

ARRANJO GRADIENTE ELÉTRICO MODIFICADO E MÉTODOS POTENCIAIS NA EXPLORAÇÃO DE SULFETOS DISSEMINADOS EM SUÇUARANA, JAGUARARI – BA

OSMAR ALMEIDA DA SILVA

NIMIPLAN/IBGE – PROJETO RADAMBRASIL
Av. Antonio Carlos Magalhães, 1.131, Ed. Mal. Ademar de Queirós, ala norte
4º andar – Pituba – 40.000 – Salvador – BA

EDSON E. S. SAMPAIO

Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica
Instituto de Geociências da UFBA
Rua Caetano Moura, 123 – Federação – 40.000 – Salvador – BA

Suçuarana with an area of 1,30km² and 15km south of Caraiba Mine contains a copper bearing mafic body hosted by gneissic rocks. A geophysical survey was conducted by using gravimetric, magnetic, induced electrical polarization and resistivity methods. The results of the gravimetric and magnetic methods characterized the geometry of the ore bearing mafic body and defined the local geological pattern. Both the induced electrical polarization and resistivity surveys used a variation of the gradient array aiming to investigate its applicability for the evaluation of disseminated metallic sulphide deposits in the Curaçá Valley. There were connected to the transmitter 10 current electrodes, 5 at each lateral extremity of the area with a separation equal to 1 km, and it was used about 0,5A. There were connected to the receiver 2 potential electrodes keeping one fixed to permit calculation of the values of the electric field in both the E-W and N-S directions. The E-W electric field data showed good horizontal resolution with respect to vertical and sub-vertical conducting bodies elongated in the N-S direction (transverse to the current lines). The N-S electric field showed several short conductors, under the action of the E-W current flow. Ordinarily the electric field would vanish in the N-S direction. But, in this case, did not happen because the disturbance in the field lines, caused by these bodies, creates positive and negative peaks of the electric field close to their north and south boundaries. A theoretical solution was developed for the electric field applied to the case of a vertical dike of conductivity σ_2 within an environment of conductivity σ_1 , by assuming an infinite number of current electrodes. The Theoretical curves were then used to interpret the conductivity and the width of the mafic body. The PFE results indicated a maximum value of 3,5% for a background of 2%. These results suggest a uniformly disseminated mineralization, with some small local concentrations. The electromagnetic coupling interference limited the usefulness of the gradient array. However, the use of 10 current transmission electrodes permitted a homogeneous distribution and resulted in a uniform response of the various conducting bodies.

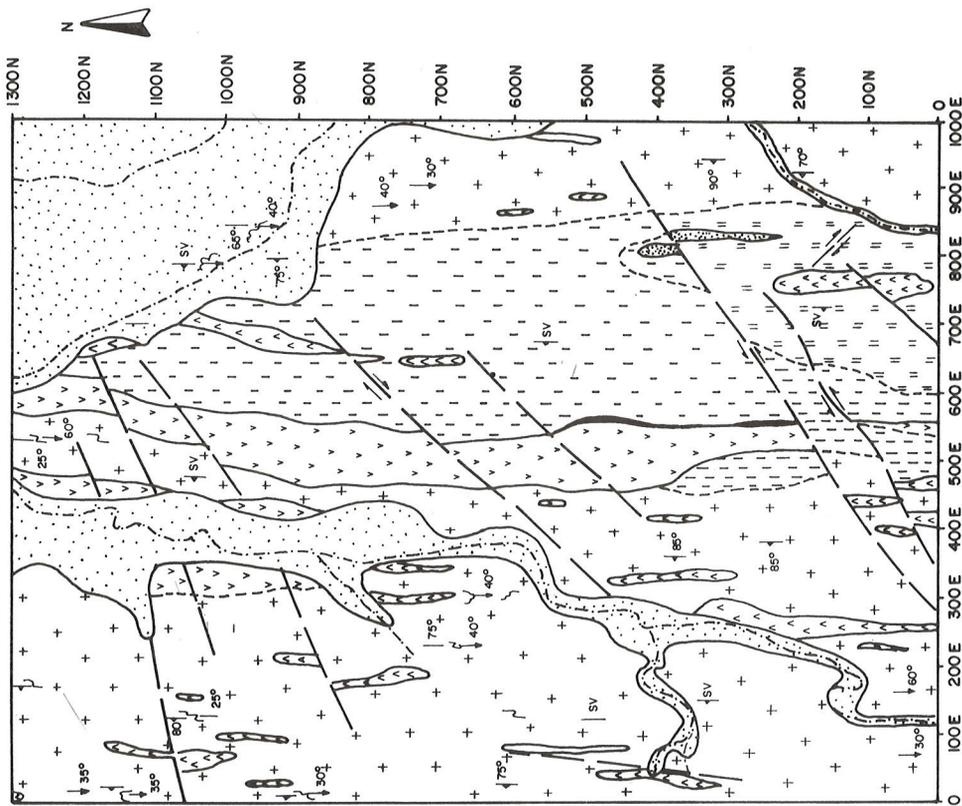
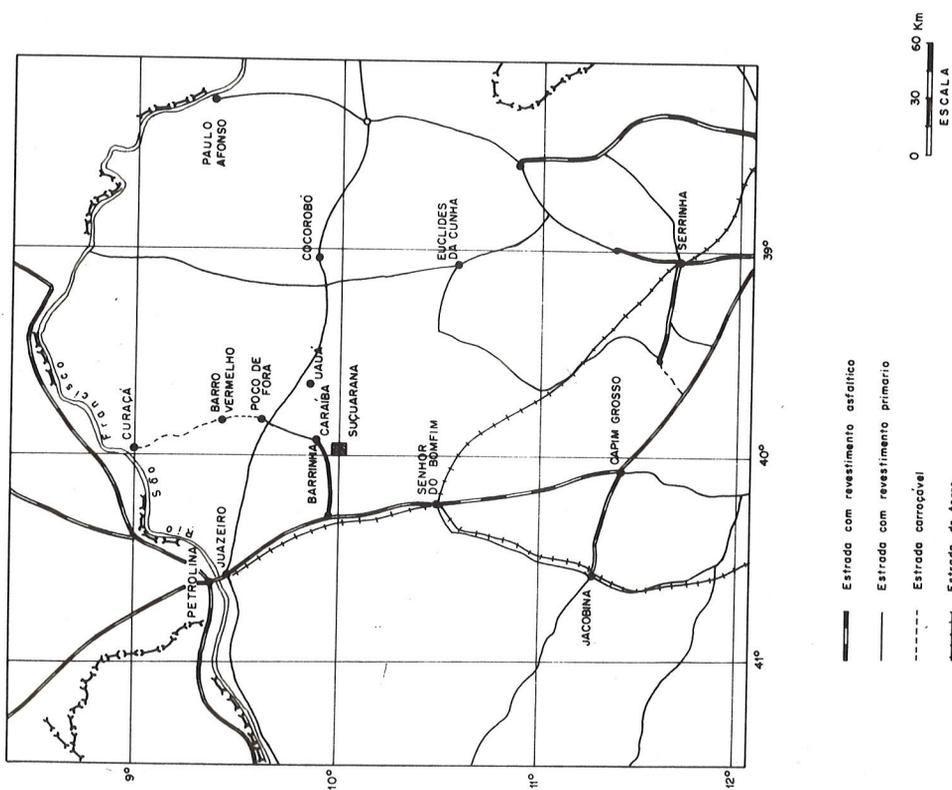
INTRODUÇÃO

Dentro de um programa de exploração de sulfetos disseminados em rochas ultra-máficas no Vale do Curaçá, foi desenvolvida uma modificação do arranjo gradiente elétrico. A modificação consistiu em empregar 5 eletrodos de corrente em cada extremidade do arranjo, visando uniformizar o fluxo do campo elétrico na região central. Para tanto, foi necessário desenvolver uma solução teórica considerando um número infinito de eletrodos de corrente, com a qual se obteve expressões para o campo elétrico aplicadas ao caso de um dique vertical de condutividade σ_2 encaixado em um meio de condutividade σ_1 . No Apêndice 1 estão apresentados o desenvolvimento teórico e as expressões finais para o campo elétrico. A título de comparação

estão apresentadas no Apêndice 2 as expressões do campo elétrico para 2 eletrodos pontuais de corrente. Curvas teóricas foram traçadas a partir de ambas as expressões, para valores diferentes do contraste de condutividade e da largura do dique. Os dados obtidos no levantamento foram interpretados por ajuste com essas curvas teóricas.

Adicionalmente foram empregados os métodos magnético e gravimétrico objetivando caracterizar o corpo máfico bem como definir a estrutura geológica. As medidas de resistividade elétrica foram coletadas juntamente com dados de efeito percentual de frequência, com o objetivo de indicar zonas condutoras e polarizáveis. Sob determinadas circunstâncias, essas zonas podem coincidir com massas de sulfetos disseminados. A área objeto desse trabalho é relativamente plana e compreende um retângulo N-S com

Figura 2 — Mapa geológico da área de Suçuarana. Sá e Reinhardt (1984).



- LEGENDA
- Abutido
 - Granito gnaíse roseo, a cinza com xenólitos e intercalações gnaíse bandado, migmatito enriquecido em biotita, orto-gnaíse
 - Gnaíse quartz-feldspático e hornblenda-biotita-gnaíse com arfivélito centimétrico a milimétrico, intercalado subord. granito gnaíse roseo.
 - Gnaíse lapílnico, quartzítico, subord. calcossilicatos.
 - Rochas básicas (arfivélito, hornblenda-gabro, gabro-marito, norito, proxenito, biofilizado-arfivélizado).
 - Arfivélitos + subord. calcossilicatos
 - Biotito com mineralização em malajuíta
 - Quartzito e magnetita/hematita.
 - Faixa com movimento relativo
 - Foliação com mergulho (S_3)
 - Dobra menor com plunje (F_3)
 - Lineação com plunje (L_3)
 - Contato verificado
 - Contato aproximado

Figura 1 — Mapa de localização da área de Suçuarana.

1,3km² de superfície. Localiza-se em Suçuarana a 15km ao sul da Mina Caraíba (Fig. 1), onde ocorre um corpo máfico mineralizado em cobre, alongado na direção N-S.

GEOLOGIA

De acordo com Delgado & Sousa (1975) ocorrem dois grupamentos rochosos de idade Pré-Cambriana no Vale do Curaçá: o Grupo Caraíba e o Grupo Canudos. O Grupo Caraíba é o mais antigo e co-participa do Craton Sanfranciscano, servindo de embasamento aos grupos pré-cambrianos mais recentes no nordeste da Bahia. Ele compreende um conjunto de rochas metamórficas e de migmatitos *facies* granulito e anfibolito. Encaixados neste conjunto também ocorrem corpos concordantes de rochas máficas e ultra-máficas potencialmente hospedeiras de mineralizações cupríferas.

O mapa geológico da área de Suçuarana se encontra representado na Fig. 2. Inicialmente constou de dados compilados por Oliveira & Rossiter (1978). Em sua forma final, o mapa foi elaborado com o auxílio dos dados geofísicos constantes deste trabalho (Sá & Reinhardt, 1984). No conjunto de rochas metamórficas regionais constituído essencialmente por gnaisses e granito-gnaisses, encaixa-se um corpo máfico formado por rochas anfibolíticas e noritopiroxeníticas (melanoritos) com intercalações de biotititos. Estas rochas se encontram por vezes migmatizadas, em graus variáveis, observando-se migmatitos de vários tipos. Subordinadamente ocorrem rochas calcossilicatadas e filões de quartzo e de pegmatóides que atravessam as formações máficas e ultra-máficas. O alinhamento estrutural das encaixantes e dos corpos máficos tem direção geral N-S, apresentando foliação vertical ou subvertical inclinada para oeste.

A mineralização cuprífera observada à superfície consiste de malaquita e/ou crisocola, ocorrendo sob a forma de impregnações preenchendo fissuras ou planos de clivagem dos biotititos. A mineralização sulfetada encontrada nos furos de sondagem está representada essencialmente por calcopirita e bornita que ocorrem disseminadas em rochas do tipo piroxenito, norito e biotitito.

GRAVIMETRIA

Metodologia

A área pesquisada compreende um retângulo com 1.300 m N-S e 1.000 m E-W. Foram abertas 27 picadas na direção E-W, espaçadas de 50m, ao longo das quais foi executado o levantamento gravimétrico com leituras de 20 em 20 metros. O equipamento utilizado foi um gravimétrico Worden modelo 112 fabricado pela Texas Instruments, cuja constante é 0,093 mgal/divisão. Para efeito de correção da deriva foi empregada uma regressão quadrática, utilizando os valores repetidos de leitura em uma estação de referência

em cada linha de levantamento. Adicionalmente foi executado um perfil transversal para correlacionar os dados linha a linha.

Após a correção da deriva foram realizadas as correções de ar-livre, Bouguer e de latitude. A correção de terreno não se fez necessária por ser a área relativamente plana. A densidade utilizada na correção Bouguer foi de 2,5 g/cm³ tendo sido determinada a partir do método de Nettleton (1940). Como referência foram utilizados o plano de cota 500m com plano de base para as correções ar-livre e Bouguer, e a latitude de 10°.

Os dados gravimétricos corrigidos foram lançados na escala 1:2.000 e traçadas as linhas isogálicas para obtenção de mapa Bouguer. Foi traçado também o perfil Bouguer da linha 800N, do qual foi extraído pelo método gráfico o efeito regional e obtido o respectivo perfil residual. O efeito regional ilustrado na Fig. 4 é representativo para toda a área e apresenta um gradiente da ordem de 0,86 mgal/km.

