

RESULTADOS DE POÇOS EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS LOCADOS POR SENSORIAMENTO GEO-ELÉTRICO

Paulo Cyro Baptista Escodino*
Adelbani Braz da Silva*

* Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC

ABSTRACT

Favorable sites for ground water exploitation in karstic aquifers, was evaluated by electrical resistivity methods and checked through well-sinking tests. It was used pole-dipole and dipole-dipole devices (eletrod arrays) with vertical sounding on two karstic structures, in the North of Minas Gerais State (Jaíba). The comparison between the results obtained with some others locally also tested wells, pointed out that the most suitable technic was dipole-dipole method (small spacings), coupled with vertical electric sounding.

1. INTRODUÇÃO

O carste da Jaíba apresenta uma morfologia típica, cujas feições marcantes mostram desenvolvimento diversificado de formas de dolinas, na maioria das vezes orientadas segundo a direção dos fraturamentos. Constitui uma planície arrasada, com ausência de drenagem superficial, sendo limitada pelos rios São Francisco a oeste e Verde Grande, a leste, únicos perenes da região.

O nível de base é controlado pelo rio São Francisco, estando o nível freático a profundidade média de 25 metros. Dos estudos até então realizados, resulta que a carstificação se procedeu horizontalmente, acompanhando de modo geral o acamamento das rochas carbonáticas, sub-horizontais do Pré-cambriano Superior (Grupo Bambuí). Como não há dobramentos, a disposição geométrica do pacote carbonático constitui um modelo geológico adequado ao emprego dos métodos eletrorresistivos.

Os estudos geo-elétricos sistemáticos realizados em áreas sele

cionadas, ensejaram boas perspectivas de se estabelecer critérios menos restritivos. Para a comprovação destes critérios, realizou-se um programa de perfuração de poços.

Este trabalho apresenta os resultados da perfuração e a metodologia desenvolvida utilizando-se os subsídios complementares obtidos mediante o sensoriamento geo-elétrico.

2. CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS ESTUDADAS

Com o apoio das informações geológico-estruturais obtidas por fotointerpretação, juntamente com as observações de campo e demais dados hidrogeológicos complementares de controle, oriundos de poços tubulares existentes, foi possível selecionar duas estruturas cársticas para os estudos geofísicos. A primeira, denominada "Linha Seca-DER" (figura 1), consiste de uma uvala (conjunção de dolinas) com suave depressão nas suas bordas, apresentando indícios de que se encontra parcialmente colmatada por material argilo-arenoso proveniente de retrabalhamento erosivo. O desenvolvimento da carstificação obedeceu um controle geológico-estrutural, marcado pelas lineações existentes. O nível freático observado nos poços MA-128 e MA-651, já existentes, não ultrapassa de 30 metros.

A segunda estrutura selecionada, denominada "Colônia da Jaíba - Irrigação" (figura 2), constitui-se de uma dolina cujo eixo maior coincide com uma lineação estrutural; suas bordas possuem uma rutura de relevo mais acentuada, com a presença de alguns sumidouros e rocha calcária aflorante nas bordas e no centro. O manto de regolito tem variação de zero a 14 metros e o nível freático, observado nos poços MA-151 e MA-400 pré-existentes, está em torno de 15 metros.

3. METODOLOGIA

Os dispositivos utilizados para a confecção das cartas de isorresistividade elétrica aparente foram os de caminhamento elétrico "polo-dipolo" e "dipolo-dipolo" (figura 3). Na área Colônia da Jaíba-Irrigação, contou-se com a execução de uma sondagem elétrica vertical (S.E.V. Schlumberger) e uma sondagem sísmica de refração rasa, além de informações lito-estratigráficas e hidrogeológicas dos dois poços existentes, bem como das informações de superfície obtidas basicamente por fotointerpretação e reconhecimentos de campo. Nesta

área obteve-se cartas de isorresistividade com os arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo com espaçamento NM de 20 metros. Integrando-se estes resultados, logrou-se um bom controle estimativo dos níveis de penetração destas cartas.

