O LEVANTAMENTO AEROMAGNÉTICO DE MINAS GERAIS E ESPÍRITO SANTO E SUA SEQÜÊNCIA QUANTO À ESTRUTURA GEOLÓGICA

WILHELM BOSUM*

ABSTRACT The aeromagnetic survey of the State of Minas Gerais, being executed in cooperation between the Governments of the Federal Republics of Brazil and Germany, is besides its economical value, of large interest as to its consequences to the geological structure of the region. Based on the isoanomaly-maps, till now completed, which cover most of Minas Gerais, a subdivision of the area according to the character of the magnetic field can be undertaken, which partly corresponds to proved geological units. The central part shows a magnetic field, which corresponds to that of known old shields. It therefore can be interpreted as hint at the São Francisco Craton, so proved by Magnetics. The "Craton-area" is surrounded by marginal zones in the north and south, in which possibly the material in the underground corresponds to that of the craton, but which are modified by younger tectonics. Southeast of the craton the magnetic field is determined by the itabirites and magmatites of the Minas Series. A possible swell region separates it from areas of different magnetic character in the east. In the south strong anomalies occur over areas, which can be correlated to migmatite zones. The geological interpretation is completed by a quantitative interpretation of single anomalies as to the shape, depth and situation of the source bodies.

INTRODUÇÃO A medição aeromagnética de Minas Gerais e uma parte do Espírito Santo é executada em concordância com um convênio firmado entre os governos do Brasil e da República Federal da Alemanha. A seguir será apresentada a parte que foi levantada no primeiro ano de trabalho. Trata-se de cerca de 400 000 km² de superfície que cobrem a maior parte de Minas Gerais, excetuando-se o nordeste.

Para o levantamento adotou-se uma distância entre perfis de 2 km, sendo de 20 km a distância entre os perfis de controle. A altitude de voo é barometricamente constante e, dependendo da topografia, varia em partes isoladas das áreas de levantamento entre 800 a 2 300 m. Tal plano de medição fornece, em comparação com uma medição numa altura constante sobre o solo, mapas de isoanomalias e interpretações mais precisos. Em média, a altura sobre o solo é de 400 m. A direção oeste-leste de voo é aproximadamente perpendicular ao alinhamento geológico predominante.

As medições foram executadas com magnetômetros de precessão de prótons (precisão de medida $\pm 1 \gamma$). Tanto quanto permitiu o relevo, as medições magnéticas foram combinadas com medições cintilométricas.

O levantamento deve servir como base para um reconhecimento sistemático e prospecção de depósitos minerais. Além do mais, os seus resultados são de grande valor para o reconhecimento da estrutura geológica da área, especialmente para a delimitação de diversas unidades geológicas e de complexos rochosos magmáticos.

Neste trabalho são apresentados os primeiros dados sobre a estrutura geológica da área, com base nos mapas de isoanomalias apresentados. Efetua-se uma interpretação das anomalias, complementada por uma correlação com os mapas geológicos existentes, especialmente com os mapas 1:1 000 000 do DNPM (Grossi e Ladeira, 1968a). A interpretação definitiva, no entanto, só pode se realizar baseada nas pesquisas geológicas e geofísicas combinadas, ainda em andamento, especialmente as pesquisas magnéticas de rochas.

*Convênio Geofísica Brasil-Alemanha, rua Aimorés, 2 450, Belo Horizonte, MG

tância de 50 γ , excetuando-se as áreas com anomalias muito fracas ou muito fortes, onde ainda foi marcada uma diferença de isoanomalia de 10 γ e 100 γ , 200 γ ou 1 000 γ .

O mapa obtido dessa forma apresenta-se, em certo sentido, suavizado, o que altera parcialmente o caráter do campo magnético original. É, portanto, aconselhável recorrer aos mapas originais, já publicados, para o reconhecimento de particularidades mais específicas.

Com base no caráter do campo magnético, subdivide-se a área de levantamento em várias partes que correspondem, ou deveriam corresponder, a unidades rochosas geológicas.