Interpretação dos Dados

Os dados do levantamento gravimétrico estão representados no mapa Bouguer ilustrado na Fig. 3. A anomalia principal observada neste mapa está localizada na sua parte central, do extremo norte ao extremo sul, estando associada ao corpo máfico principal da área em estudo. Ao norte da linha 600N, esta anomalia apresenta valores de efeito de gravidade de até 2,0 mgals, indicando uma maior densidade para o corpo máfico em relação à porção localizada no sul. A linha de 1,3 mgal parece constituir o contato leste do corpo, indicando sua direção na parte norte de aproximadamente N25°E. O corpo máfico parece estar truncado ao longo da linha 500N por uma falha de direção E-W, com a parte sul do corpo constituindo o bloco baixo, evidenciado pela queda dos valores gravimétricos nesta região.

Dentro da anomalia principal da área, na sua parte norte, são observados picos com amplitude de 1,8 até 2,0 mgals localizados pelas coordenadas 560E, 950N e 580E, 1250N. Os mesmos devem coincidir com zonas mais densas das máficas, que podem estar associadas a pequenas concentrações de sulfetos. Um dos picos se encontra nas proximidades da sondagem FAS-3, localizada pelas coordenadas 800N-580E executada pela DOCEGEO, a qual apresentou teores de cobre de até 0,6%. Esta idéia é ainda reforçada pelo resultado da sondagem FAS-2, localizada pelas coordenadas 1100N-435E, a qual também revelou teores de cobre de até 0,6%.

A anomalia localizada pelas coordenadas 460E, 1200N, a oeste da anomalia principal, reflete a presença do corpo de anfibolito. Na linha 100N — estação 260E, o núcleo de uma anomalia com amplitude de 1,1 mgal, alongada aproximadamente na direção N-S, evidencia a presença de uma lente de anfibolito de direção N-S com extensão de aproximadamente 100m. No mapa geológico (Fig. 2) esta lente de anfibolito ocorre com extensão superior a 100m e deslocada para norte. A anomalia não acompanha a extensão da lente para norte devido provavelmente à presença de

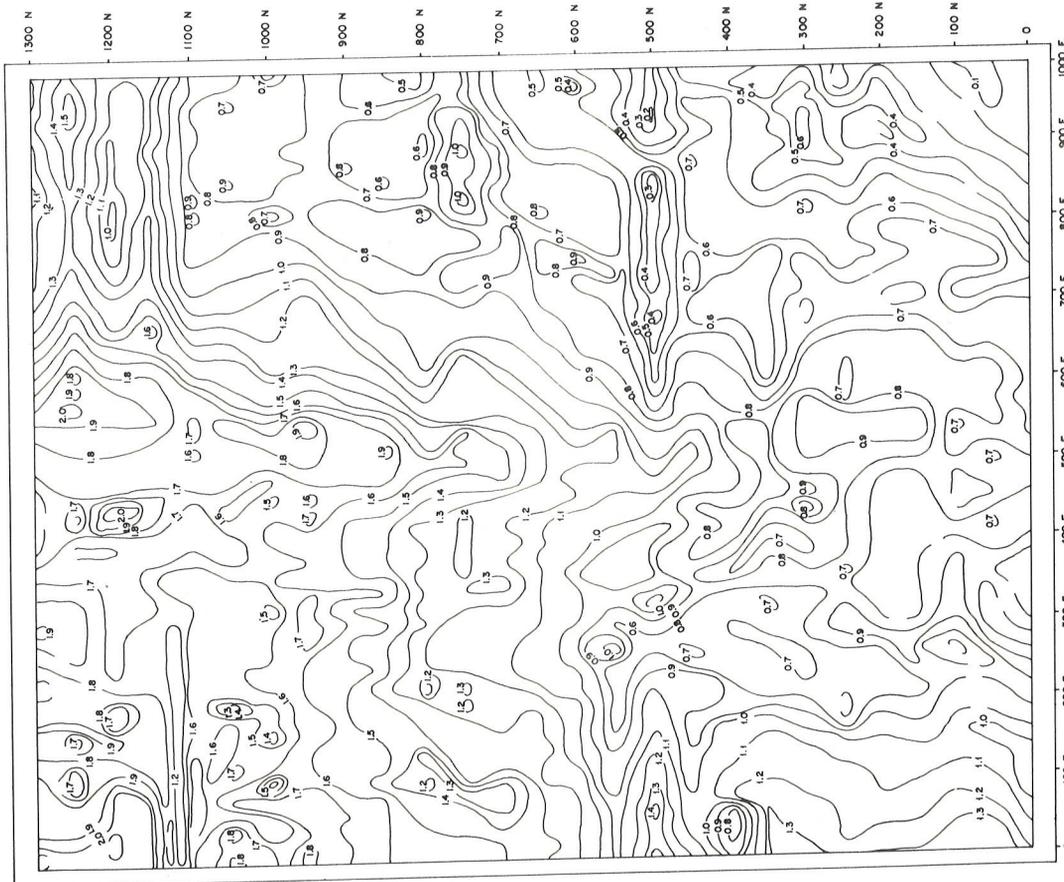


Figura 3 — Mapa gravimétrico da área de Suçuarana (intervalo de contorno = 0,1 mgal).

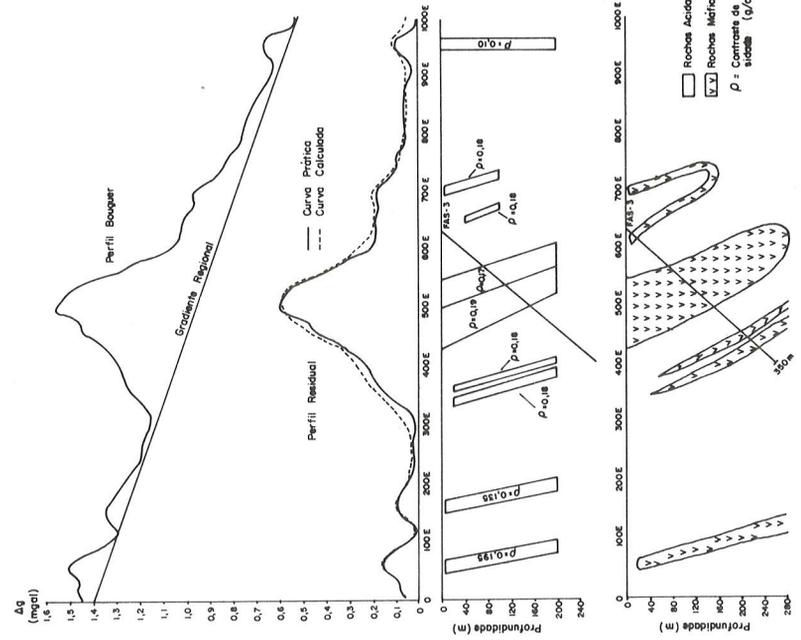


Figura 4 — Perfil gravimétrico da linha 800N e sua interpretação bidimensional.

aluvião encobrindo parte da mesma. À leste da linha 750N ocorre uma anomalia com amplitude de 1,0 mgal alongada na direção E-W, sugerindo a presença de uma lente de anfíbrito com extensão em torno de 100m alongada na direção E-W. Os baixos gravimétricos localizados pelas coordenadas 260E, 300N e 820E, 1200N estão associados a zonas de aluvião onde se tem valores de densidade relativamente baixos em decorrência de espessamento da cobertura de baixa densidade nestes locais.

Ao longo da linha 500N há um alongamento das curvas na direção E-W, que coincide com o extremo sul da anomalia principal, podendo evidenciar uma falha nesta direção. Ocorre do lado leste um baixo gravimétrico que na hipótese da falha, pode indicar acúmulo de material silicificado na zona cisalhada. Outros lineamentos gravimétricos são observados, possivelmente também associados a falhas, os quais ocorrem preferencialmente nas direções E-W, NE-SW e NW-SE. Os mais evidentes, de direção E-W, ocorrem ao longo das linhas 500N e 1100N. Os de direção NE-SW são localizados pelas coordenadas 200E, 600N-700E, 800N e 500E, 600N-700E, 1300N, indicativos das extremidades dos lineamentos. As coordenadas 100E, 600N-700E, 700N localizam um lineamento de direção NW-SE.

O perfil gravimétrico da linha 800N foi interpretado pelo método de Talwani et al. (1959). A interpretação foi feita considerando corpos bidimensionais e com extensão infinita. Os polígonos foram construídos com base em dados geológicos de superfície e informações do furo de sonda FAS-3, de modo a reproduzir a curva observada na superfície. O perfil gravimétrico da linha 800N e sua interpretação bidimensional estão ilustrados na Fig. 4, sem suavização.

Os polígonos compreendidos entre as estações 400E e 600E reproduziram a anomalia principal do perfil sendo assim interpretadas como um corpo de rochas máficas dobrado isoclinalmente apresentando contraste de densidade entre 0,17 e 0,19 g/cm³. Os polígonos entre as estações 300E e 400E, apresentando contraste de densidade igual a 0,18 g/cm³, foram interpretados como lentes de rocha máfica encaixadas no gnaíse. Aqueles compreendidos entre as estações 600E e 700E, apresentando contraste de densidade também igual a 0,18 g/cm³, foram interpretados como uma lente de rocha máfica dobrada isoclinalmente. Ainda associado a uma lente de rocha máfica está o polígono inferido entre as estações 0 e 100E, apresentando contraste de densidade de 0,195 g/cm³. Os dois polígonos com contraste de densidade de 0,135 e 0,10 g/cm³ devem estar associados a variações de densidade dentro da própria rocha encaixante provocadas provavelmente por dobramentos na mesma, uma vez que se trata de uma área tectonicamente perturbada. É bom salientar que para pequenas anomalias sobre corpos com extensão inferior a 5 vezes a sua largura, se torna duvidosa a sua interpretação levando-se em conta que o método de interpretação gravimétrica bidimensional em pauta considera para tal, corpos com extensão infinita. Os contrastes de densidade considerados entre as máficas e a encaixante representam valores médios para o Vale do Curaçá.

MAGNETOMETRIA

Metodologia

O levantamento magnético da área pesquisada foi executado com a mesma malha do levantamento gravimétrico. Foram realizadas um total de 1.404 medidas utilizando o magnetômetro "Flux-gate", modelo M-700 fabricado pela McPhar Geophysics Limited. Este equipamento é utilizado em levantamentos terrestres e mede a componente vertical do campo magnético com uma capacidade de medida de zero a ± 100.000 nano Tesla (nT), podendo efetuar medidas relativas com precisão máxima de aproximadamente ± 10 nT. As medidas realizadas na área de Suçuarana foram relativas à estação zero da linha zero. Para efeito de controle das variações diurnas do campo magnético, o levantamento obedeceu ao seguinte critério. O início do levantamento de cada linha sempre se deu na estação zero e ao término de cada linha se fez a repetição da leitura na estação zero. O intervalo de tempo decorrido entre as duas leituras na estação zero nunca ultrapassou 1,5 horas, não tendo sido observada neste intervalo de tempo nenhuma variação do campo magnético superior a 30 nT. O levantamento da linha mestra serviu para a correlação entre as linhas.

Os dados do levantamento magnético foram lançados em mapa e traçadas as iso-linhas (Fig. 5), com intervalo de contorno de 40 nT. Foi traçado também o perfil magnético da linha 800N (Fig. 7).

Interpretação dos Dados

Os dados do levantamento magnetométrico da área de Suçuarana foram interpretados com base no mapa de contorno ilustrado na Fig. 5. O perfil magnético da linha 800N, ilustrado na Fig. 7 foi interpretado pelo método de Talwani et al. (1959). Esta interpretação consiste em inferir, com base em dados de geologia de superfície e de sondagens, corpos bidimensionais, fazendo variar a sua forma geométrica, profundidade e susceptibilidade magnética, de modo a obter, através de programa de computador, a curva teórica que melhor se aproxime da curva obtida no campo. A região do mapa magnético limitada pelas coordenadas 400E a 600E e 400N a 900N foi interpretada tridimensionalmente utilizando um programa de computador elaborado com base na equação do campo magnético devido a prismas retangulares, desenvolvida por Zietz & Andraesen (1967). A escolha desta região para interpretação tridimensional foi motivada pela maior concentração de informações geológicas, inclusive de 3 furos de sondagens. O mapa magnético da região interpretada tridimensionalmente, o modelo matemático e o mapa magnético calculado a partir do modelo estão ilustrados nas Figs. 8, 9 e 10, respectivamente.

