na tentativa de aprimorar a anomalia gerada pelo modelo aos dados medidos.

8.2.1.1 PROCEDIMENTOS

A confecção dos modelos em 2-D e sua inversão em 2,5-D foram atreladas aos seguintes procedimentos:

- 1- Definição do perfil com direção (azimute) única, que mais se aproxime dos pontos de medida gravimétrica e o mais transversal possível às tendências geológico-estruturais da região;
- 2- Determinação do maior número de parâmetros fixos: densidade (medida em laboratório ou em furo de sondagem), geologia (porções aflorantes da unidade geológica, representada pelo corpo, extraídas de mapas geológicos) e, se possível, a susceptibilidade magnética.
- 3- Ajuste da anomalia gravimétrica do modelo à anomalia observada.
- 4- Inversão do melhor modelo gerado a partir da gravimetria, usando o valor de susceptibilidade magnética correspondente (testemunho de sondagem), obtendo a anomalia magnética equivalente.
- 5- Comparação da anomalia magnética gerada com a observada. Caso não haja semelhança, proceder o ajuste de susceptibilidade.
- 6- Não havendo semelhança em hipótese alguma entre as anomalias magnéticas gerada e observada, proceder a modelagem magnética assumindo magnetização induzida. Não satisfazendo, variar, então, a direção de magnetização. Persistindo a diferença, os corpos

magnéticos não corresponderão às massas e pode-se concluir que as massas são magneticamente heterogêneas ou que há forte presença de magnetização remanescente.

Essa seqüência de procedimentos foi aplicada aos perfis selecionados na área de estudo com algumas mudanças.

Os perfis gravimétricos foram retirados da malha Bouguer subtraída de superfície de tendência de grau dois (Figura 6.11). Os perfis magnéticos foram extraídos do mapa de campo anômalo (Figura 7.9a).

Os contatos geológicos utilizados foram retirados do mapa geológico da Figura 6.2. Foram usados contrastes de densidades baseados na Tabela 6.2 e em relação ao valor de 2,67 g/cm³. Susceptibilidades foram fornecidas gentilmente por WMC Ltda. (Tabela 8.1) e foram utilizados os valores médios inicialmente. Em seguida, esses valores foram flexibilizados conforme o modelo.

TABELA 8.1: Susceptibilidades para alguns tipos de rocha. Dados gentilmente fornecidos pela WMC Mineração.

Rocha	Susceptibilidade Intervalo (10⁻⁵ S.I.)	Intervalo (10⁻⁵ S.I.)
Máfica	114	2 – 655
Ultramáfica	40	5 – 20000*
Granitóide	37	22 – 45
Sulfeto disseminado	6371	120 – 34000

* depende do teor de sulfeto

8.2.1.2 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

Foram selecionados seis perfis na área do LGCI. Os cinco primeiros concentram-se no *greenstone belt* de Crixás (área com maior densidade de medições). O sexto perfil envolve os *greenstone belts* de Guarinos e Pilar com uma extensão de 46 km. A Figura-8.1 mostra a localização dos perfis.

Cada perfil foi modelado utilizando-se o programa Gravcad. O melhor resultado foi invertido no programa SAKI, deixando-se livres os vértices de polígono que não representassem contatos ou afloramentos geológicos ou ainda vértices que também pertençam a outros perfis.

A Figura 8.2 mostra os resultados do processo de modelagem 2-D e inversão 2,5-D e as respectivas interpretações à luz dos conhecimentos geológicos em cada perfil.

Nos perfis de 1 a 5 (Figura 8.2a-e) as seções geológicas (IV) foram baseadas no mapa de Lacerda (1997). As inserções das formações Rio Vermelho e Ribeirão das Antas e das falhas são apenas representações pictóricas de acordo com o que se observa no mapa geológico (Figura 6.2). Alguns desses perfis sugerem a presença de intrusões (ácidas) que, provavelmente, moldaram o *greenstone belt* de Crixás.

A seção geológica do perfil 6 (Figura-8.2f) foi baseada nos trabalhos de Resende & Jost (1995), Jost *et al.* (1995, 1998), além do mapa de Lacerda (1997). O formato e o posicionamento das formações Serra do Cotovelo, Serra Azul e Cabaçal (Grupo Guarinos), das formações Córrego Fundo, Cedrolina, Boqueirão e Serra do Moinho (Grupo Pilar) e das falhas de empurrão é interpretativo com base no modelo geofísico da seção (III) e na literatura. A presença de estruturas em flor no Grupo Guarinos e no Bloco Moquém, como sugere a figura, que também é interpretativa, porém possível.