ÁREA DE LEVANTAMENTO NOROESTE, ÁREA DO CRATON SÃO FRANCISCO

A área a noroeste (I na Fig. 2) é marcada por anomalias de extensão regional (extensão de até 100 km). Sua amplitude tem quase sempre ordem de grandeza de algumas centenas de γ , no máximo de 1 000 γ . O alinhamento das anomalias é preferencialmente oés-sudoeste — lés-nordeste. A causa dessas anomalias deve ser procurada no subsolo mais profundo. Avaliações de profundidade fornecem na parte central valores entre 2 000 e 5 000 m. A profundidade diminui tanto na direção nordeste como na direção sudoeste. Isto pode ser perfeitamente reconhecido através do estreitamento das anomalias, da parte central até a parte norte.

Além dessas elevações reconhecíveis e uniformes do cristalino, encontram-se também evidentes mudanças de profundidade do tipo de falhas. Elas tornam-se nítidas junto dos alinhamentos magnéticos L_1 (veja Fig. 2) a norte e L_2 a sul.

Particularmente possantes, distinguem-se duas anomalias na parte leste: um mínimo de cerca de 1 000 γ em Jequitai e, a sul daí, um máximo de 300 γ em Várzea da Palma. Como se pode deduzir da forma do máximo, especialmente o gradiente acentuado na parte sul, não se pode interpretar o máximo correlacionando-o com o mínimo. Deve-se tratar aqui de um corpo magnético com magnetização anormal ou, então, de uma depressão do cristalino magnético, preenchida com material não magnético. A observação de um arqueamento de rochas da Série Minas nessa região indica a primeira possibilidade de interpretação.

Para o cálculo da profundidade, foram tirados os perfis 1 e 2 (veja Figs. 3 e 4; para posição, veja Fig. 1). Conforme mostra o perfil 1, o corpo perturbador principal fica a cerca de 10 000 m de profundidade, mas pode-se admitir, de acordo com o perfil 2, que algumas partes do corpo alcançam profundidades bem menores (1 000-2 000 m).

Uma comparação com outros mapas magnéticos de isoanomalias pode fornecer indicação da natureza do corpo perturbador. Dessa forma constata-se que essas anomalias têm uma grande semelhança com aquelas sobre antigos cratons (comparar principalmente com o *Magnetic Anomaly Map of Canada*, 1967). Portanto pode-se esperar também aqui uma situação semelhante, de acordo com os resultados geológicos que levaram à determinação do Craton do São Francisco (Pflug, 1965).

Além dessas anomalias de grande extensão tratadas até agora, as quais provêm do subsolo mais profundo, tem-se de considerar também anomalias mais fracas, que se fazem notar sobretudo pelo encrespamento das curvas de isoanomalias. Sua causa seria devida às diferenças mínimas de magnetização das camadas aflorantes e daquelas próximas à superfície (Bambu, Cretáceo).

Já dissemos que o cristalino atinge profundidades bem menores tanto a norte como a sul. O cálculo forneceu valores de cerca de 1 000 m; a norte deveria por vezes aflorar o cristalino. Excetuando-se a influência das profundidades mais rasas, as anomalias da zona marginal a sul do Craton, com base em seu tipo, diferenciam-se das que foram tratadas até aqui. Observam-se algumas vezes anomalias isoladas, que predominam aos pares (máximo e mínimo), e, outras vezes, estreitas zonas anômalas unidirecionais (L_2 na Fig. 2). De uma comparação com curvas-modelo segue-se (veja Fig. 5) que o primeiro

Figura 2 — Mapa estrutural magnético

tipo de anomalia mencionado indica grandes corpos, relativamente limitados em área e de grande profundidade, que podem ser interpretados geologicamente como corpos do tipo chaminé, podendo constituir intrusões básicas locais, chaminés ou complexos alcalinos rochosos. Pode-se interpretar a zona de anomalia mencionada, com base em sua

Figura 3 — Interpretação do perfil 1 (veja Fig. 1)

grande extensão de alinhamento reto, através de um provável dique básico, possivelmente intrusivo numa zona de falha. Deveria tratar-se, pois, de fenômenos relativamente recentes (provavelmente comparáveis em idade ao Vulcanismo Paraná), já que essa zona de falha atravessa cerca de 500 km isenta de perturbações.