As anomalias principais observadas no mapa magnético (Fig. 5) apresentam valores que variam de 200 a 360 nT. Na parte central do mapa há alinhamentos magnéticos com "trend" aproximado N-S associados ao corpo máfico

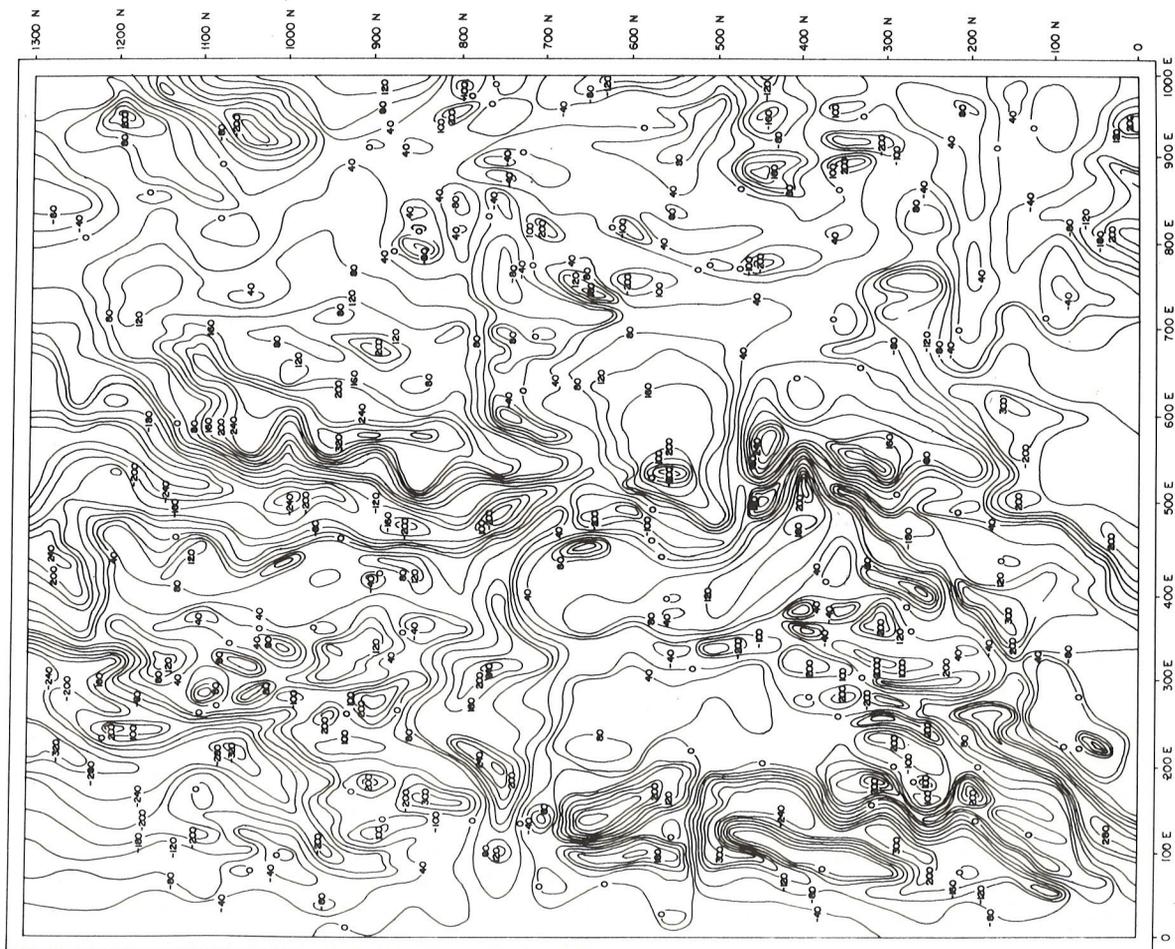


Figura 5 — Mapa magnético da área de Suçuarana (intervalo de contorno = 40 nT).

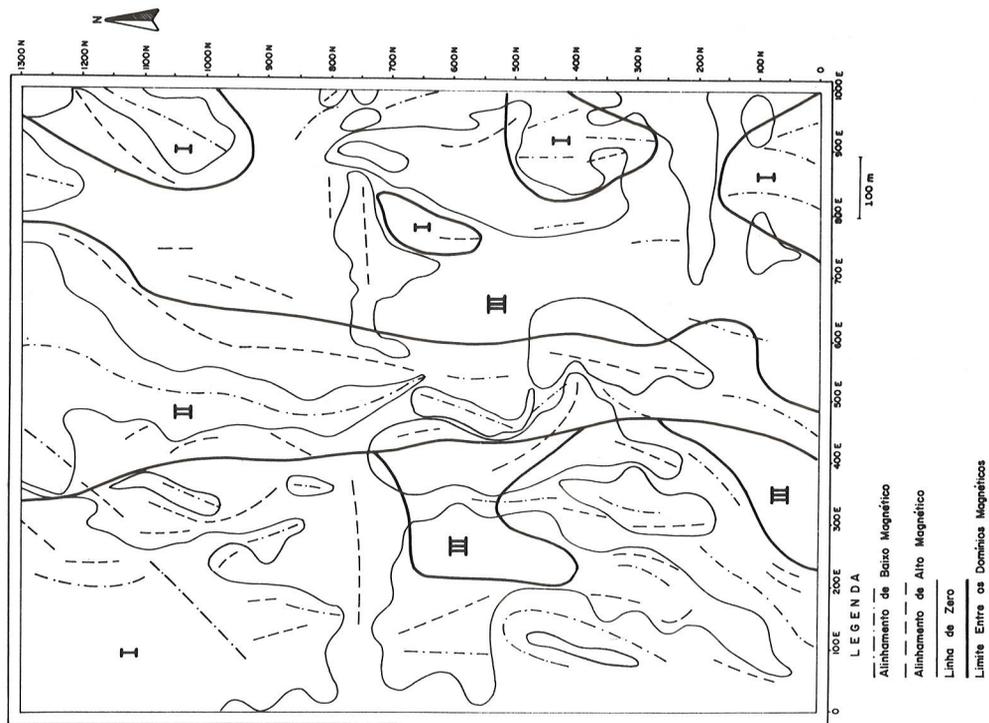


Figura 6 — Mapa de domínios magnéticos.

principal da área. Esta parte do mapa está ilustrada no mapa de domínios magnéticos (Fig. 6) como sendo o domínio II. No lado oeste do mapa da Fig. 5 há uma maior densidade de linhas evidenciando assim, que as rochas localizadas à oeste do corpo máfico principal apresentam um maior conteúdo de minerais magnéticos do que as rochas do lado leste do corpo. Este fato pode também ser visualizado no mapa de domínios magnéticos, o qual foi dividido em zonas que compreendem os três domínios magnéticos principais da área. O domínio I é caracterizado por uma maior densidade de alinhamentos de altos e baixos magnéticos com valores do campo magnético de até 300 nT, evidenciando rochas com intensidade de magnetização relativamente alta. O domínio II corresponde à faixa central do mapa magnético e se caracteriza por alinhamentos de altos e baixos magnéticos com "trend" aproximadamente Norte-Sul. Este "trend" está associado ao corpo máfico principal da área, o qual, de acordo com o mapa geológico (Fig. 2) se apresenta com uma largura aparente em torno de 100m e alongado na direção Norte-Sul. O domínio III corresponde às zonas menos magnéticas da área caracterizada pela pouca incidência de alinhamentos magnéticos e valores de campo relativamente baixos. Na parte do mapa magnético compreendida pelo domínio I, o baixo magnético com amplitude de -2000 nT, localizado pelas coordenadas 320E - 300N, foge ao padrão descrito para este domínio podendo estar associado a um pequeno corpo magnetizado muito próximo da superfície, uma vez que se trata de uma anomalia estreita com alto gradiente. A anomalia observada no canto nordeste do mapa magnético corresponde a um dipolo magnético com direção aproximadamente Norte-Sul, considerada como pertencente ao domínio magnético I, podendo entretanto estar associada a um pequeno corpo máfico profundo, encoberto pelo aluvião. A anomalia localizada pelas coordenadas 60E a 200E e 500N a 700N, parece estar relacionada a um corpo limitado nos seus lados sul e norte por duas falhas de direção aproximadamente E-W. A provável existência do falhamento no lado norte do corpo é reforçada pelo alongamento na direção E-W da anomalia acima da linha 700N e à oeste do mapa.

Os lineamentos magnéticos são predominantemente N-S e em menor quantidade nas direções NE-SW e E-W. Estes podem estar associados aos falhamentos ou às fraturas com desenvolvimento de mineralização magnética, exceto aqueles condicionados ao corpo máfico principal da área. A resposta magnética do corpo máfico na sua porção norte se assemelha à resposta gravimétrica nesta mesma região mostrando uma boa caracterização para o mesmo. Na porção sul as respostas magnética e gravimétrica também se assemelham. Entretanto, evidenciam irregularidades na continuidade do corpo máfico pelos valores baixos e pouco uniformes de campo magnético e de gravidade.

As interpretações bidimensional e tridimensional revelaram que as rochas da área investigada possuem tanto magnetização induzida como remanente. A interpretação bidimensional do perfil 800N (Fig. 7) revelou valores de

susceptibilidade magnética variando de 0,003 a 0,022. Os valores baixos de susceptibilidade magnética correspondem às zonas do domínio magnético III onde predominam rochas pouco magnéticas, provavelmente quartzo-feldspato gnaisse representado no mapa geológico (Fig. 2). Os valores mais altos de susceptibilidade correspondem às zonas dos domínios magnéticos I e II. Segundo o mapa geológico, o domínio I corresponde à zona de biotita gnaisse associada a corpos graníticos e o domínio II ao corpo máfico constituído na sua maior parte por anfíbolito. Com o modelo matemático obtido na interpretação dos perfis magnéticos não foi possível uma correlação litológica-estrutural semelhante àquela feita para o método gravimétrico. Isto por se tratar de uma área intensamente deformada com heterogeneidade na distribuição de minerais magnéticos num mesmo tipo litológico, e também porque as anomalias magnéticas são mais numerosas, mais erráticas, menos persistente e de maior magnitude em relação às anomalias gravimétricas (Telford et al., 1976). Desta forma o modelo é então associado a zonas magnéticas dentro dos tipos litológicos existentes.

A interpretação tridimensional (Figs. 8, 9 e 10) foi feita na região do mapa limitada pelas coordenadas 400E, 660E e 400N, 900N, abrange a maior parte do corpo máfico, e mostra que este apresenta zonas com diferentes intensidades de magnetização. Estas zonas, de acordo com o modelo da Fig. 9, atingem uma profundidade de 200m, podendo esta ser variável uma vez que a profundidade de base para o modelo pouco influencia na reprodução das curvas práticas. As zonas magnéticas mais significantes estão condicionadas ao corpo máfico, principalmente na sua porção norte.

ARRANJO GRADIENTE MODIFICADO

Definição

O arranjo gradiente convencional, Fig. 11a, consiste de um par de eletrodos de corrente e um par de eletrodos de potencial distribuídos em linha. Os eletrodos de corrente ocupam as extremidades enquanto os eletrodos de potencial, com uma separação fixa, se movem juntos de modo a mapear uma faixa correspondente e um terço da distância que separa os eletrodos de corrente (Coggon, 1973). A razão entre a separação dos eletrodos de corrente e a separação dos eletrodos de potencial não deve ser inferior a 30. De acordo com Coggon (1973) o arranjo gradiente fornece informação sobre a inclinação dos corpos e apresenta uma boa resolução horizontal. Entretanto a resposta a estruturas verticais e estreitas é fraca, as anomalias são fortemente afetadas por irregularidades no "overburden", e não há uma discriminação de profundidade efetiva.

O arranjo utilizado nesta pesquisa sofreu uma modificação com relação ao arranjo convencional. Foram utilizados 10 eletrodos de corrente e 2 de potencial dispostos

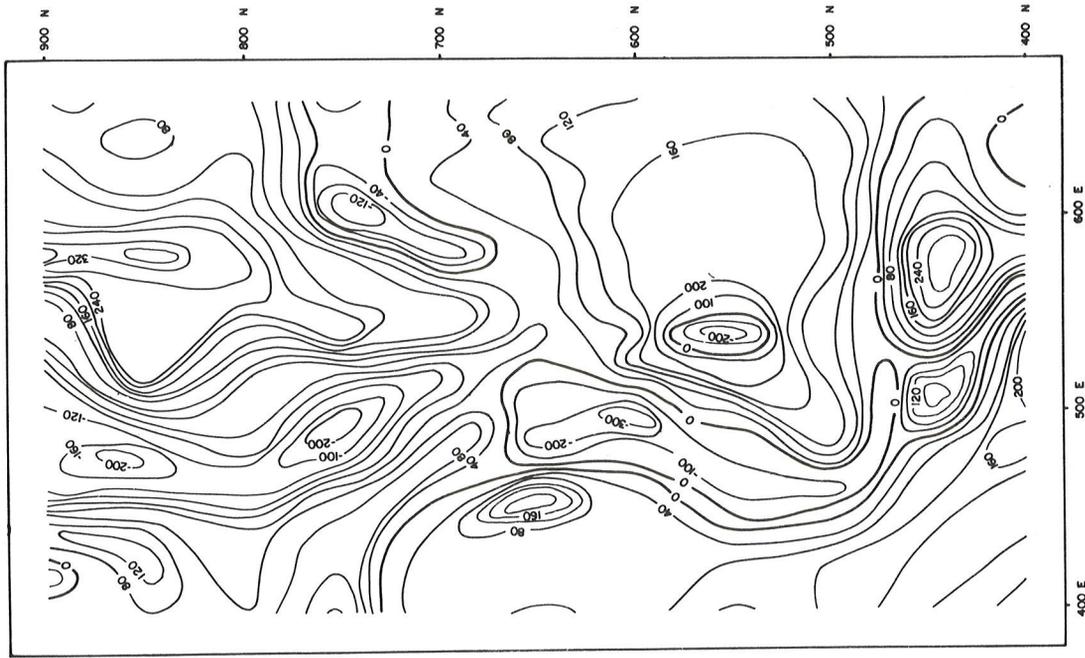


Figura 8 — Região do mapa magnético selecionada para interpretação tridimensional.