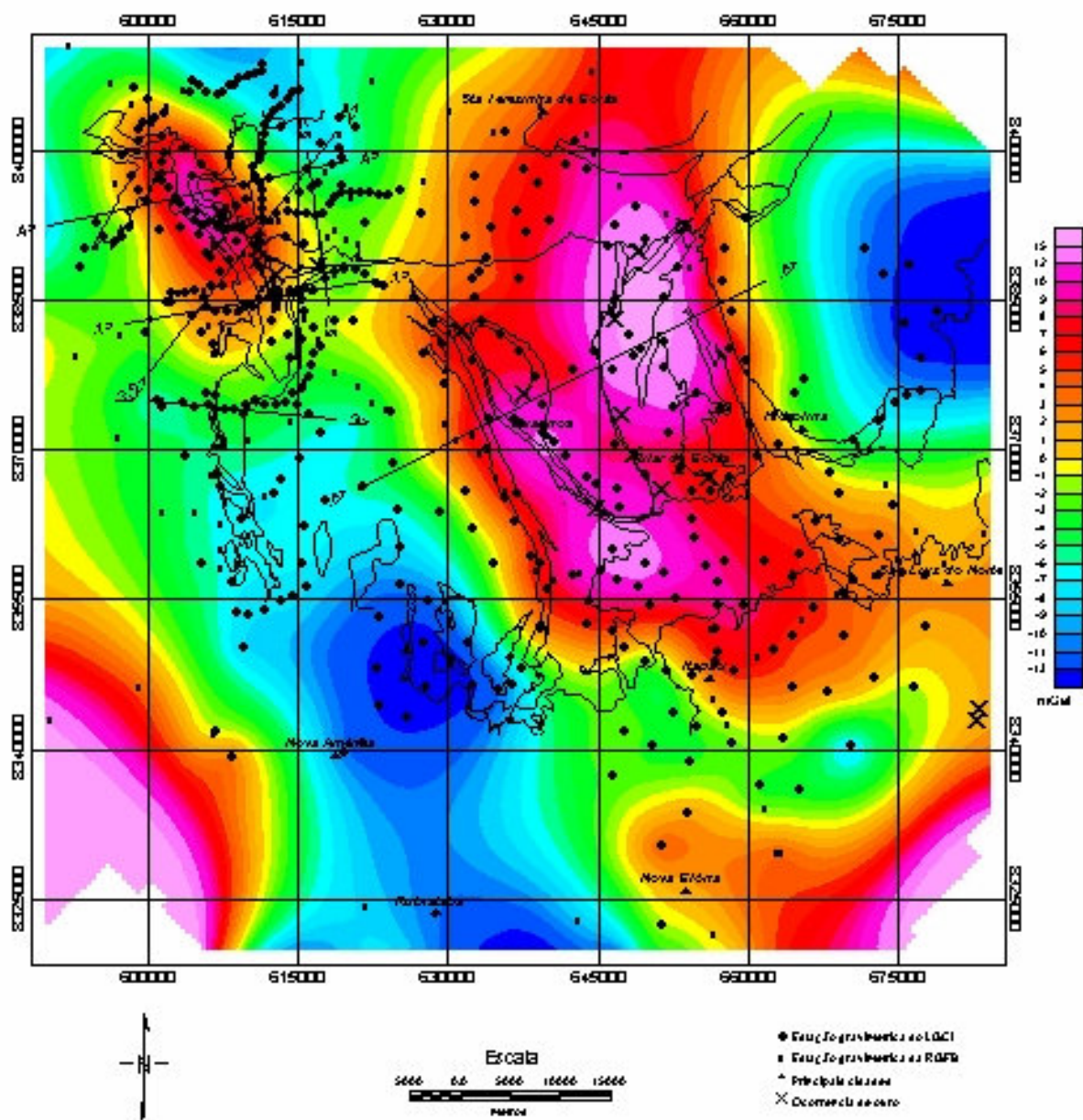


FIGURA 8.1: Localização de pontos de modelamento e inserção sobre a Figura 6.11.