Todas essas indicações de fenômenos magmáticos (relativamente recentes) na margem sul do Craton São Francisco podem ser vistas em certo sentido como uma desintegração do Bloco São Francisco.

O limite do Craton São Francisco, baseado no mapa de isoanomalias, tal como está pontilhado na Fig. 2, foi assim escolhido de forma a abranger a área das grandes anomalias.

Figura 4 — Interpretação do perfil 2 (veja Fig. 1)

Conquanto não se possa fixar exatamente esse limite a sudoeste, observam-se a nordeste e leste alinhamentos magnéticos, até que destes se aproximem claramente as anomalias dos embasamentos mais profundos.

ÁREA CENTRO-OESTE A sudoeste da área do referido Craton São Francisco identifica-se um campo magnético totalmente diferente, em comparação com a parte central da área I (II na Fig. 2). As anomalias de grande extensão desapareceram, excetuando-se a área sul de Monte Carmelo, onde é presumível uma subsuperfície do cristalino magnético. Em vez dessas, observa-se grande número de anomalias de extensão pequena e média. As mais acentuadas são algumas a oeste, em forma de anéis. Elas são causadas evidentemente pelos conhecidos complexos alcalinos rochosos de Araxá, Tapira e Patrocínio. As amplitudes das anomalias magnéticas são consideráveis; por exemplo, no caso de Patrocínio, a maior anomalia tem cerca de 10 000 γ . Em analogia com o quadro de manifestação magnética sobre essas conhecidas ocorrências, podem-se explicar anomalias formadas de maneira semelhante, provavelmente também devidas a tais rochas.

Figura 5 — Anomalias teóricas ΔT de modelos chaminé: profundidade 400 m; magnetização 100 γ , inclinação magnética 15°

Essas anomalias, e com isto os corpos rochosos agregados a elas, parecem seguir linhas que se orientam a noroeste-sudeste. Além disso é evidente que as anomalias orientam-se pelas linhas de Patrocínio-São Gonçalo do Abaeté-Três Marias e Araxá/Tapira-Ibiá-Morada Nova de Minas na direção nordeste-sudoeste. Elas acompanham um máximo magnético fraco de direção semelhante; possivelmente ali remontam a estruturas velhas no subsolo mais profundo. Por outro lado, não se pode reconhecer nenhuma ligação com o complexo alcalino rochoso de Poços de Caldas, situado mais adiante, a sul.

Outros campos típicos de anomalia caracterizam-se por anomalias irregulares na parte norte e oeste da área considerada. Elas são causadas por rochas vulcânicas (tufos, basaltos cretáceos), como se pode deduzir do mapa geológico.

Finalmente observam-se, particularmente no centro mas também na parte sul da área, anomalias estreitas de grande extensão. Os corpos perturbadores estão próximos à superfície. A grande extensão quase em linha reta das anomalias — no máximo de 400 km — indica que aqui, como no caso de L_2 , trata-se de um sistema de falhas no qual estão introduzidas rochas magnéticas, provavelmente de caráter básico. Já que quase não se observam deslocamentos, pode-se admitir que se trata de fenômenos tectônicos

e magmáticos relativamente recentes (possivelmente comparáveis em idade aos Basaltos Paraná).

Todos os três tipos de anomalias tratados indicam processos magmáticos que se deram nessa área. Constituem a indicação de uma zona tectônica fraca na margem sul do Craton São Francisco. Investigando-se a causa desses fenômenos, deve-se considerar a grande extensão em área que eles possuem, especialmente os longos alinhamentos magnéticos. A explicação desses fenômenos estaria relacionada a processos de extensão continental, pelo que é natural correlacionar tais zonas com a migração dos continentes.