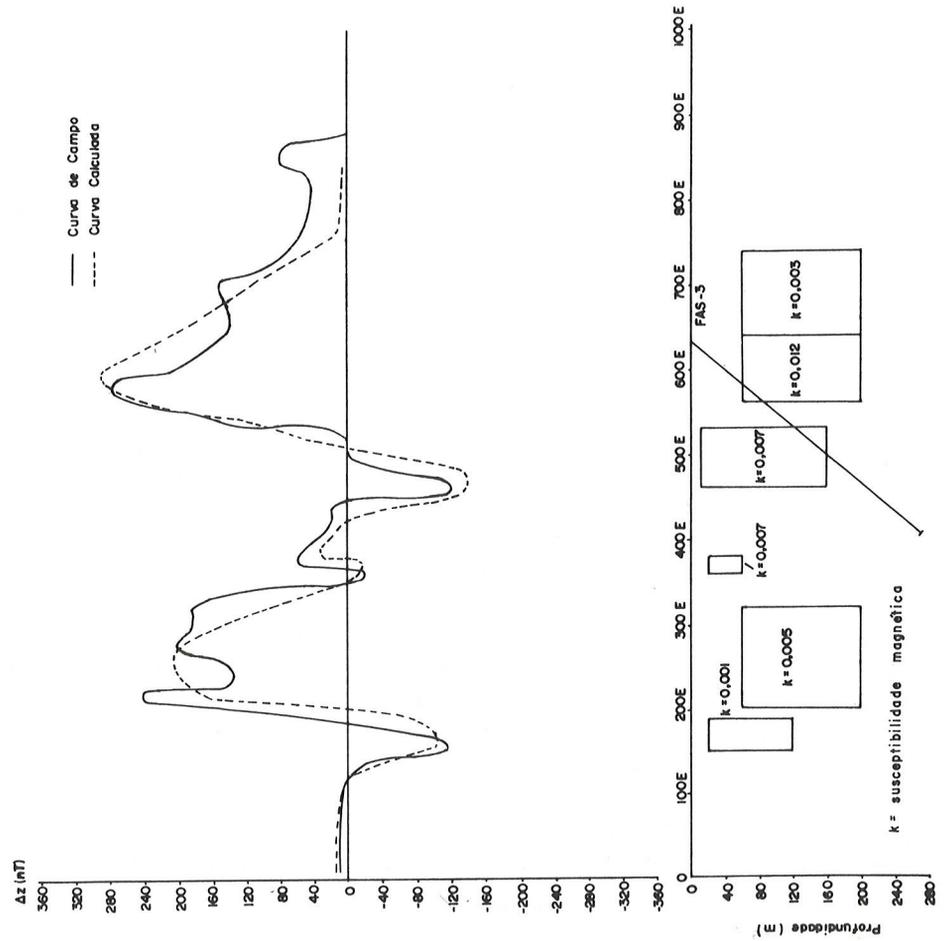


Figura 7 — Perfil magnético da linha 800N.

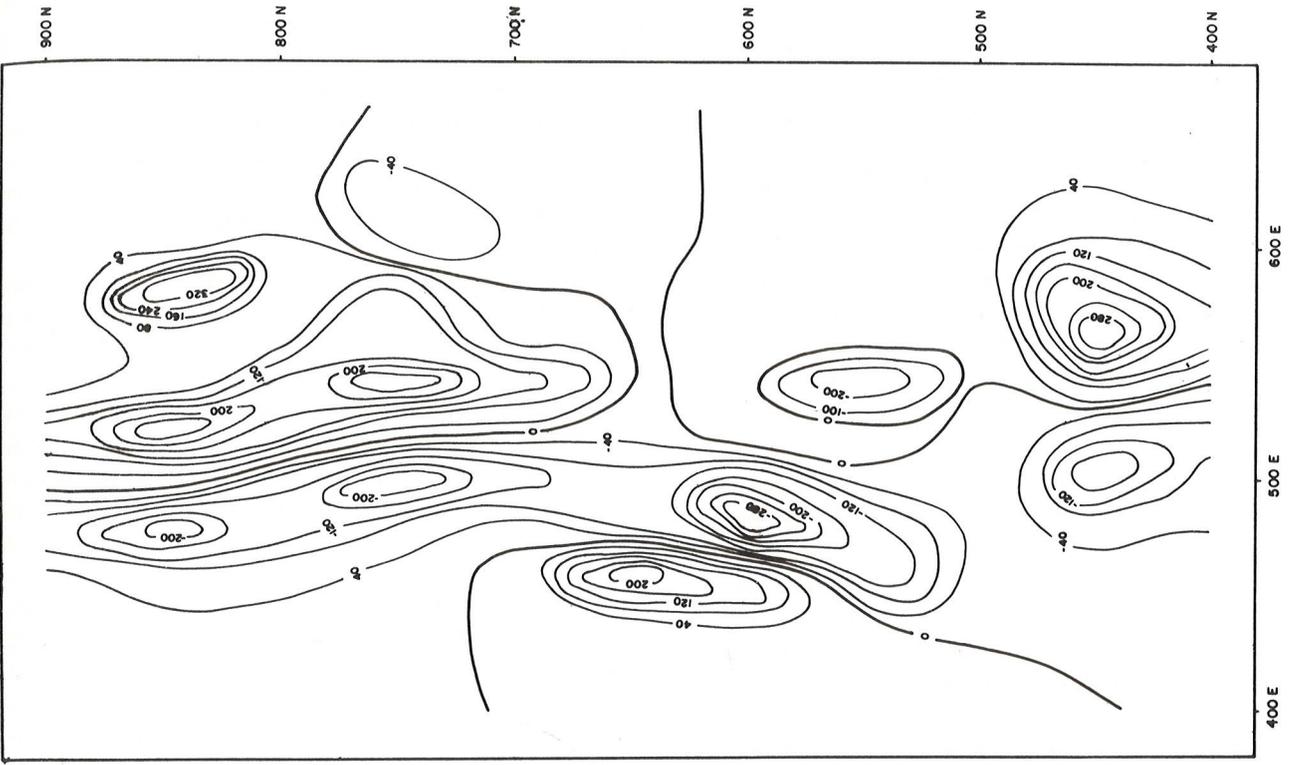


Figura 10 — Mapa magnético calculado a partir do modelo da Figura 9.

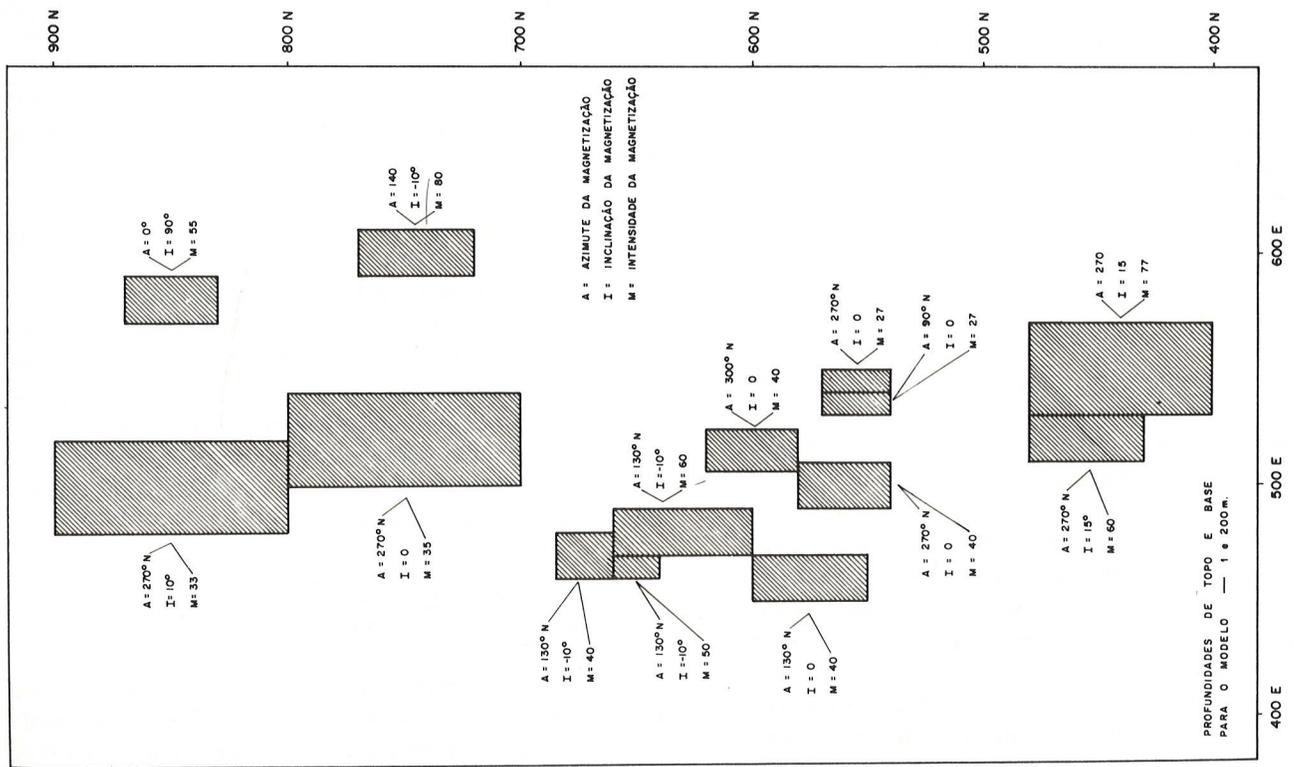


Figura 9 — Interpretação magnética tridimensional da região do mapa magnético ilustrada na Figura 8.

como mostram as Figs. 11a, 11b e 11c. A utilização de 10 eletrodos de corrente objetivou uma distribuição mais uniforme de corrente sob o terreno. Foi mantido um eletrodo de potencial fixo de modo a permitir os cálculos dos valores do campo elétrico. Com os dados obtidos pôde-se calcular os valores do campo elétrico E-W e do campo elétrico N-S. Os valores de campo elétrico E-W, lançados em mapa, apresentam uma boa resolução horizontal com relação a corpos condutores, verticais ou sub-verticais, alongados na direção transversal as linhas de corrente. Os pequenos corpos condutores são evidenciados pelo campo elétrico N-S, uma vez que com a corrente fluindo na direção E-W, normalmente o campo elétrico seria nulo na direção N-S. Isto não ocorre devido às distorções nas linhas de campo provocado pela presença destes corpos, fazendo surgir picos positivos e negativos de campo elétrico nas suas proximidades.

No Apêndice 1 está apresentado o desenvolvimento matemático para o cálculo do campo elétrico levando em conta um número infinito de eletrodos, aplicado ao caso do dique vertical. As curvas teóricas de campo elétrico, também apresentadas no Apêndice 1, serviram de base para a interpretação da curva prática de campo elétrico referente à linha 800N. O Apêndice 2 mostra as expressões para o campo elétrico utilizando um arranjo de 2 eletrodos de corrente aplicado também ao caso do dique vertical. Desta forma foi possível uma comparação entre o campo para um número infinito de eletrodos de corrente e o campo para 2 eletrodos de corrente. A comparação das curvas para ambos os casos apresentados nos Apêndices 1 e 2, mostra que no meio condutivo, ao longo do dique, os valores de campo praticamente não variam, enquanto que no meio resistivo, a encaixante, próximo da fonte de corrente os valores de campo crescem mais rapidamente para o caso de 2 eletrodos do que para o caso de infinitos eletrodos.

Metodologia

O levantamento com o método gradiente, realizado na área de Suçuarana, cobriu uma faixa limitada pelas linhas 400N e 900N e estações 400E e 660E. Esta região se apresentava como a mais importante da área face às informações de geologia e dos furos de sondagem existentes. Foram realizadas um total de 154 medidas, utilizando o equipamento modelo P-650 fabricado pela McPhar Geophysics Limited, o qual mede resistividade aparente para o arranjo dipolo-dipolo, efeito percentual de frequência EPF e intensidade de corrente.

No levantamento realizado foi feito um perfil utilizando o arranjo com 2 eletrodos de corrente e comparado com o perfil obtido com o arranjo de 10 eletrodos. Esta comparação está ilustrada na Fig. 12. Há uma maior oscilação dos valores de campo elétrico obtidos com 2 eletrodos de corrente, não permitindo assim um ajuste satisfatório destes valores com as curvas teóricas de campo elétrico.

A utilização de 10 eletrodos de corrente permite uma melhor distribuição de corrente sob o terreno obtendo uma melhor continuidade dos valores de campo elétrico. Os resultados teóricos obtidos permitem a determinação da condutividade e largura do corpo máfico e ainda a condutividade da rocha encaixante, embora os resultados práticos tenham sido prejudicados, no que diz respeito às suas semelhanças com os resultados teóricos, pela inclinação e presença de rochas resistivas no corpo máfico, imprimindo assim uma diferença entre a realidade de campo e o modelo teórico adotado.