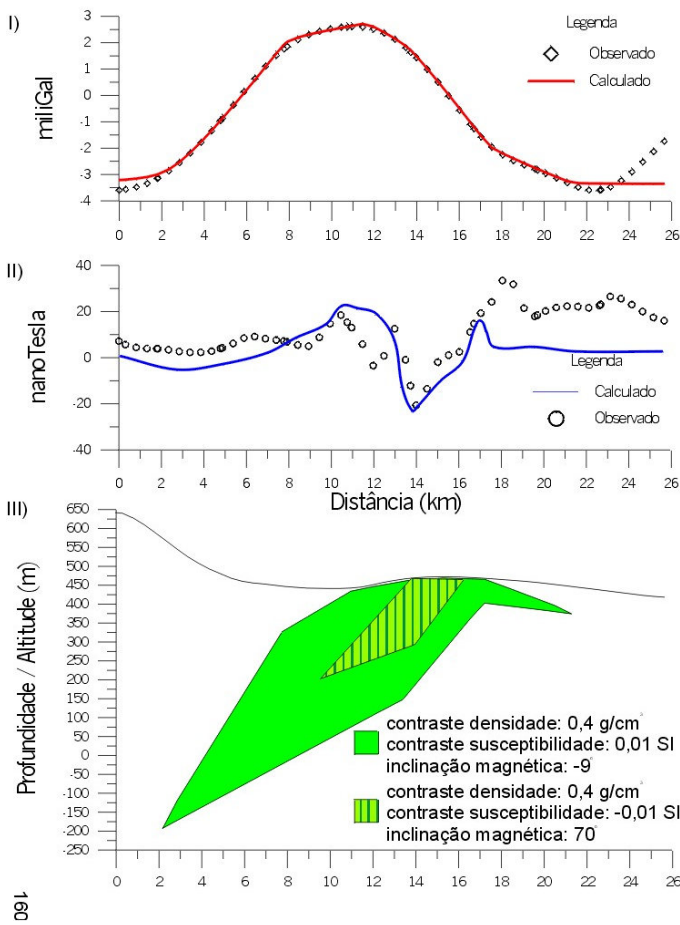
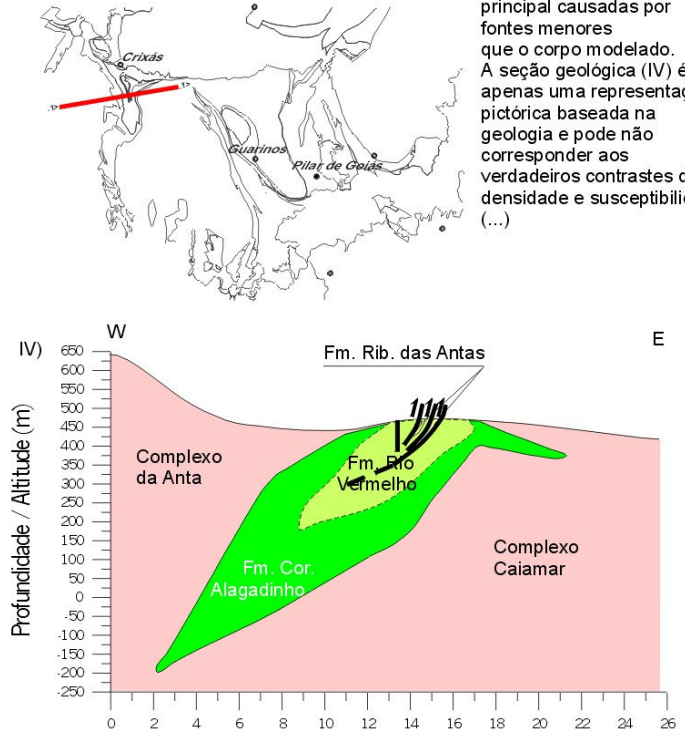


FIGURA 8.2: a) **PERFIL 1** modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final do corpo causativo com densidade fixa (3,07 g/cm³, verde) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2; IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) teve ajuste aproximado por mais um polígono que pode corresponder à Formação Rio Vermelho. Heterogeneidades podem ser observadas no interior da anomalia principal causadas por fontes menores que o corpo modelado. A seção geológica (IV) é apenas uma representação pictórica baseada na geologia e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade e susceptibilidade. (...)



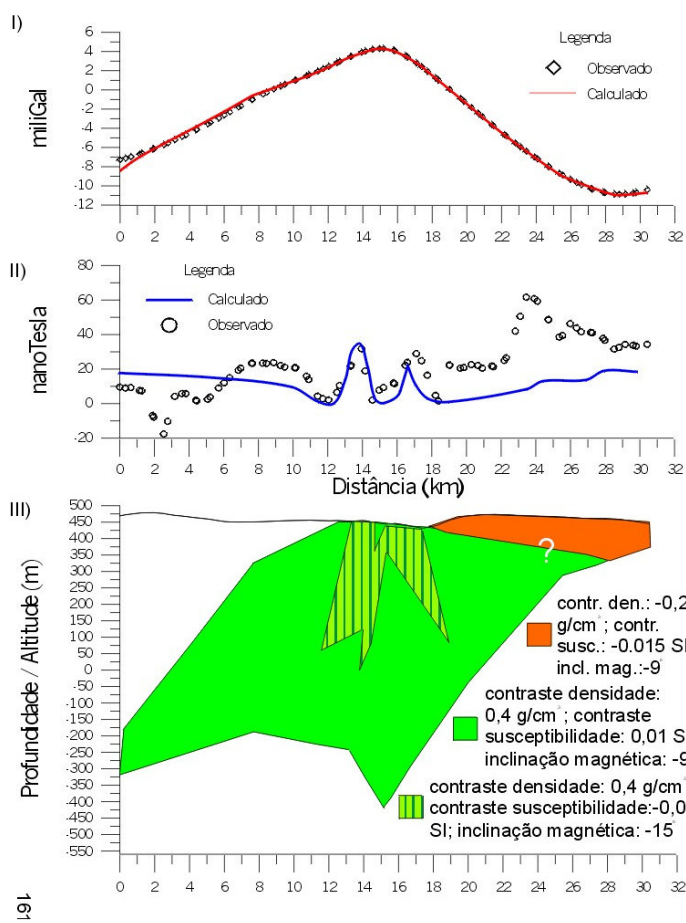
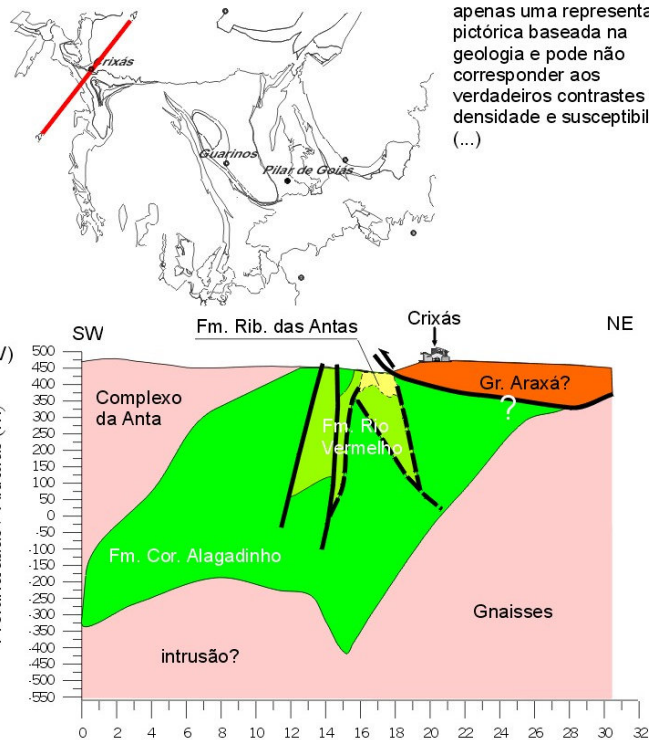