ÁREA DE LEVANTAMENTO CENTRAL Os tipos de anomalias descritos da área centro-oeste e também as anomalias nos seus pormenores continuam em parte na direção sudeste. Particularmente, os alinhamentos magnéticos marcantes podem ser seguidos até longe, na direção sudeste. Entretanto eles não são mais as anomalias magnéticas determinantes. Na área a sudeste de I e II observam-se muitas outras anomalias, que se diferenciam das precedentes sobretudo por sua direção, mas ainda em grande parte por sua amplitude. A direção é preferencialmente oés-sudoeste — lés-nordeste até sudoeste-nordeste; e, ainda subordinadas, podem-se observar direções nor-noroeste — su-sudeste. As amplitudes de tais anomalias são de até 4 000 γ , pelo que, depois dos complexos alcalinos rochosos a oeste, representam as mais fortes anomalias das áreas de levantamento.

Sobressai de maneira especial a forma das anomalias a sudeste de Belo Horizonte. Aqui cruzam-se linhas de anomalias sudoeste-nordeste e nor-noroeste — su-sudeste, sendo evidente que elas reproduzem a estrutura do Quadrilátero Ferrífero, de grande importância econômica. De uma comparação com o mapa geológico a 1:150.000 (Dorr, 1969) pode-se deduzir que as anomalias em primeiro lugar foram causadas pelo itabirito, isto é, pelo seu teor em titânio-magnetita. Pode-se deduzir o curso desses itabiritos em pormenores no mapa de isoanomalia ΔT ; além disso, tornam-se visíveis importantes falhas transversais.

No mapa geológico 1:1 000 000 (Grossi e Ladeira, 1968a), os horizontes de itabiritos, isto é, em geral os horizontes da Série Minas, terminam logo a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero. Do mapa aeromagnetométrico pode-se, no entanto, deduzir que esses horizontes estendem-se mais de cerca de 100 km na direção sudoeste, desde que as anomalias agregadas a eles consistem duas seqüências de anomalias de alinhamento um tanto paralelo. Aliás, o mapa geológico 1:1 000 000 mostra a Série Minas em alguns lugares no curso das anomalias, pelo que fica confirmada essa interpretação.

Além das duas seqüências de anomalias em alinhamento sudoeste-nordeste, encontra-se ainda uma terceira a sudeste, com cerca de 50 km; sendo de amplitude essencialmente mais fraca, sua causa é outra. Da comparação com o mapa geológico 1:1 000 000 pode-se deduzir que foi causada pelas rochas do grupo São João Del Rei.

As anomalias do Quadrilátero Ferrífero continuam em direção nordeste. Depois disso, a seqüência de anomalias desfaz-se em anomalias isoladas, a anomalia de Itabira, das quais nem todas podem mais ser atribuídas ao itabirito. Muitas foram causadas por diversas rochas, entre elas, básicas e magnéticas, como se pode deduzir da comparação com o mapa geológico.

Grande quantidade de anomalias observa-se novamente na área nordeste, cerca de 100 km a sudeste de Diamantina. Aqui as rochas da Série Minas foram mapeadas, de forma que se pode admitir que as anomalias destas foram provavelmente causadas pelo itabirito naquelas contido.

Além do prosseguimento da Série Minas da área do Quadrilátero Ferrífero para sudoeste e nordeste, tanto o mapa ΔT como o geológico mostram um outro alinhamento

para noroeste. Como se pode deduzir do mapa de isoanomalias, este poderia seguir mais para noroeste do que indica o mapa geológico.

Segundo resulta do que se disse até agora, as anomalias da área III são evidentemente causadas, em primeiro lugar, pelas rochas da Série Minas, de forma que, generalizando, podemos situar essa área paralelamente ao Geossinclinal de Minas.

Além das anomalias consideradas até aqui, essencialmente causadas por corpos perturbadores próximos à superfície, são reconhecíveis nessa área extensas anomalias, sobretudo nas proximidades de seus limites a leste, cujas causas devem ser procuradas a grande profundidade. Encontramo-las principalmente em Ponte Nova, a sul de Itabira, e entre Curvelo e leste de Governador Valadares.