O arranjo utilizado neste levantamento está ilustrado na Fig. 11. Inicialmente foram distribuídos os 10 eletrodos de corrente nas extremidades das linhas 900N, 850N, 800N, 750N e 700N. Dos dois eletrodos de potencial, um permaneceu fixo, para todo o levantamento, na estação 360E da linha 650N, e o outro serviu para a realização de medidas de 20 em 20 metros entre as estações 400E e 660E, ao longo das cinco linhas onde se encontravam os eletrodos de corrente. Após a realização das medidas nestas cinco linhas procedeu-se tal como ilustrado na Fig. 11. Quando da mudança dos eletrodos de corrente para as linhas seguintes, houve uma superposição nas duas últimas linhas para se ter uma melhor controle das medidas. Em algumas das medidas repetidas, através da superposição, houve pequenas variações com erro máximo de 20 ohm.m para $\rho_a/2\pi$ (10%) e 0,5 para EPF, foi optado nestes casos o valor médio entre as duas medidas.

Para cada medida foram registrados os valores de resistividade aparente ($\rho_a/2\pi$), efeito percentual da frequência (EPF) e intensidade de corrente (I). A partir dos dados de resistividade aparente e intensidade de corrente, a diferença de potencial (ΔU) em mV é dada através da seguinte expressão:

$$\Delta U = \frac{\rho_a I}{K} \cdot 10^3 \text{ (mV)}, \quad (1)$$

onde: $K = \pi \ell n (n + 1) (n + 2)$ é o fator geométrico do dispositivo dipolo-dipolo, assumido pelo equipamento. Fazendo $n = 1$ e $\ell = 400$ no equipamento, K tem o valor de 2400π ; e I representa a corrente medida do equipamento. Uma vez que a corrente não permaneceu constante na realização das medidas, foi necessário então calcular o valor do potencial no eletrodo de potencial fixo (U_F) para cada medida utilizando a seguinte expressão:

$$U_F = \frac{\bar{\rho}_a I}{\pi} \cdot 10^2 \cdot \sum \frac{1}{R \text{ (s)}} \text{ (mV)}, \quad (2)$$

onde $\bar{\rho}_a$ é o valor médio da resistividade da área, estimada em 500 ohm.m com base em trabalhos anteriormente realizados, e $R \text{ (s)}$ são as distâncias do eletrodo de potencial fixo aos eletrodos de corrente.

De posse dos valores de ΔU e de U_F , os valores do potencial (U) em cada estação de medida são dados por:

$$U = U_F - \Delta U. \quad (3)$$

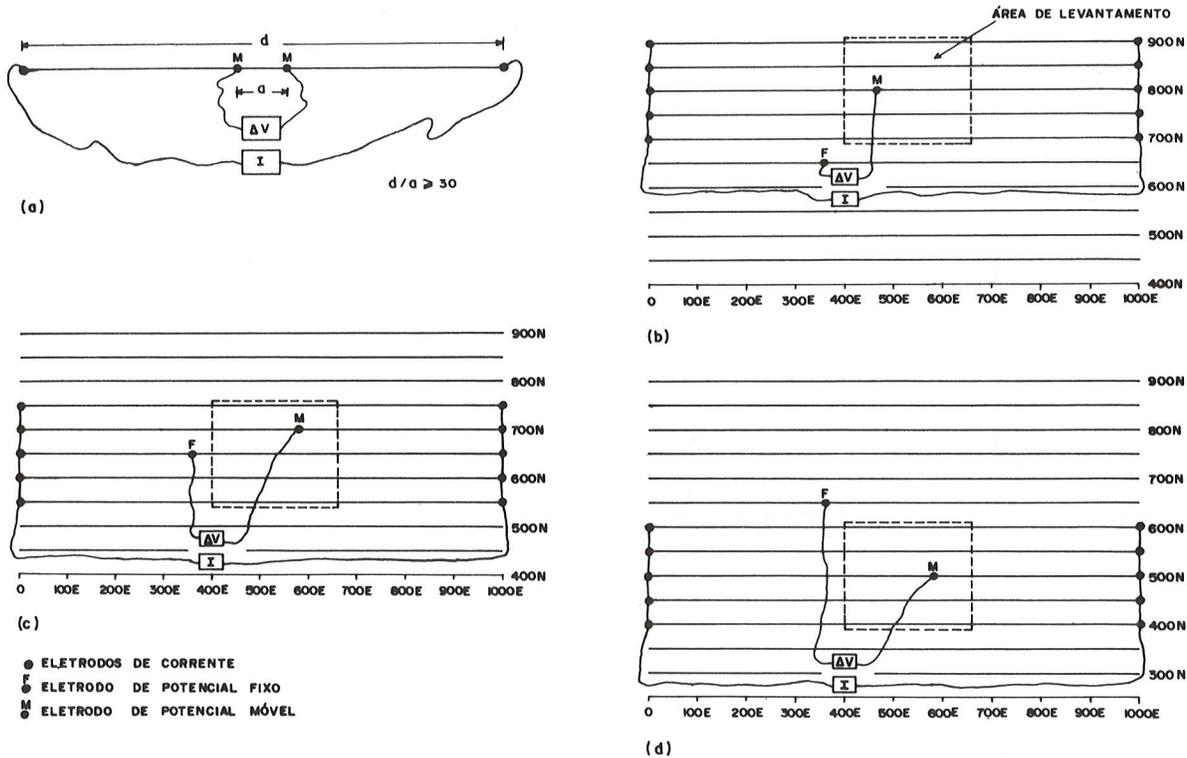


Figura 11 — Arranjo gradiente. (a) Convencional. (b), (c) e (d) Utilizados na pesquisa.

Uma vez calculados os valores de U para todas as estações foi então possível calcular o gradiente do potencial nas direções E-W e N-S. O campo elétrico leste-oeste foi calculado utilizando a seguinte expressão:

$$E_{EW} = \frac{U_j - U_i}{\Delta e} \cdot 10^3 \text{ mV/km}, \quad (4)$$

onde U_j e U_i são os valores do potencial em 2 estações consecutivas ao longo de uma linha de direção leste-oeste e Δe é o espaçamento entre as estações. O campo elétrico norte-sul foi calculado de maneira semelhante, apenas tomando U_j e U_i como sendo os valores do potencial em duas estações consecutivas alinhadas na direção norte-sul.

A etapa final consistiu na elaboração dos mapas de campo elétrico leste-oeste (Fig. 13) e campo elétrico norte-sul (Fig. 14) e também o mapa de efeito percentual de frequência medido, EPF, (Fig. 15).

Interpretação dos Dados

O mapa de campo elétrico E-W (Fig. 13) mostra uma faixa condutora, alongada na direção N-S, estando esta em concordância com o corpo máfico principal da área. Existe ainda uma correspondência desta faixa com as anomalias gravimétricas e magnéticas associadas ao corpo máfico. A linha de 400 mV/km parece acompanhar o contato do corpo máfico evidenciando para este uma espessura média em torno de 120 metros. Na parte sul do mapa há um alargamento

da faixa condutora sugerindo a presença de um condutor marginal a leste do corpo condutor principal. Em 800N, 620E ocorre um condutor, evidenciado tanto no mapa de campo elétrico E-W como no de campo elétrico N-S. Nesta região, a gravimetria e a magnetometria sugerem a presença de um falhamento de direção NE-SW. Nas proximidades da estação 500E da linha 850N há dois núcleos com valores de campo elétrico de 500 mV/km, que podem estar associados a zonas contendo uma maior quantidade de minerais mais resistivos, dentro do corpo máfico. As rochas encaixantes, de natureza gnáissica, apresentam baixa condutividade com valores de campo elétrico de até 1,3 V/km.

O fluxo de corrente se dá na direção leste-oeste gerando um campo elétrico nesta direção. Caso o terreno fosse homogêneo e isotrópico o campo elétrico seria nulo na direção norte-sul. Como isto não ocorre, surgem distorções nas linhas de campo devido a presença de inhomogeneidades no terreno. Dessa forma, mapa de campo elétrico N-S realça a presença de pequenos corpos marginais máficos ou zonas com maior concentração de minerais metálicos. As anomalias de campo elétrico N-S devido a estes pequenos corpos marginais aparecem sob a forma de núcleos positivos e negativos. Assim as anomalias do campo elétrico N-S são úteis na indicação de pequenos corpos condutores. A interpretação destas anomalias consiste geralmente da tentativa de resolver o problema do potencial com a ajuda de modelos simples. As soluções são usadas para estimar o tamanho, forma e profundidade do corpo condutor podendo ser interpretado com base no modelo de esfera condutora num

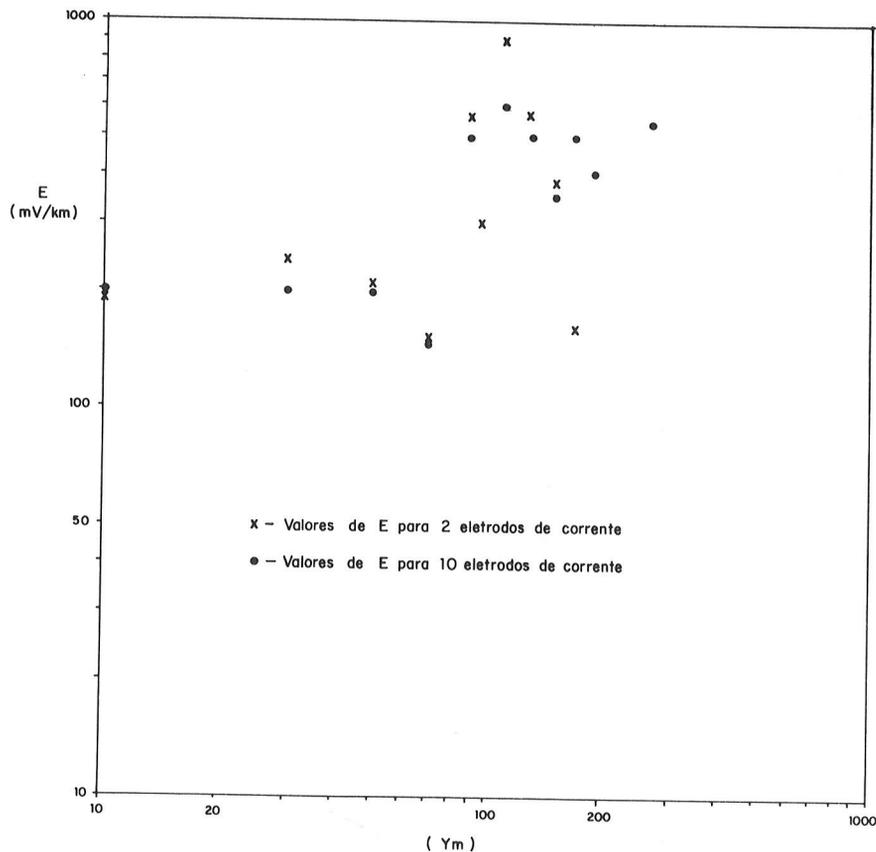


Figura 12 — Comparação dos valores de campo elétrico para 2 e 10 eletrodos de corrente para o perfil 800N.

semi-espaco uniforme (Grant & West, 1965, p. 421). No mapa de campo N-S (Fig. 14) há três anomalias que se assemelham àquelas produzidas por corpos condutores esféricos. Eles estão localizados nos pontos 420E, 500N, 640E, 800N, 640E e 500N.

De um modo geral o efeito percentual de frequência, EPF, da área de Suçuarana se apresenta relativamente baixo. Dentro da área levantada o "background" é de 2% enquanto o valor máximo atingido foi de 3,5%. Apesar das limitações do arranjo gradiente com relação à interferência do acoplamento eletromagnético, estes valores são confiáveis. Através de cálculos realizados por Ludwig (1972), o valor do EPF, devido ao acoplamento é estimado em torno de $\pm 0,2\%$. Os maiores valores de EPF ocorrem ao longo da linha 850N. As anomalias gravimétricas e magnéticas ao longo da linha 850N concordam com os valores altos de EPF. Como na linha 800N está o furo de sondagem FAS-3, o qual revelou uma faixa mineralizada com teor de cobre relativamente alto, é possível que esta zona tenha uma concentração maior de sulfetos em relação ao restante da área pesquisada. Convém salientar, entretanto, que a posição no plano dos valores de EPF é aparente face à utilização de um eletrodo de potencial fixo. Deve haver uma convergência dos valores de EPF em direção ao eletrodo de potencial fixo localizado na estação 360E da linha 650N.

O perfil de campo elétrico E-W da linha 400N foi interpretado com base nas curvas teóricas apresentadas no

Apêndice 1. A curva de campo foi ajustada à curva teórica calculada para $\sigma_2/\sigma_1 = 2$ e $d/D = 0,12$ (Fig. 16). Com relação ao corpo condutor isto indica uma espessura de aproximadamente 70 metros e uma condutividade $8,4 \times 10^{-3}$ Siemens/m, contra $4,2 \times 10^{-3}$ Siemens/m para a rocha encaixante. A Fig. 16 mostra os valores experimentais crescendo mais rapidamente do que a curva teórica. É provável que este fato esteja relacionado com uma inclinação do corpo máfico para oeste, uma vez que as curvas teóricas foram calculadas considerando um corpo vertical.

O perfil de campo elétrico E-W da linha 800N foi também interpretado com base nas curvas do Apêndice 1. A curva prática foi ajustada à curva teórica calculada para $\sigma_2/\sigma_1 = 2,5$ e $d/D = 0,12$ (Fig. 17). Foi obtido para o corpo condutor uma espessura de aproximadamente 140 metros e uma condutividade da ordem de $3,8 \times 10^{-3}$ Siemens/m contra $1,5 \times 10^{-3}$ Siemens/m para a rocha encaixante.