FIGURA 8.2: b) PERFIL 2 modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final dos corpos causativos com densidades fixas (3,07 g/cm³, verde e 2,47 g/cm³, laranja) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2; IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) teve ajuste com um modelo distinto devido à não correspondência entre as propriedades físicas com o modelo gravimétrico. A seção geológica (IV) é apenas uma representação pictórica baseada na geologia e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade e susceptibilidade. (...)



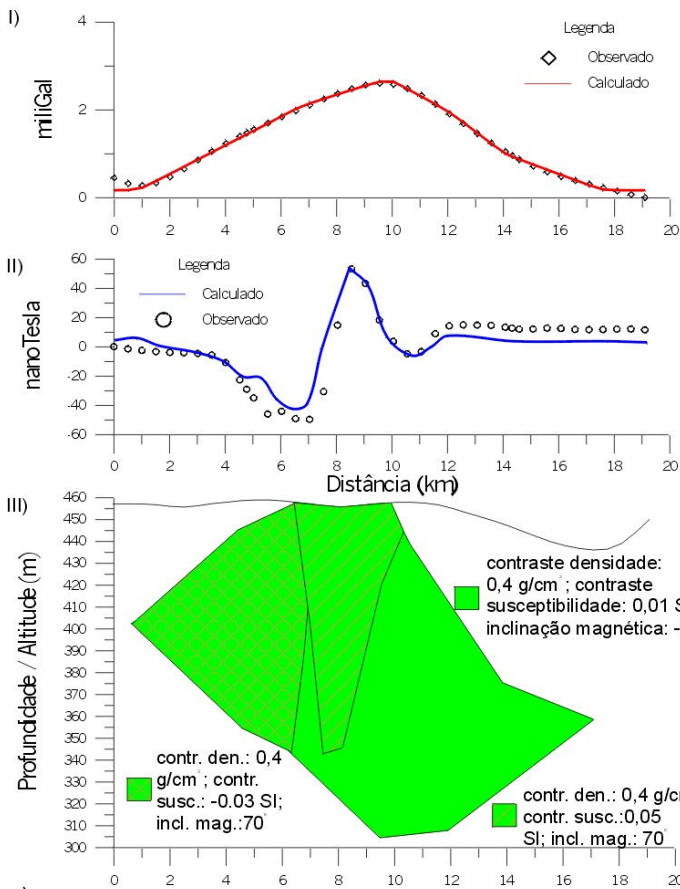
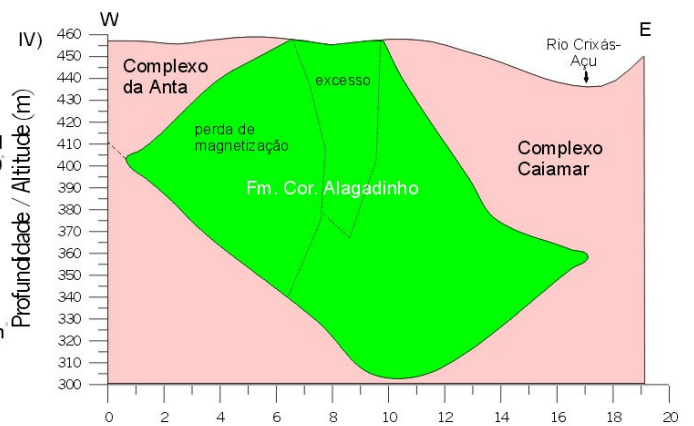


FIGURA 8.2: c) PERFIL 3 modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final do corpo causativo com densidade fixa (3,07 g/cm³, verde) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2;

IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) ajuste diferenciado da gravimétrica (I). Foram modelados dois corpos magnéticos contrastantes: um com perda de magnetização e outro com excesso. A seção geológica (IV) é apenas uma representação pictórica baseada na geologia e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade ou susceptibilidade. (...)