Cálculos indicam profundidades de até 10 000 m. Essas anomalias possuem grande semelhança com aquelas medidas sobre o Craton São Francisco e pode-se falar delas como sendo anomalias cristalinas. Elas indicam uma elevação do cristalino magnético nessa região, que pode corresponder inteiramente a uma elevação do cristalino (geológico) profundo. Outra possibilidade de interpretação, menos provável, seria a hipótese de plutões de grande extensão.

É interessante notar que as anomalias magnéticas de pequena extensão (de itabirito) acumulam-se nas áreas dessas anomalias de grande extensão e sempre a oeste delas. Parece assim, por enquanto, existir uma relação entre as anomalias de grande extensão, portanto a provável região de elevação, e a gênese dos itabiritos. Além do mais, parece existir uma relação com a tectônica de grande extensão dentro do Geossinclinal de Minas, conforme ela se manifesta nas anomalias de itabirito no mapa aeromagnético. Isso poderia apoiar a interpretação das anomalias de grande extensão como uma zona de elevação, o que se torna bastante nítido no caso do Quadrilátero Ferrífero, cuja forma é compreensível, quando se imagina que o falhamento do Geossinclinal de Minas efetuou-se contra um corpo situado a leste, que atuou como contraforte.

Considerando-se mais uma vez o curso dos alinhamentos que seguem da área II para sudeste, observa-se (Fig. 2) que a maior parte termina nas anomalias de itabirito a norte; apenas as situadas a sudoeste prosseguem para sudeste. Estes cruzam-se na área de São João Del-Rei com alinhamentos magnéticos em direção nor-nordeste—su-sudoeste, que lhe são comparáveis.

A oeste da zona de alinhamentos encontram-se anomalias quase leste-oeste relativamente fracas. Sua causa não é conhecida até agora; provavelmente não se trata de itabiritos. Até que essa questão possa ser esclarecida, essa área é associada a área III.

A sul tornam-se visíveis anomalias relativamente fortes, cuja parte ocidental provém do complexo rochoso alcalino-calcário Itatiaia. Sua causa mais adiante, a leste, não é ainda conhecida.

ÁREA DE LEVANTAMENTO A NORDESTE Como foi exposto anteriormente, o cristalino magnético mostra uma elevação nítida na direção nordeste. Essa causa um caráter magnético muito inquieto do campo. Independente disso, o caráter muda mais adiante, a nordeste (área IV), conforme se descreve a seguir. Observam-se fortes anomalias, relativamente estreitas em direção noroeste-sudeste além de anomalias anelares de pequena extensão que indicam corpos em forma de chaminé (Fig. 5), ordenadas ao longo de linhas (falhas?), e, por fim, também anomalias anelares de grande extensão.

Podem-se explicar as anomalias estreitas de grande extensão como sendo causadas por diques básicos, intrusivos em falhas. Com base no mapa magnético, essas prováveis falhas podem em parte ser seguidas mais além das “anomalias-diques” e foram registradas na Fig. 2 como alinhamentos magnéticos.

Se as anomalias anelares, pelo menos as extensas, foram causadas pelo complexo alcalino, isso só pode ser decidido após a medição aeromagnetométrica. Mas estas certamente sugerem tratar-se de corpos de extensão maior em profundidade, portanto em forma de chaminé.

Resulta assim um paralelismo próximo à área II. Também aqui as anomalias mencionadas indicam uma zona fraca na margem do Craton São Francisco.

ÁREA DE LEVANTAMENTO A LESTE A área de levantamento a leste da área III, descrita anteriormente, divide-se numa parte ocidental (V_a) e uma oriental (V_b).

Na parte ocidental predominam anomalias de alinhamento vertical nor-nordeste—su-sudoeste, as quais, em relação à forma, apresentam uma diferença nítida das que se encontram na área III. O limite entre ambas as áreas está marcado por um alinhamento magnético perfeitamente reconhecível.

Ainda não é possível fazer-se a interpretação dessas anomalias. No mapa geológico 1:1 000 000 (Grossi e Ladeira, 1968a) estão registradas rochas das Séries Rio Doce e Itanhami. Pode-se supor que as anomalias foram causadas por diferença de magnetização de alguns horizontes de rochas dessas séries. Essa questão será esclarecida pelas pesquisas magnéticas das rochas, ainda em decurso.