Após sucessivos estudos realizados na região, optou-se pela execução destes levantamentos mediante o dispositivo dipolo-dipolo com espaçamentos AB e NM iguais a 10 metros, em perfis geo-elétricos sempre transversais às estruturas cársticas. Este procedimento foi realizado na área da Linha Seca-DER, coadjuvado com os levantamentos de campo e aerofotogramétricos, além das informações hidrogeológicas obtidas com os dois poços pré-existentes. Para maiores penetrações da corrente elétrica, o par de eletrodos de fonte (A,B), foi disposto à distância inicial de 10 metros do par de diferença de potencial (N,M), ampliando-se este distanciamento ao longo do caminho elétrico (figura 3), até 100 metros, sendo pois pesquisados 10 níveis de penetração.

Apesar de que estes arranjos apresentam restrições quanto aos resultados quantitativos, por outro lado, ensejam boas resoluções quando se deseja verificar as variações laterais, na medida que se pesquisa os níveis mais profundos do meio rochoso subterrâneo.

A interpretação das cartas de isorresistividade elétrica aparente, foi conduzida de conformidade com as características hidrogeológicas e geo-elétricas apresentadas em cada estrutura estudada. Os baixos valores de eletrorresistividade encontrados na área Linha Seca-DER representam uma zona de colmatção das fendas por material argilo-arenoso úmido, portanto descartadas para locações. O que se pretendeu então, foi buscar aqueles sítios que apresentaram valores geo-elétricos intermediários com alguma heterogeneidade (interfaces laterais entre a rocha sã com fraturamentos em níveis saturados), onde existisse uma boa correlação em superfície com as lineações estruturais.

Em relação à área de Colônia da Jaíba-Irrigação, a distribuição estatística dos valores eletrorresistivos altos confirmou a inexistência do material úmido de colmatção. Por este motivo, se procedeu à seleção dos locais que apresentassem por sua vez baixas resistividades, correlacionados às lineações observadas na superfície.

A perfuração dos poços foi efetuada com o método de percursão, tendo sido testados posteriormente para a averiguação de suas produções.

4. TRABALHOS REALIZADOS

Os trabalhos geofísicos preliminares para a locação dos poços nas duas áreas estudadas, englobaram a realização de 29 perfis geoeletrônicos e a confecção de 20 cartas de isorresistividades elétrica aparente; uma sondagem sísmica de refração rasa e uma sondagem elétrica vertical. Foram efetuados 9 testes de bombeamento para determinação das características hidráulicas dos aquíferos e da produtividade dos poços. Em cada estrutura foram perfurados dois poços, perfazendo o total de 310 metros nos 4 poços programados.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Analisando-se as cartas de isorresistividade, conforme a metodologia proposta, obteve-se as seguintes locações:

- Área Linha Seca-DER: a ilustração das figuras 4 e 5, apresenta uma carta no nível de penetração à profundidade estimada de 15 e 35 metros, respectivamente. A distribuição estatística de baixos valores eletroresistivos (resistividades menores que 35 Ohm.m e pouco maiores que 145 Ohm.m) é a sua principal característica. Na figura 5, entre as linhas "A" e "F" se observa nitidamente um meio bem heterogêneo, com variações bruscas de resistividade e alternância de valores altos e baixos. Observa-se também entre as linhas "J" e "N", um meio menos heterogêneo, com baixíssimas resistividades, inferiores a 35 Ohm.m, alcançando até 10 Ohm.m. Este sítio, onde locou-se o poço MA-652, foi escolhido para a confirmação de que a obliteração das fendas por material argilo-arenoso, não é o indicado para a exploração de água subterrânea. Os dados de perfuração confirmam a presença deste material detrítico nos primeiros 25 metros e a intercalação deste na rocha semi-intemperizada, até a profundidade de 47 metros, ocorrendo entradas d'água no intervalo de 29-30 e aos 38 metros de profundidade. Dos 47 aos 85 metros verificou-se a presença do calcário fresco microcristalino, com algumas intercalações de rocha ardósiana nos últimos 5 metros. Este poço apresentou-se o menos produtivo, confirmando as hipóteses geofísicas levantadas.