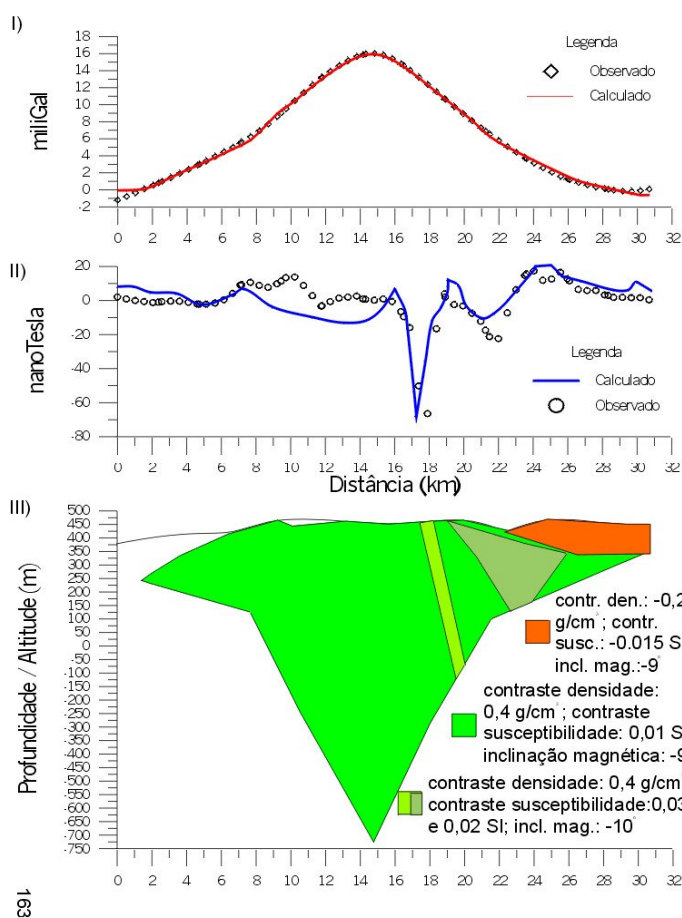
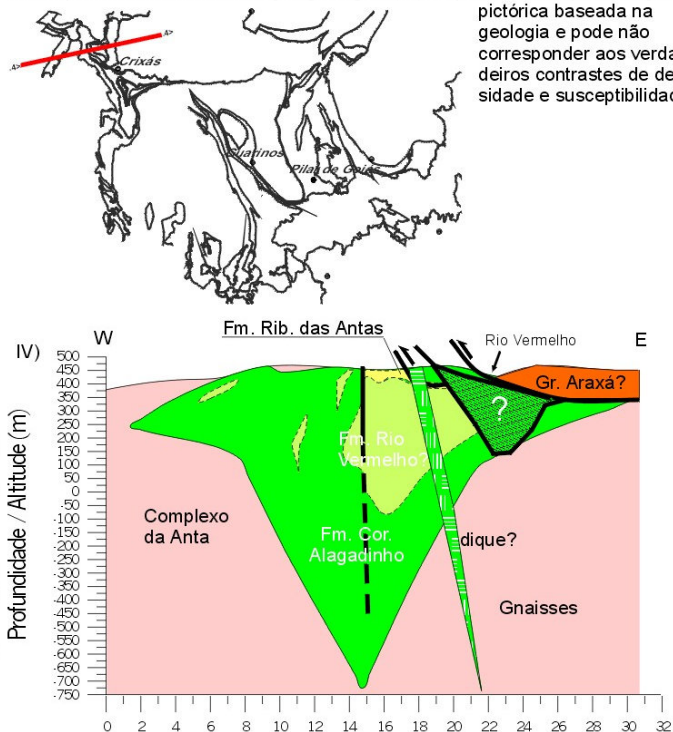


FIGURA 8.2: d) **PERFIL 4** modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final dos corpos causativos com densidades fixas (3,07 g/cm³, verde e 2,47 g/cm³, laranja) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2; IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) teve ajuste diferenciado. Foram modelados dois corpos magnéticos mais susceptíveis que as encaixantes. A seção geológica (IV) é apenas uma representação

pictórica baseada na geologia e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade e susceptibilidade. (...)