A tentativa de interpretação dos demais perfis com base no modelo do Apêndice 1 não apresentou ajustes satisfatórios dos valores práticos com as curvas teóricas calculadas a partir do modelo. Isto porque o corpo não é vertical, e também apresenta, em quase toda a sua extensão, veios de quartzo e nêveis de rochas pegmatíticas mascarando a sua condutividade. Deste modo a realidade de campo não é próximo o suficiente do modelo adotado para a interpretação.

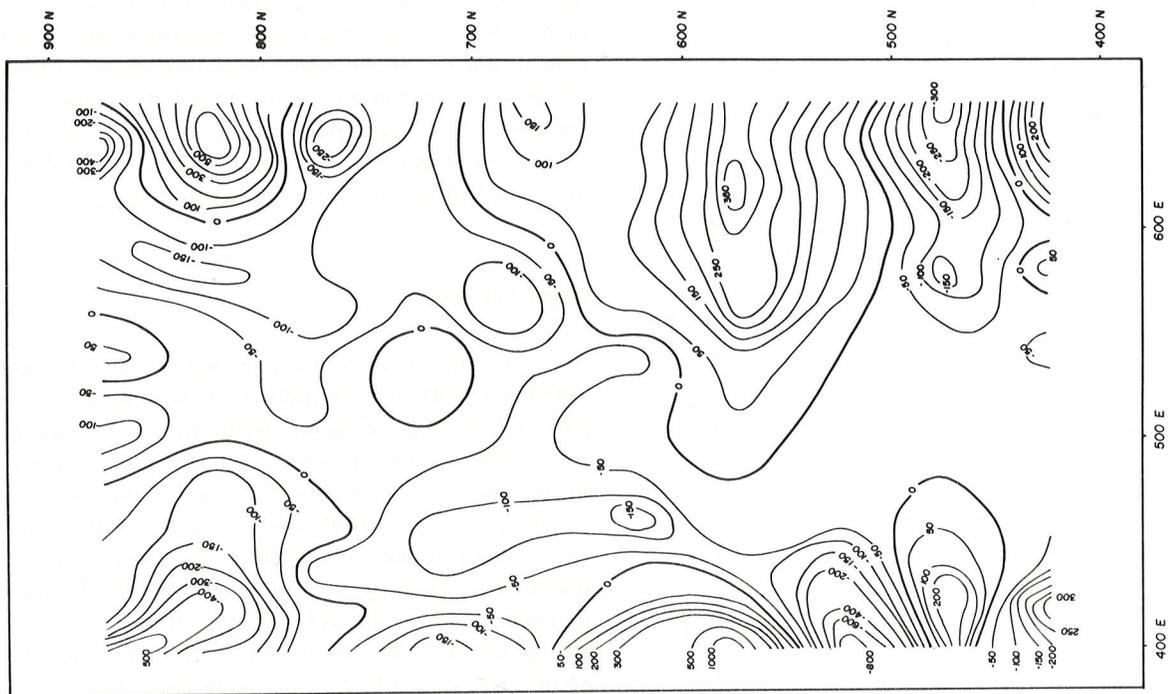


Figura 14 — Mapa de campo elétrico N-S (intervalo de contorno = 50 mV/km).

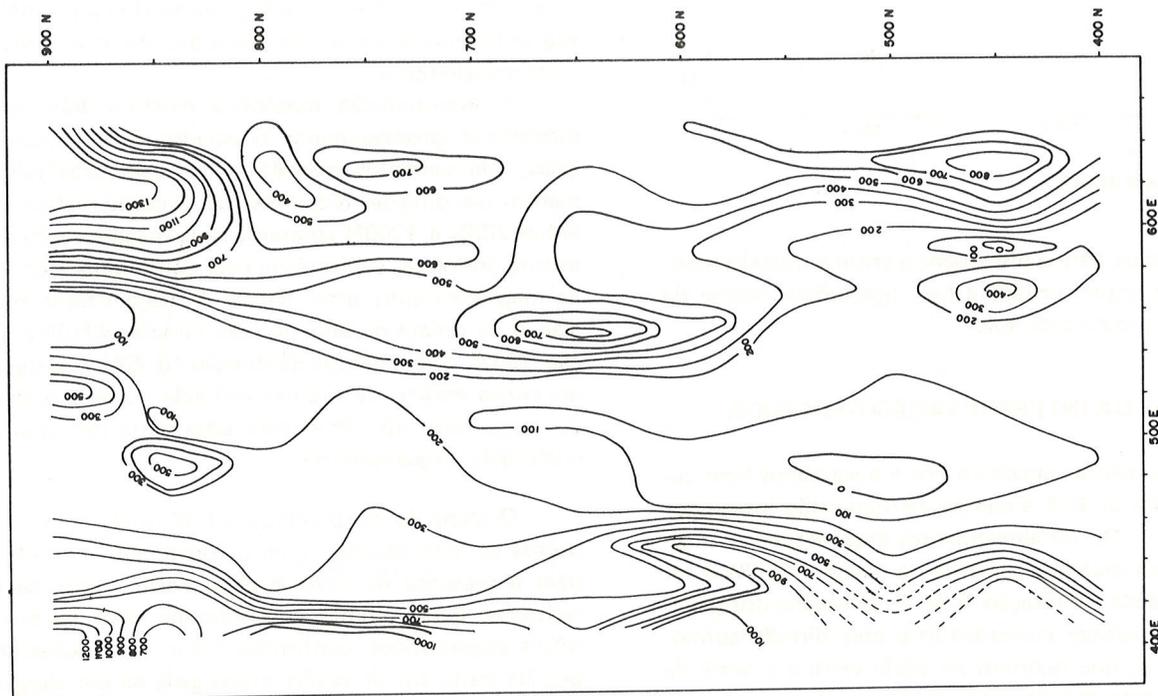


Figura 13 — Mapa de campo elétrico E-W (intervalo de contorno = 100 mV/km).

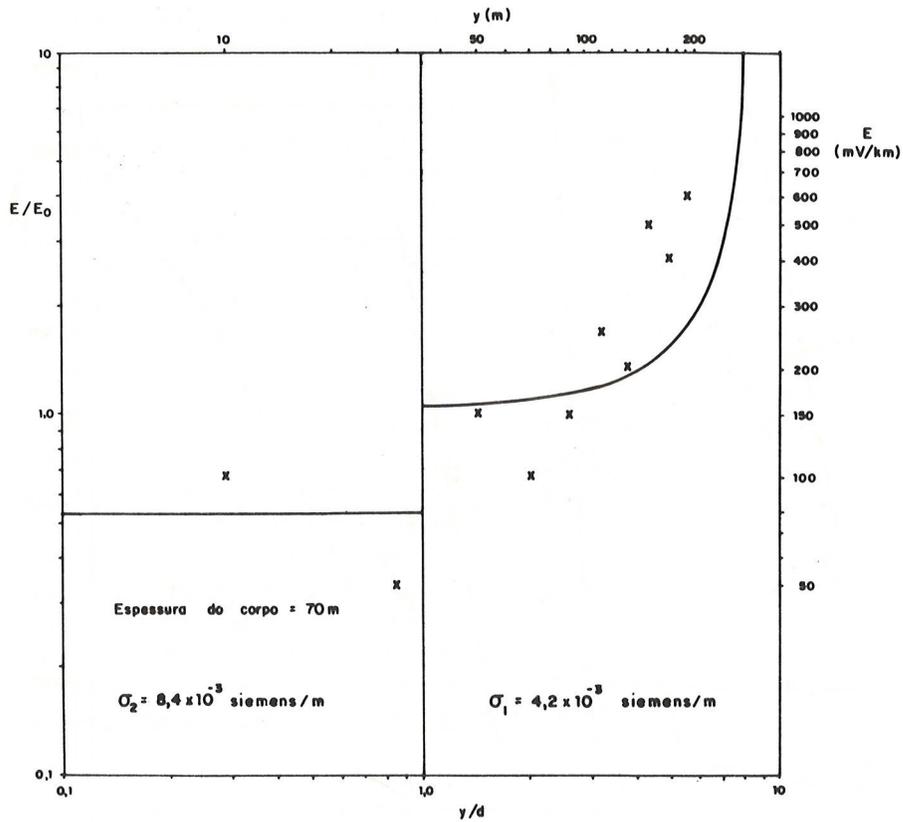


Figura 16 — Interpretação do perfil de campo elétrico da linha 400N.

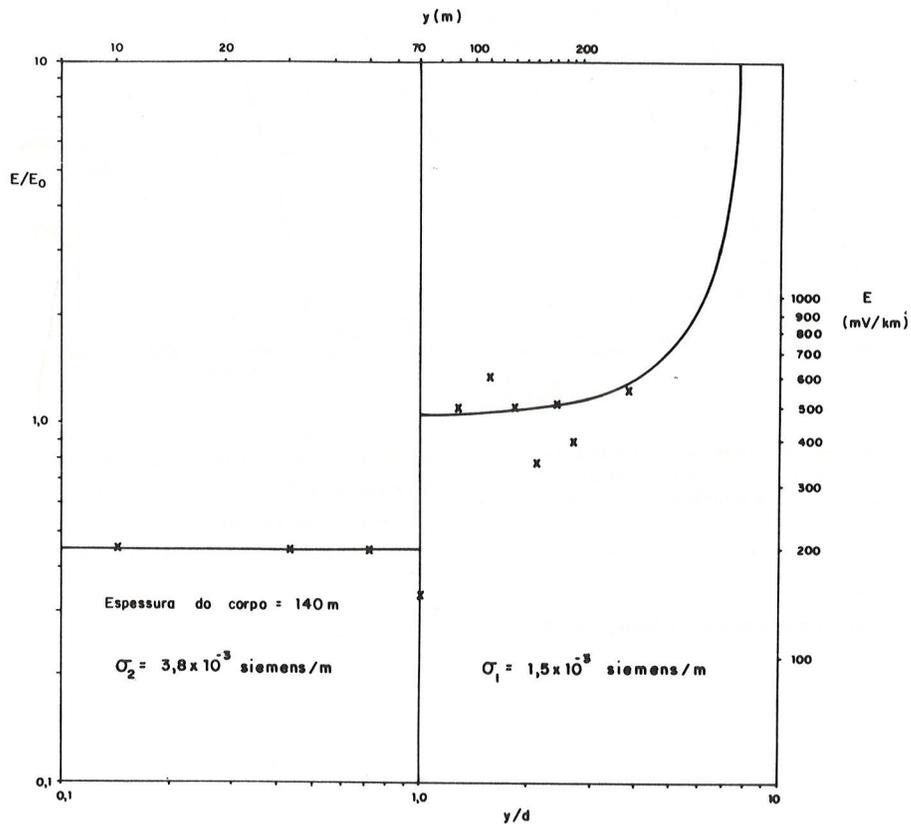


Figura 17 — Interpretação do perfil de campo elétrico da linha 800N.

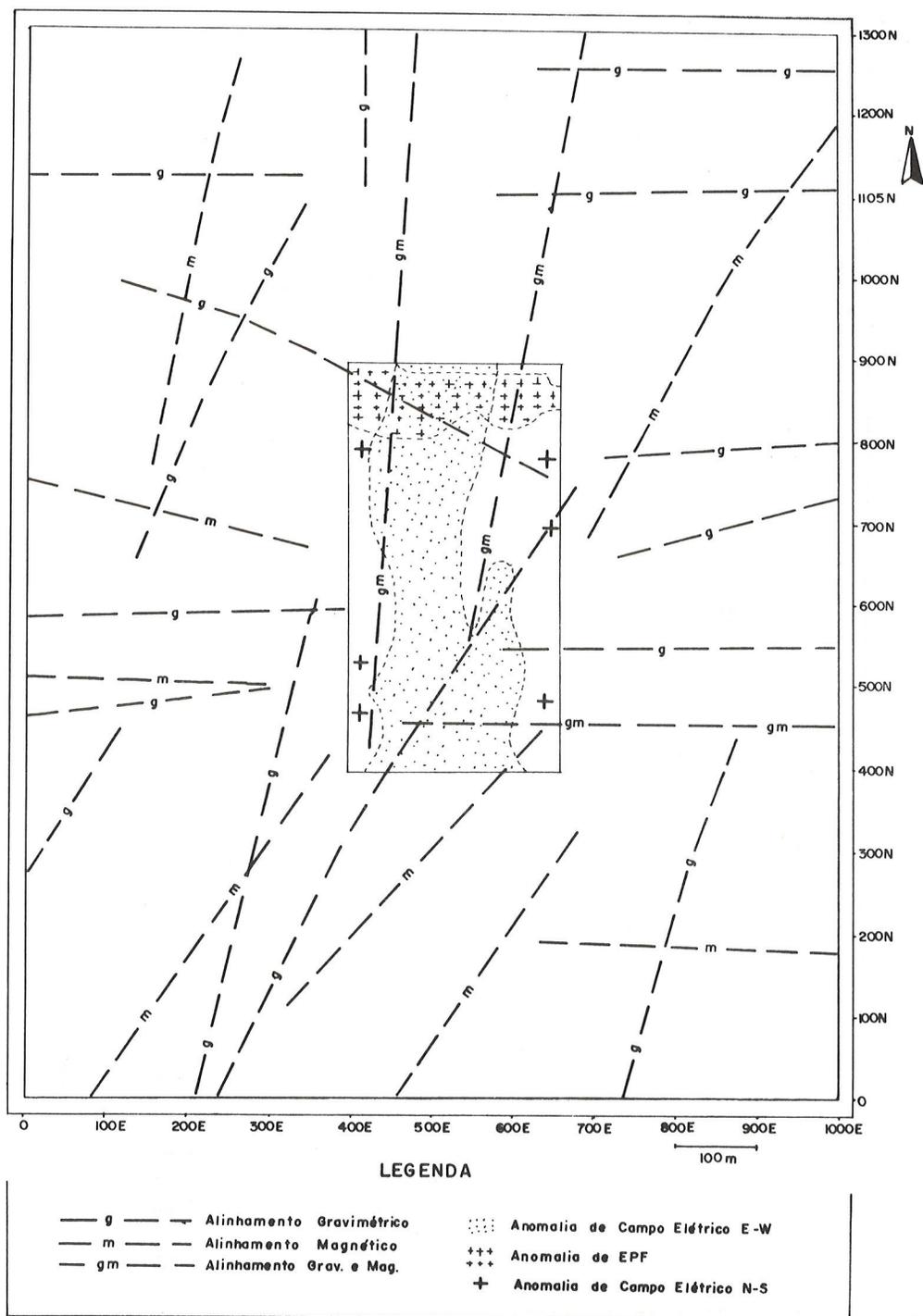


Figura 18 — Interpretação das anomalias geofísicas.