No Quadro I encontram-se as características dos poços perfurados e no Quadro II, os resultados hidráulicos comparativos entre estes e os já existentes.

Nº DE POÇO	LOCALIZAÇÃO	PROFUNDIDADE (m)	DIÂMETRO DA PERFORAÇÃO (Polegada)	INTERVALO REVESTIDO (m)		CIMENTAÇÃO (m)	PROFUNDIDADE DE ENTRADA D'ÁGUA (m)	DURAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO (horas)	DURAÇÃO DOS TESTES DO BOMBEAMENTO (horas)	NÍVEL ESTÁTICO (m)	NÍVEL DINÂMICO (m)	VAZÃO MÉDIA DO TESTE (l/s)	VAZÃO ESPECÍFICA (l/s/m)	TRANSMISSIVIDADE HIDRÁULICA (m ² /s)	COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO	INÍCIO (DATA)	CONCLUSÃO (DATA)
				TUBO CEGO DE 6"	FILTRO DE 6"												
MA-652	ÁREA 1	90,0	0-25m:8" 25-90m:6"	0-250	-	0-25	2937,59 63,65,70 e 80	23:00	3:00	23,30	60,07	0,54	0,015	1,50x10 ⁻⁵	-	04/01/81	26/01/81
MA-653	ÁREA 2	80,0	0-14m:8" 14-80m:6"	0-9,6	9,6-14	0-4	10 e 44	10:00	20:00	6,34	8,25	8,23	4,31	3,30x10 ⁻³	-	03/02/81	20/02/81
MA-654	ÁREA 2	60,0	0-10m:8" 10-60m:6"	0-10,5	10,5-14,5	0-6	12,30, 40	10:00	20:00	6,40	7,58	Piezômetro	-	3,00x10 ⁻³	2,0x10 ⁻²	21/02/81	06/03/81
MA-655	ÁREA 1	80,0	0-27m:10" 27-80m:6"	0-34,2	-	0-32	35 e 60	10:00	10:00	22,10	41,63	1,97	0,10	3,30x10 ⁻⁵	0,8x10 ⁻⁵ **	02/02/81	16/03/81

* ARMAZENAMENTO CALCULADO DO PIEZÔMETRO MA-651

ÁREA 1: LINHA SECA - DER
ÁREA 2: COLÔNIA DA JAIBA - IRRIGAÇÃO

QUADRO 1
CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS PERFORADOS

POÇOS EXISTENTES						POÇOS LOCALIZADOS					
	Nº de poço	Q (l/s)	q (l/s/m)	T (m ² /s)		Nº de Poço	Q (l/s)	q (l/s/m)	T (m ² /s)		
Área 1	MA-128	0,42	0,015	-		MA-652	0,54	0,015	$0,15 \times 10^{-4}$		
	MA-651	1,24	0,10	$0,3 \times 10^{-4}$		MA-655	2,00	0,10	$0,33 \times 10^{-4}$		
						* teste c/ o piezômetro MA-651, T = $2,3 \times 10^{-4}$ m ² /s					
Área 2	MA-151	41,11	6,22	$9,3 \times 10^{-3}$		MA-653	8,23	4,32	$3,3 \times 10^{-3}$		
	MA-400	9,26	0,57	$0,63 \times 10^{-3}$		MA-654	11,2	4,5	$3,0 \times 10^{-3}$		
						* teste c/ o piezômetro MA-654, T = $3,0 \times 10^{-3}$ m ² /s					