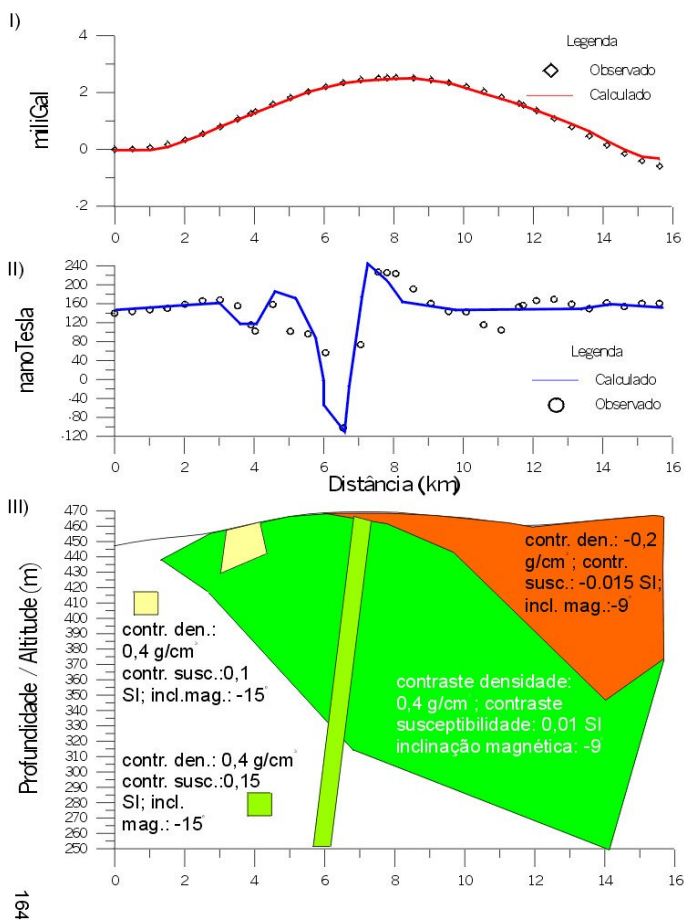
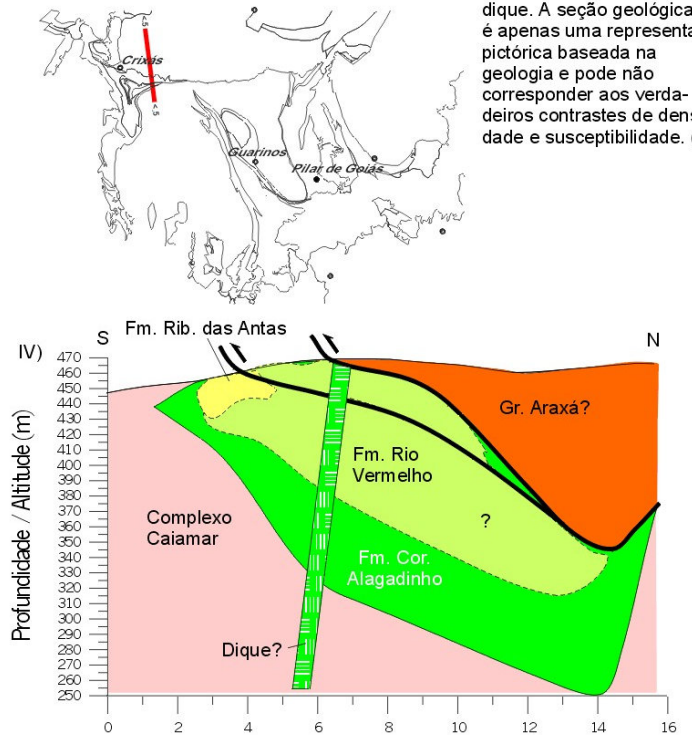


FIGURA 8.2: e) **PERFIL 5** modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final dos corpos causativos com densidades fixas (3,07 g/cm³, verde e 2,47 g/cm³, laranja) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2; IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) teve ajuste diferenciado da seção gravimétrica. Dois corpos magnéticos distintos foram modelados: um correspondente à Fm. Rib. das Antas e outro a um provável dique. A seção geológica (IV) é apenas uma representação pictórica baseada na geologia e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade e susceptibilidade. (...)



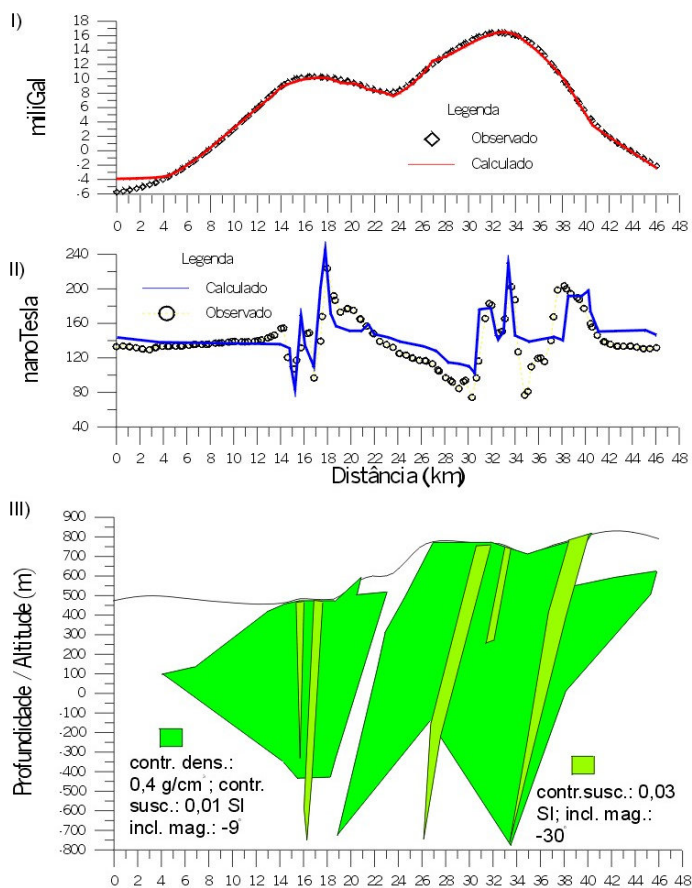
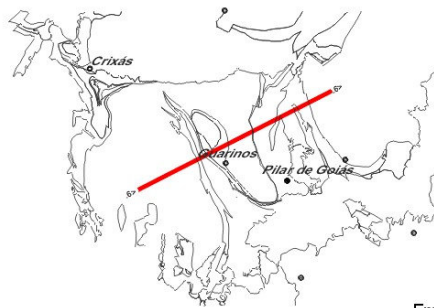
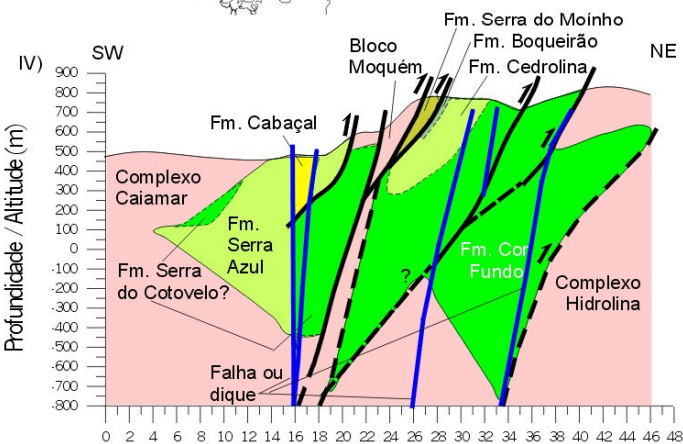