As interpretações dos perfis de campo elétrico das linhas 400N e 800N indicaram espessuras para o corpo máfico de 70 e 140 m, respectivamente e condutividade entre $3,8 \times 10^{-3}$ e $8,4 \times 10^{-3}$ Siemens/m. Os resultados teóricos apresentados nos Apêndices 1 e 2 serviram não só para a interpretação da espessura e condutividade do corpo máfico mas também para uma avaliação da qualidade dos resultados práticos obtidos no levantamento com o arranjo gradiente modificado.

O mapa de EPF sugere que a mineralização ocorre com uma disseminação baixa e mais ou menos uniforme ao longo da área. Teores de cobre superiores a 0,60% foram observados nos furos FAS-3 e FAS-5. Onde ocorrem os maiores valores de EPF, a mineralização disseminada deve apresentar um teor mais elevado. A localização dos valores de EPF no plano é aparente, decorrente da utilização de um eletrodo de potencial fixo durante o levantamento de modo que há uma convergência espacial destes valores em direção ao eletrodo fixo localizado na estação 360E da linha 650N. Como o valor máximo de EPF devido ao acoplamento eletromagnético foi estimado em torno de $\pm 0,2\%$, este não prejudicou sobremaneira os resultados.

Apesar das limitações na utilização do arranjo gradiente com relação ao efeito do acoplamento eletromagné-

tico, a modificação realizada, utilizando 10 eletrodos de corrente, permitiu uma distribuição homogênea da corrente sob o terreno, e obter uma resposta uniforme dos diversos condutores. Os dados de campo elétrico E-W apresentaram uma boa resolução horizontal com relação a corpos condutores verticais ou sub-verticais e alongados na direção N-S (transversais às linhas de corrente). O campo elétrico N-S evidenciou os condutores não alongados.

Diante das informações obtidas dos métodos empregados nesta pesquisa concluímos que a porção norte do corpo máfico a partir da linha 700N, provavelmente se apresenta com uma disseminação de sulfetos em teores mais elevados. Este fato é ainda reforçado pelos resultados do furo de sonda FAS-3, realizado na linha 800N, o qual revelou os maiores teores em cobre com relação aos demais furos realizados na área. Assim recomendamos trabalhos adicionais de detalhe na parte norte da área.

Como consequência deste trabalho, a Carafba Metais S.A. realizou mapeamento geológico de detalhe e perfis de polarização induzida na parte norte da área. Um furo já foi executado na linha 1200N, o qual interceptou 50m de piroxenito mineralizado, contendo faixas métricas a 1% de cobre (Sá & Reinhardt, 1984).

REFERÊNCIAS

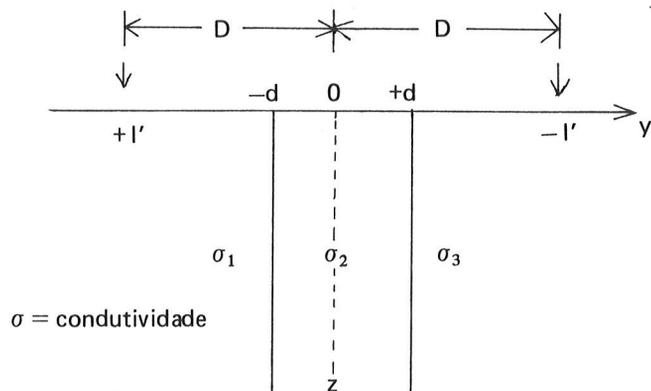
- COGGON, J. H. — 1973 — A comparison of IP electrode arrays, *Geophysics*, 38: 737-761.
- DELGADO, I. M. & SOUZA, J. D. — 1975 — Relatório final do Projeto Cobre-Curaçá, Convênio DNPM — CPRM. Vol. I-A.
- GRADSTHEYN, I. N. & RYSHIK, I. M. — 1965 — Tables of integrals, series, and products: Academic Press, New York, 1086 pp.
- GRANT, F. S. & WEST, G. F. — 1965 — Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 584 pp.
- LUDWIG, C. S. — 1972 — Gradient array induced polarization electromagnetic coupling response cases for practical field applications to the Mendocino Submarine Fracture Zone, Jour. Company, February.
- NETTLETON, L. L. — 1940 — Geophysical prospecting for oil. McGraw-Hill, New York, 444 pp.
- OLIVEIRA, M. A. & ROSSITER, F. A. M. — 1978 — Relatório final de pesquisa geológica do Projeto Carafba — PSI, DOCEGEO, Salvador.
- SÁ, E. P. & REINHARDT, M. C. — 1984 — Aspectos metodológicos da prospecção mineral no Vale do Rio Curaçá — Simpósio Brasileiro sobre Técnicas Exploratórias Aplicadas à Geologia, SBG, Núcleo da Bahia, p. 250-278.
- TALWANI, M., WORZEL, J. L. & LANDISMAN, N. — 1959 — Rapid gravity computations for two dimensional bodies with applications to the Mendocino Submarine Fracture Zone, Jour. Geophys. Res. 64: 49-59.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. & KEYS, D. A. — 1976 — Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 860 pp.
- VAN NOSTRAND, R. G. & COOK, K. L. — 1966 — Interpretation of resistivity data U.S.G.S. Prof. Paper nº 499.
- ZIETZ, I. & ANDREASEN, G. E. — 1967 — Remanent magnetization and aeromagnetic interpretation, p. 569-590, in Mining Geophysics, v. II, Theory, Tulsa, S.E.G., 708 pp.

Versão original recebida em Jul./84;

Versão final, em Out./85.

APÊNDICE 1

CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO DEVIDO À DUAS FONTES DE CORRENTE POR UNIDADE DE COMPRIMENTO PARA O CASO DO DIQUE VERTICAL CONFORME ESQUEMATIZADO NA FIGURA ABAIXO.



O campo elétrico primário ocorre em $y < -d$ e $y > +d$, e sua expressão para uma fonte de corrente por unidade de comprimento, colocada em $y < -d$ é a seguinte:

$$\vec{E}_0 = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \frac{\vec{\mu}}{[z^2 + (D+y)^2]^{1/2}}, \quad y < -d, \quad (\text{A1.1})$$

de modo que

$$E_{0y} = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \frac{D+y}{z^2 + (D+y)^2} \quad (\text{A1.2})$$

Pode-se demonstrar que:

$$\frac{I'}{\sigma_1 \pi} \frac{D+y}{z^2 + (D+y)^2} = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \int_0^{\infty} \exp[-s(D+y)] \cos(sz) ds, \quad (\text{A1.3})$$

e como $E_{0y} = -\frac{\partial U_0^+}{\partial y}$, o potencial primário pode ser expresso na seguinte forma:

$$U_0^+ = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp[-s(D+y)]}{s} \cos(sz) ds, \quad y < -d. \quad (\text{A1.4})$$

No meio 1, em $y < -d$, o potencial U_1^+ é dado por:

$$U_1^+ = U_0 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} F_1(s) \exp(sy) \cos(sz) ds \quad (\text{A1.5})$$

no meio 2 em $-d < y < d$ temos:

$$U_2^+ = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [F_2'(s) \exp(sy) + F_2''(s) \exp(-sy)] \cos(sz) ds, \quad (\text{A1.6})$$

e no meio 3, em $y > d$,

$$U_3^+ = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} F_3(s) \exp(-sy) \cos(sz) ds, \quad (\text{A1.7})$$

Sabemos entretanto, que as funções potencial e densidade de corrente são contínuas nas interfaces entre os meios 1, 2 e 3, ou seja:

para $y = -d$

$$U_1^+ = U_2^+$$

$$\text{e } \sigma_1 \frac{\partial U_1^+}{\partial y} = \sigma_2 \frac{\partial U_2^+}{\partial y}$$

para $y = d$

$$U_2^+ = U_3^+$$

$$\text{e } \sigma_2 \frac{\partial U_2^+}{\partial y} = \sigma_3 \frac{\partial U_3^+}{\partial y}$$

Aplicando estas condições de contorno determinamos que:

$$F_1(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\cdot \frac{[(\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-2sd) + (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3) \exp(2sd)] / 2\sigma_1}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-4sd) + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3)}, \quad (\text{A1.8})$$

$$F_2'(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\cdot \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-2sd)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-4sd) + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3)}, \quad (\text{A1.9})$$

$$F_2''(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-4sd) + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3)} e \quad (A1.10)$$

$$F_3(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{2\sigma_2}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3) \exp(-4sd) + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3)} \cdot \quad (A1.11)$$

O campo elétrico primário para a fonte de corrente por unidade de comprimento em $y < d$ é dado por:

$$\vec{E}_0^- = \frac{I'}{\sigma_3 \pi} \frac{\vec{\mu}}{[z^2 + (D-y)^2]^{1/2}}, y > +d, \quad (A1.12)$$

de modo que

$$E_{0y}^- = \frac{I'}{\sigma_3 \pi} \frac{D-y}{z^2 + (D-y)^2} \cdot \quad (A1.12a)$$

O potencial primário pode ser expresso como:

$$U_0^- = - \frac{I'}{\sigma_3 \pi} \int_0^\infty \frac{\exp[-s(D-y)]}{s} \cos(sz) ds \cdot \quad (A1.13)$$

No meio 1, em $y < -d$, o potencial é dado por:

$$U_1^- = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty G_1(s) \exp(sy) \cos(sz) ds \quad (A1.14)$$

no meio 2, em $-d < y < d$, temos:

$$U_2^- = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [G_2'(s) \exp(sy) + G_2''(s) \exp(-sy)] \cos(sz) ds \quad (A1.15)$$

e no meio 3, em $y < d$

$$U_3^- = U_0 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty G_3(s) \exp(-sy) \cos(sz) ds \cdot \quad (A1.16)$$

Aplicando as mesmas condições de contorno mencionadas no caso anterior determina-se que:

$$G_1(s) = - \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{2\sigma_2}{(\sigma_3 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-4sd) + (\sigma_3 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_1)} \cdot \quad (A1.17)$$

$$G_2'(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{\sigma_2 + \sigma_1}{(\sigma_3 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-4sd) + (\sigma_3 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_1)} \cdot \quad (A1.18)$$

$$G_2''(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-2sd)}{(\sigma_3 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-4sd) + (\sigma_3 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_1)} e \quad (A1.19)$$

$$G_3(s) = \frac{I' \exp(-sD)}{s} \cdot$$

$$\frac{[(\sigma_3 + \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-2sd) + (\sigma_3 - \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_1) \exp(2sd)] / 2\sigma_1}{(\sigma_3 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-4sd) + (\sigma_3 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_1)} \quad (A1.20)$$

O campo elétrico na direção y no meio 1, devido à fonte de corrente $+I'$, é dado por:

$$E_1^+ = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \int_0^\infty \exp[-(D+y)s] \cos(sz) ds -$$

$$-\frac{2}{\pi} \int_0^\infty F_1(s) \exp(sy) \cdot \cos(sz) ds. \quad (A1.21)$$

Substituindo na expressão (A1.21) o valor de $F_1(s)$ dado na expressão (A1.8) obtém-se:

$$E_1^+(z=0) = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \left[\int_0^\infty \exp[-(D+y)s] ds + k_{21} \int_0^\infty \frac{\exp[-(D-2d-y)s]}{1-k_{21} k_{23} \exp(-4sd)} ds - k_{23} \int_0^\infty \frac{\exp[-(D+2d-y)s]}{1-k_{21} k_{23} \exp(-4sd)} ds \right] \quad (A1.22)$$

onde

$$k_{ij} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i + \sigma_j}$$

De acordo com Gradshteyn & Ryzhik (1965),

$$\int_0^\infty \frac{\exp(-qx)}{1 - a \exp(-px)} dx = \sum_{n=0}^\infty \frac{a^n}{q + np} \quad (A1.23)$$

Assim, é obtida a seguinte expressão final para o campo elétrico no meio 1 devido a fonte +I'

$$E_1^+(z=0) = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \left[\frac{1}{D+y} + k_{21} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-2d-y+4dn} - k_{23} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d-y+4dn} \right] \quad (A1.24)$$

Analogamente obtém-se para o campo elétrico no meio 2 devido a fonte de corrente +I', a seguinte expressão:

$$E_2^+ = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [F_2'(s) \exp(sy) s - F_2''(s) \exp(-sy)] \cos(sz) ds \quad (A1.25)$$