O trecho da área oriental (V_b), ao contrário, mostra uma grande quantidade de anomalias mais ou menos isoladas. Apenas em alguns casos seguem alinhamentos nordeste-sudoeste.

As causas dessas anomalias são corpos básicos a ultrabásicos, parcialmente formados como estruturas anelares.

ÁREA DE LEVANTAMENTO A SUDOESTE No sudoeste do trecho de área III observam-se duas zonas magnéticas bastante perturbadas, que se estendem em forma de duas línguas da direção leste-oeste e são separadas por uma área magnética tranqüila. À primeira vista, essas anomalias parecem ter uma certa semelhança com aquelas sobre os Basaltos Paraná (no oeste da II). Uma análise mais precisa mostra, no entanto, que apenas o encrespamento das curvas de isoanomalias, o *noise*, pode ser atribuído às influências próximas à superfície. Entretanto, como também mostra a Fig. 1, predominam as anomalias de grande extensão, de amplitude considerável (até 600 γ). Ambos os trechos da área são delimitados a norte por anomalias positivas de direção quase leste-oeste e, além disso, são divididas por anomalias negativas e positivas.

Da comparação com o mapa tectônico 1:1 000 000 (Grossi e Ladeira, 1968b) resulta uma interpretação das anomalias. Neste estão registradas zonas migmatizadas, que correspondem mais adiante a zonas magnéticas perturbadas. O mapa tectônico deveria ser revisto com base no mapa magnético, nas regiões onde não há concordância.

Pode-se então deduzir uma ligação entre a migmatização e as anomalias magnéticas em concordância com os novos conhecimentos, segundo os quais os processos metamórficos (em sentido amplo) freqüentemente levam à formação de minerais magnéticos. No caso presente as anomalias de pequena extensão, reconhecíveis em primeiro lugar pelo encrespamento das curvas de isoanomalias (*noise*), podem ser explicadas pelas rochas migmatizadas aflorantes. As anomalias de grande extensão, cuja causa tem de ser procurada numa profundidade maior (cálculos deram valores de até 5 000 m), devem no entanto ser atribuídas a complexos rochosos do tipo plutão, situados mais profundamente, que possivelmente foram formados em conexão com processos de derretimento. Nesse caso é importante fazer referência ao *stock* alcalino de Poços de Caldas, que ocorre nessa região e pode também ser deduzido do mapa de anomalias.

Agradecimento Ao Dr. Acyr Ávila da Luz, DNPM Rio, quero agradecer a sugestão de apresentar o trabalho no quadro do Congresso Brasileiro de Geologia; ao Dr. Yvan Barreto de Carvalho, pela autorização da publicação dos mapas. A todos os colegas brasileiros e alemães e, especialmente, aos senhores Dr. Georg Blümel, Dr. Benedito Paulo Alves e Dr. Roberto Breves Vianna, dentro do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha, agradeço pelas inúmeras discussões proveitosas.

BIBLIOGRAFIA

- DORR, J. V. N. — 1969 — Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. U. S. Geol. Survey. and Departamento Nacional da Produção Mineral. Profes. Paper 641-A — Washington
- GROSSI, J. H. e LADEIRA, E. A. — 1968a — Esboço Geológico de Minas Gerais 1:1 000 000, Departamento Nacional da Produção Mineral, Belo Horizonte
- GROSSI, J. H. e LADEIRA, E. A. — 1968b — Esboço Tectônico do Estado de Minas Gerais 1:1 000 000, Departamento Nacional da Produção Mineral, Belo Horizonte
- MORLEY, L. W., MACLAREN, A. S. e CHARBONNEAU, B. W. — 1967 — Magnetic anomaly map of Canada 1:5 000 000, Geological Survey of Canada, Ottawa
- PFLUG, R. — 1965 — Zur Geologie der südlichen Espinhaço-Zone und ihrer präkambrischen Diamantvorkommen, Minas Gerais, Brasilien, z. Dtsch. Geol. Ges., 115, Hannover