Área 1 : Linha Seca - DER

Área 2 : Colônia da Jaíba - Irrigação

QUADRO II - RESULTADOS COMPARATIVOS OBTIDOS NOS POÇOS

A locação do poço MA-655, entre as linhas "A" e "F" (mais precisamente na linha "C"), obteve um melhor resultado como era esperado. Reportando à figura 4, a carta de isorresistividade apresentou um zoneamento de baixos valores (menor que 35 Ohm.m) no nível de penetração de 15 metros. Este zoneamento indica que nos primeiros 15 metros existe o pacote sedimentar argilo-arenoso cuja resposta elétrica produz baixos valores resistivos. A perfuração do poço MA-655 veio confirmar esta hipótese, tendo sido atravessado 14 metros desta cobertura. Analisando-se a carta com penetração de 35 metros (figura 5), o zoneamento de baixos valores acima mencionado, ficou circunscrito ao local próximo do poço MA-652, entre as linhas "J" e "N" (zona de maior colmatação). Na área entre as linhas "A" e "F", os valores eletrorresistivos são altos, evidenciando a presença da rocha carbonática fresca, abaixo do nível de saturação. Nas proximidades do poço MA-655 observa-se uma zona mais heterogênea, com valores intermediários de resistividade elétrica aparente (zona de rocha fraturada, com água). Os dados de perfuração confirmam esta heterogeneidade entre a rocha sã e semi-intemperizada, dos 14 e 54 metros, com entrada d'água aos 35 metros. Dos 54 até a uma profundidade de 80 metros, perfurou-se o calcário são, microcristalino, com uma entrada d'água no nível de 60 metros. Este poço apresentou maior produtividade que o MA-652 (Quadro II).

O poço já existente MA-651, também situado na linha "C", nas proximidades da borda da estrutura cárstica, está a 120 metros do MA-655. Entre estes, encontra-se o sítio mais adequado para a perfuração conforme a resolução elétrica e posteriormente confirmado pelos testes de bombeamento. O cálculo da transmissividade hidráulica obtida com o piezômetro MA-651 e teste do MA-655 indicou o valor de $2,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ enquanto nos testes isolados os poços MA-655 e MA-651 apresentaram valores em torno de $0,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e o MA-652, com $0,15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Quadro II), refletindo assim que na direção da linha "C" entre os poços testados, existe maior circulação de água subterrânea.

A localização do MA-651, próximo a uma lineação, em uma zona de transição de baixas resistividades (menor que 100 Ohm.m) para altas (maior que 100 Ohm.m), não seria a melhor, apesar de que este apresentou uma entrada d'água conectada com o MA-655. Esta observação registra o fato de que a detecção geofísica não fornece dados indicativos sobre a presença ou não de fendas pouco desen-

volvidas. No entanto, as informações geo-elétricas sobre o meio físico rochoso atravessado pelas linhas de corrente, apresentam evidências de que existe uma influência elétrica que se denota em sub-superfície pelos valores eletrorresistivos altos e baixos, segundo a heterogeneidade do meio, conforme se verificou com o poço MA-655.

Área Colônia da Jaíba-Irrigação: nesta, foram locados os poços MA-653 e MA-654. Trata-se de uma zona cárstica com maiores disponibilidades hídricas, como demonstrado com o poço MA-151, já existente, cuja transmissividade hidráulica é de $9,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Quaro II). Em trabalhos geofísicos anteriores, se verificou que a situação do MA-400, existente, foi inadequada (zona mais eletrorresistiva), tendo sido parcialmente comprovada esta hipótese com a sua baixa produtividade. Conforme se verifica na carta de isorresistividade (figura 6), existe uma correlação em sub-superfície, com o fraturamento observado por fotointerpretação. Os valores de isorresistividade estão distribuídos estatisticamente entre 90 Oh.m.m e 505 Ohm.m, chegando até 5.000 Ohm.m. nas zonas das bordas da dolina. As variações laterais delimitadas pelo zoneamento menos resistivo vêm indicar por sua vez aqueles locais de maior permeabilidade desenvolvida ao longo dos fraturamentos e/ou carstificação. O poço MA-654 foi perfurado a 10 metros do MA-653, para funcionar como piezômetro e confirmar as hipóteses levantadas. Encontram-se entre as linhas "K" e "L", numa zona menos resistiva, ao longo do fraturamento mencionado (figuras 2 e 6).