FIGURA 8.2: f) PERFIL 6 modelado em 2-D com o algoritmo de Won & Bevis (1987) e invertido em 2,5-D com o algoritmo de Webring (1985). I) seção gravimétrica; II) seção magnética; III) modelo final dos corpos causativos com densidades fixas (3,07 g/cm³, verde) e porção aflorante de acordo com a Figura 6.2; IV) interpretação à luz do conhecimento geológico. A seção magnética (II) teve ajuste alternativo em relação ao modelo gravimétrico. Foram modelados 5 corpos magnéticos, que podem ser associados a falhas e/ou diques com magnetita.



A seção geológica (IV) é apenas uma representação pictórica baseada na geologia e nos modelos geofísicos e pode não corresponder aos verdadeiros contrastes de densidade e susceptibilidade magnética.



As anomalias dos perfis magnéticos não satisfizeram aos modelos gravimétricos. Foram testadas subdivisões desses modelos, sabendo que pode haver heterogeneidade de magnetização, porém sua inversão 2,5-D resultou em um arranjo caótico de polígonos com susceptibilidades variadas e discrepantes da Tabela 8.1. Isso se deve, provavelmente devido à forte presença de magnetização remanescente e/ou à presença de magnetização viscosa nas rochas dos *greenstone belts*. Apesar disso, as principais anomalias foram modeladas como corpos individuais variando direção, inclinação e susceptibilidade magnética.

Apesar das discrepâncias dos perfis magnéticos em relação aos modelos gravimétricos, foi possível correlacionar algumas estruturas geológicas com anomalias magnéticas (Figura 8.2a – f).

Na Figura-8.2a-II, a anomalia magnética principal corresponde ao afloramento do greenstone belt (III) e foi correlacionada com a formação Rio Vermelho. Observa-se, também, perda de magnetização do Complexo Caiamar em relação ao Complexo da Anta. Heterogeneidades na anomalia principal podem corresponder à zonas de cisalhamento observadas na seção geológica (IV). Já o perfil da Figura-8.2b-II é bastante heterogêneo. Algumas anomalias parecem corresponder a zonas de cisalhamento do corredor transpressivo Ribeirão da Antas – Rio Vermelho que pode ter dado forma à Formação Rio Vermelho. Há perda de magnetização sob o Grupo Araxá. No perfil magnético 3 (Figura-8.2c-II), além da anomalia correspondente ao greenstone belt, observa-se uma provável heterogeneidade interna menos magnética e outra mais magnética (III e IV). Na Figura-8.2d, o perfil magnético (II) mostra uma anomalia negativa pronunciada que pode corresponder a uma zona de cisalhamento ou a um dique (III e IV). O mesmo ocorre no perfil magnético da Figura-8.2e-II. Nessa figura uma anomalia de menor intensidade parece representar a Formação Ribeirão das Antas. Na Figura-8.2f, o perfil magnético (II) mostra que diversas anomalias coincidem com as falhas da seção geológica sugerida (IV), reforçando que as estruturas em flor interpretadas podem ser uma boa sugestão, como já foi mencionado anteriormente. Os diversos corpos interpretados como zonas de cisalhamento também podem representar diques.