Substituindo na expressão (A1.25) os valores de $F_2'(s)$ e $F_2''(s)$ dados nas expressões (A1.9) e (A1.10) tem-se:

$$E_2^+(z=0) = - \frac{2 I'}{\pi (\sigma_1 + \sigma_2)} \left[k_{23} \int_0^\infty \frac{\exp[-(D+2d-y)s]}{1-k_{21} k_{23} \exp(-4sd)} ds - \int_0^\infty \frac{\exp[-(D+y)s]}{1-k_{21} k_{23} \exp(-4sd)} ds \right], \quad (A1.26)$$

e de acordo com a expressão (A1.23) conclui-se que:

$$E_2^+(z=0) = - \frac{2 I'}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \left[k_{21} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d-y+4dn} - \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+y+4dn} \right] \quad (A1.27)$$

Repetindo o mesmo procedimento, é obtido o campo elétrico no meio 3 devido à corrente +I'

$$E_3^+(z=0) = \frac{4 I'}{\pi} \frac{\sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 + \sigma_3)} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+y+4dn} \quad (A1.28)$$

Considerando a fonte de corrente -I' em $y < d$, pelo mesmo processo, chega-se às expressões para o campo elétrico nos meios 1, 2 e 3, dadas respectivamente por:

$$E_1^-(z=0) = \frac{4 I'}{\pi} \frac{\sigma_2}{(\sigma_2 + \sigma_3)(\sigma_2 + \sigma_1)} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-y+4dn} \quad (A1.29)$$

$$E_2^-(z=0) = \frac{2 I'}{\pi (\sigma_2 + \sigma_3)} \left[\sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-y+4dn} - k_{21} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d+y+4dn} \right] \quad (A1.30)$$

$$E_3^-(z=0) = \frac{I'}{\sigma_3 \pi} \left[\frac{1}{D-y} - k_{21} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d+y+4dn} + k_{23} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-2d+y+4dn} \right] \quad (A1.31)$$

O campo elétrico na superfície devido às duas fontes de corrente +I' e -I' é dado pela soma dos campos devido a cada fonte de corrente.

No meio 1 $E_1 = E_1^+ + E_1^-$,

$$E_1 = \frac{I'}{\sigma_1 \pi} \left[\frac{1}{D+y} - k_{23} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d-y+4dn} + k_{21} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-2d-y+4dn} + \frac{4\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_2 + \sigma_1)(\sigma_2 + \sigma_3)} \sum_{n=0}^\infty \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-y+4dn} \right] \quad (A1.32)$$

para o meio 2 $E_2 = E_2^+ + E_2^-$,

$$E_2 = \frac{2I'}{\pi} \left\{ \frac{1}{\sigma_1 + \sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+y+4dn} - k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d-y+4dn} \right] + \frac{1}{\sigma_2 + \sigma_3} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-y+4dn} \right. \right.$$

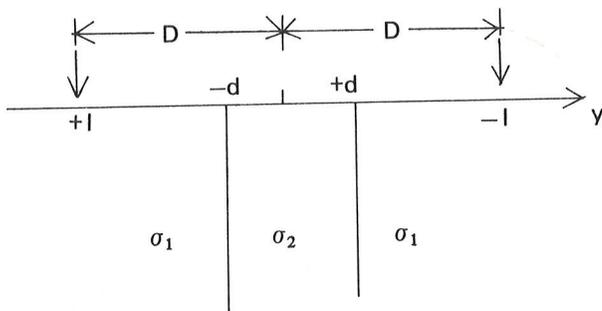
$$\left. \left. - k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d+y+4dn} \right] \right\}, \quad (A1.33)$$

e para o meio 3 $E_3 = E_3^+ + E_3^-$,

$$E_3 = \frac{I'}{\sigma_3 \pi} \left[\frac{1}{D-y} - k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+2d+y+4dn} + k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D-2d+y+4dn} + \frac{4\sigma_3 \sigma_2}{(\sigma_2 + \sigma_1)(\sigma_2 + \sigma_3)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{D+y+4dn} \right]. \quad (A1.34)$$

APÊNDICE 2

CAMPO ELÉTRICO DEVIDO À DUAS FONTES DE CORRENTE +I E -I PARA O CASO DO DIQUE VERTICAL CONFORME ESQUEMATIZADO NA FIGURA ABAIXO.



As expressões para o campo elétrico aqui apresentadas, foram adaptadas a partir das expressões do potencial para o modelo acima, segundo Van Nostrand & Cook (1966).

Campo elétrico no meio 1

$$E_1 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{(y+D)^2} - k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+2d+D-y)^2} + k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^2}{(4nd-2d+D-y)^2} + (1-k^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+D-y)^2} \right] \quad (A2.1)$$

Campo elétrico no meio 2

$$E_2 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} (1-k) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+D+y)^2} - k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+2d+D-y)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+D-y)^2} - k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+2d+D+y)^2} \right] \quad (A2.2)$$

Campo elétrico no meio 3

$$E_3 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{(y-D)^2} - k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd+2d+D+y)^2} + k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{2n}}{(4nd-2d+D+y)^2} + (1-k^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^2}{(4nd+D+y)^2} \right] \quad (A2.3)$$

onde $k = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2 + \sigma_1}$ e $E_1 = E_3$ porque a condutividade elétrica apresenta o mesmo valor em ambos os lados do dique.

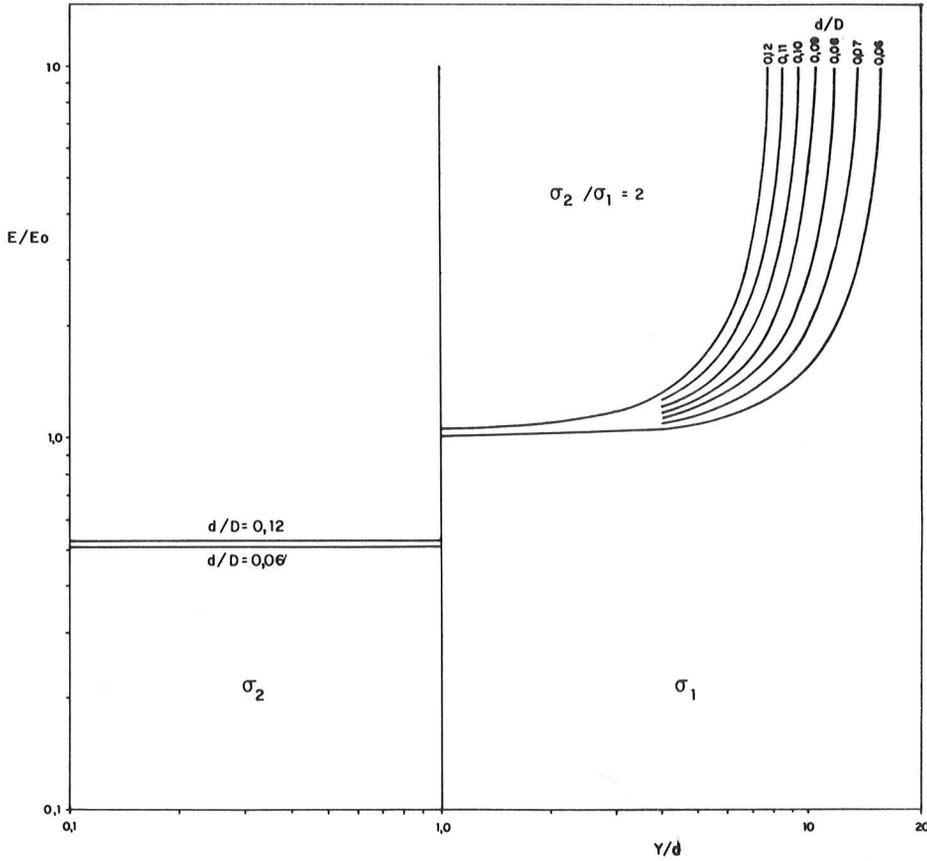
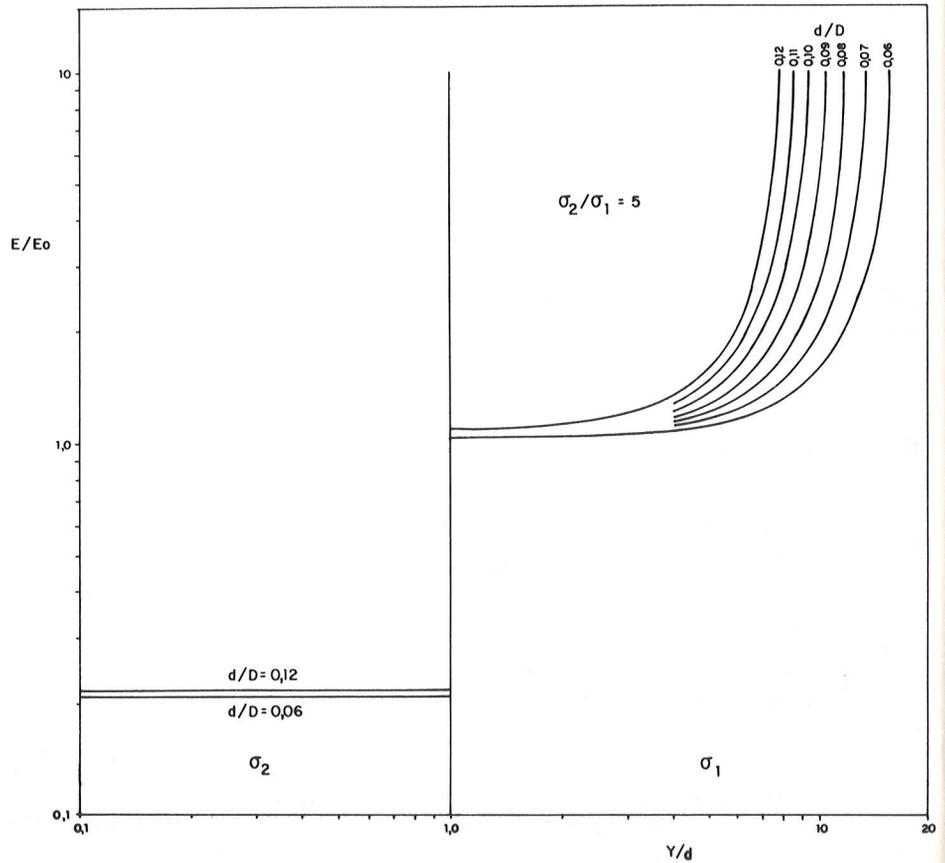


Figura A1.1 — Curvas teóricas de campo eléctrico devido a um número infinito de eletrodos de corrente para o caso de um dique vertical com $\sigma_2/\sigma_1 = 2$.

Figura A1.2 — Curvas teóricas de campo eléctrico devido a um número infinito de eletrodos de corrente para o caso de um dique vertical com $\sigma_2/\sigma_1 = 5$.



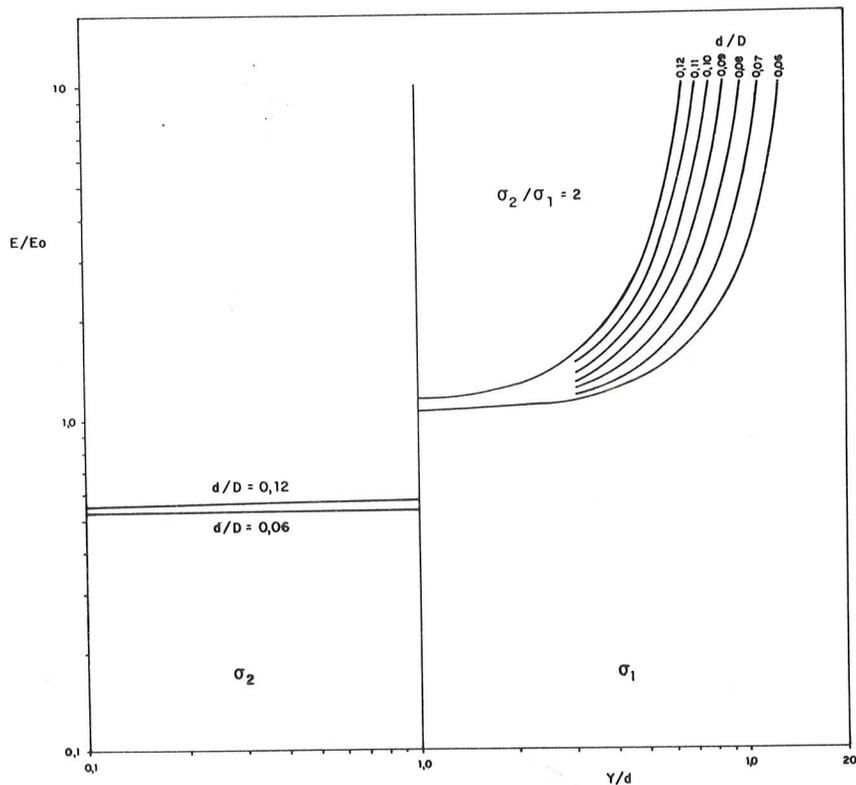


Figura A2.1 – Curvas teóricas de campo elétrico devido a duas fontes de corrente +I e -I para o caso do dique vertical com $\sigma_2/\sigma_1 = 2$.

Figura A2.2 – Curvas teóricas de campo elétrico devido a duas fontes de corrente +I e -I para o caso do dique vertical com $\sigma_2/\sigma_1 = 5$.