Os resultados da produtividade destes poços vêm mais uma vez confirmar as hipóteses concebidas pelos levantamentos geofísicos, apresentando-se o poço MA-400 com a menor produtividade. (Quadro II). Os resultados obtidos com as sondagens S.E.V. Schlumberger e sísmica, foram úteis na determinação dos níveis de profundidade das cartas de isorresistividade.

6. CONCLUSÕES

Diante das experiências alcançadas com os levantamentos geofísicos por eletrorresistividade em aquíferos cársticos, coadjuvados com as informações hidrogeológicas complementares, pode-se enumerar as seguintes conclusões:

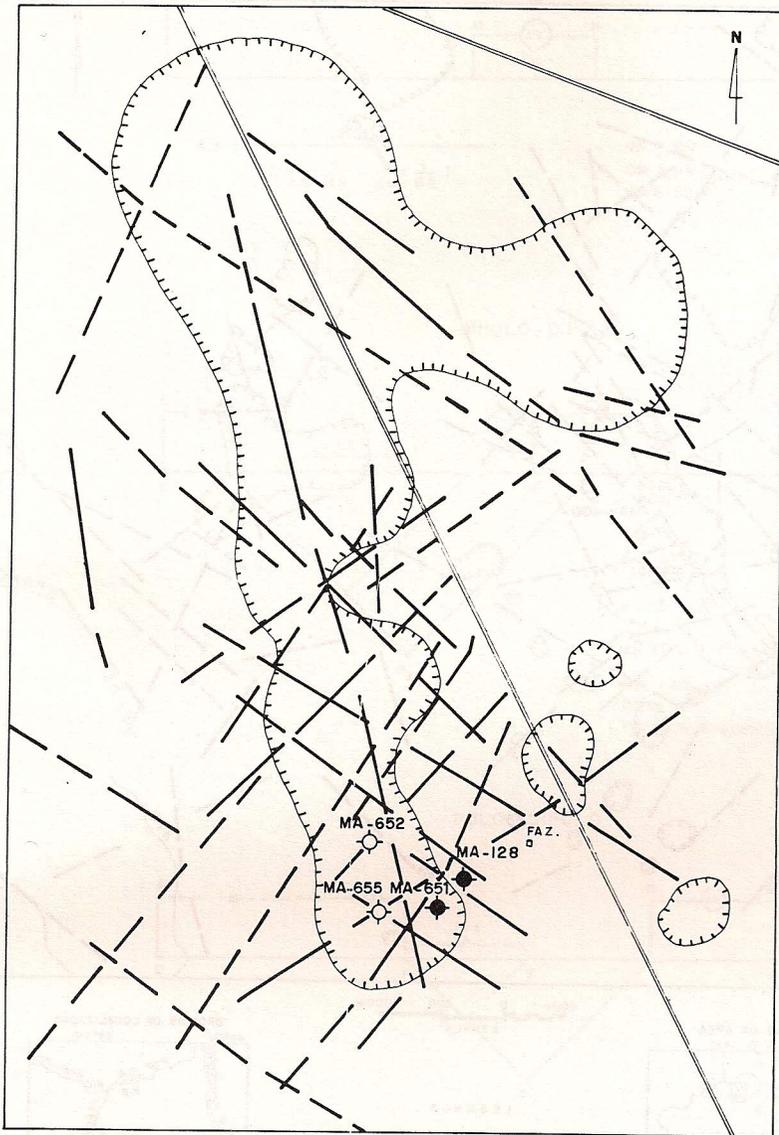
- na perfuração de poços de exploração de água subterrânea, estes estudos preliminares são de fundamental importância quando se deseja melhor produtividade;
- a locação deve obedecer a critérios hidrogeológicos já desenvolvidos e comprovados;
- as zonas desfavoráveis nos calcários são as pouco fissuradas, ou com fissuras (ou fraturas) preenchidas por calcita, como também onde há intercalações de materiais argilosos;
- o intenso fraturamento em superfície, nem sempre reflete as condições em profundidade e pode apresentar resultados negativos;
- o sistema de carstificação, nas zonas de descarga, próximas aos níveis de base, normalmente é pouco profundo;
- o cruzamento de fraturas pode indicar boas condições de circulação e armazenamento;
- as dolinas orientadas segundo as direções de fraturamento, são bons sítios para a locação de poços;
- o alinhamento de dolinas, relacionado com fraturamento, é um bom indício de circulação de água subterrânea;
- as uvalas devem ser evitadas, nesta região, para a locação de poços. Normalmente, estas são formas mais maduras que as dolinas e apresentam-se colmatadas por material argiloso que impede a infiltração e circulação de água subterrânea;
- poços locados próximos a calcários puros, fraturados, sem intercalações de material argiloso, apresentam na maioria dos casos, resultados positivos. Isto pode ser explicado pelo maior poder de dissolução nos calcários puros;
- os poços, se possível, devem ser locados nas bordas das dolinas, a fim de se evitar problemas com a perfuração;
- nas zonas de recarga do aquífero, os níveis d'água, na maioria das vezes, são profundos e as condições locais de armazenamento são pequenas;
- na prospecção de água subterrânea, deve-se utilizar os métodos geo-elétricos devido a sua economicidade e resolução semi-quantitativa, como apoio às informações hidrogeológicas. O caminhamento elétrico com espaçamentos reduzidos (10 metros), coadjuvado com