8.2.2 INVERSÃO 3-D AUTOMÁTICA

Segundo Cordell & Henderson (1968), dada uma anomalia gravimétrica em malha e algumas restrições quanto à distribuição de massa, é possível calcular automaticamente um modelo estrutural tridimensional por aproximações sucessivas. O corpo causativo é assumido como tendo tanto o topo quanto a base como superfícies planas e horizontais. É preciso definir o contraste de densidade e a superfície plana que delimita o topo ou a base do corpo. O campo gravimétrico desse modelo é calculado a cada ponto da malha, é comparado com o observado e é ajustado até que os dois campos, calculado e observado, sejam compatíveis entre si. Como o processo é automático, não existe qualquer controle do usuário durante o processo. O usuário somente escolhe o número de iterações que julgue necessárias para obter os valores finais de profundidade.

A Figura-8.3 mostra o resultado do processo para o LGCI (topo na superfície). As profundidades (máximo: 1,2 km) são compatíveis com as que se observam nos perfis invertidos (Figura 8.2). Observam-se espessamentos em três áreas distintas nos três *greenstone belts* da região: 1) noroeste do *greenstone* de Crixás; 2) sul do *greenstone* de Guarinos; e 3) centro do *greenstone* de Pilar de Goiás. Essas áreas coincidem com rochas ultramáficas das três faixas e provavelmente representem suas porções mais espessas.

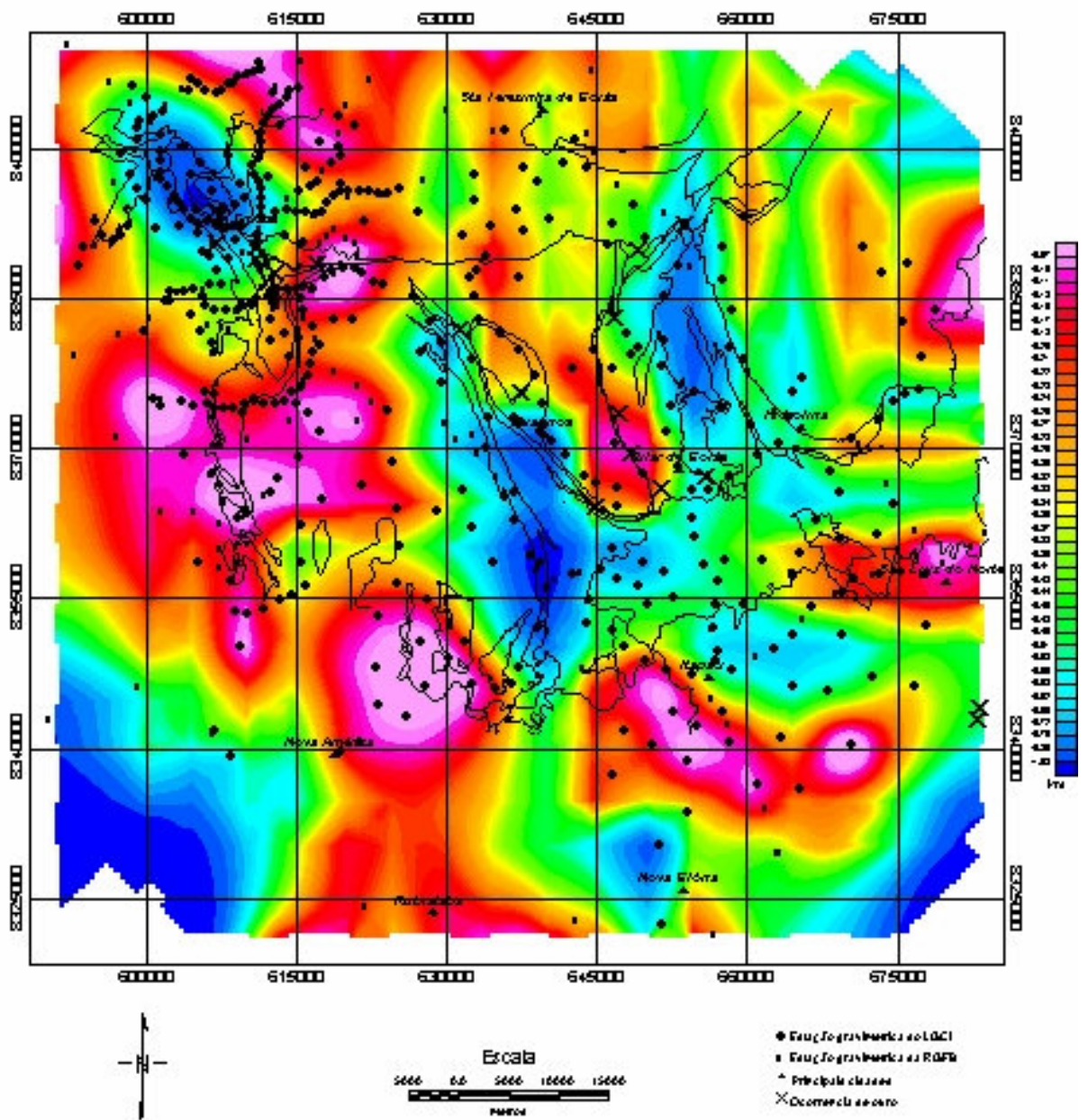


FIGURA 8.3: Inversão 3-D automática sobre a Figura 6.11, prof. da base dos corpos em km. Topo: 0 km. Contraste de densidade: 0,4 g/cm³.