sondagens elétricas verticais, realizados transversalmente às estruturas cársticas, surtem boas resoluções. A utilização da sísmica de refração rasa complementa aquelas informações de superfície, permitindo com boa precisão investigar o manto de regolito e a zona de saturação. Os resultados geo-elétricos devem ser tomados com a devida cautela, buscando-se a sua compatibilização com os dados hidrogeológicos existentes. Em regiões cársticas onde se observa a horizontalidade das camadas, a metodologia aqui aplicada foi de muita utilidade..

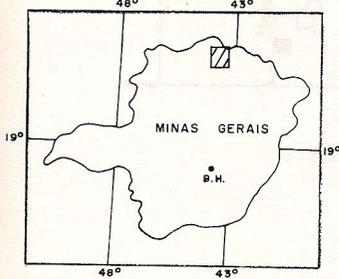
BIBLIOGRAFIA

- ASTIER, J.L. - Geofísica Aplicada a la Hidrologia. 1ª Edición. Madrid, Paraninfo, 1975.
- CETEC. - Projeto Pesquisa e Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos em "Karst", por Sensores Remotos. Belo Horizonte, 1982. Inédito.
- CUSTÓDIO, E. G. & LLAMAS, M.R. - Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Omega. 1976.
- ESCODINO, P.C.B & SILVA, A.B. - Aplicação de Métodos de Prospecção Geo-elétricos na Pesquisa de Aquíferos Cársticos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1, Recife, 1980. Anais ... Recife, ABAS, 1980.
- ESTEVES, J. M. - Prospecção Geo-elétrica para Pesquisa de Águas Subterrâneas no Sul de Angola, Alguns Casos Típicos. Lisboa, 1968, LNEE (Memórias, 313).
- _____ . - Aplicação de Cartas de Resistividades Elétricas Aparentes no Estudo de Barragens. Lisboa, 1971, LNNE (Memórias, 396).

FIGURA 1
ÁREA LINHA SECA, DER
LOCALIZAÇÃO E LINEAMENTOS ESTRUTURAIS



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA



LEGENDA

-  DOLINA
-  FRATURA
-  POÇO EXISTENTE
-  POÇO LOCADO

CROQUIS DE LOCALIZAÇÃO

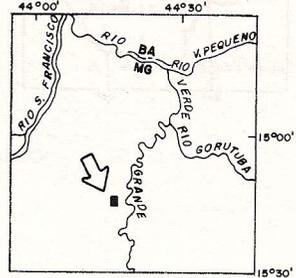
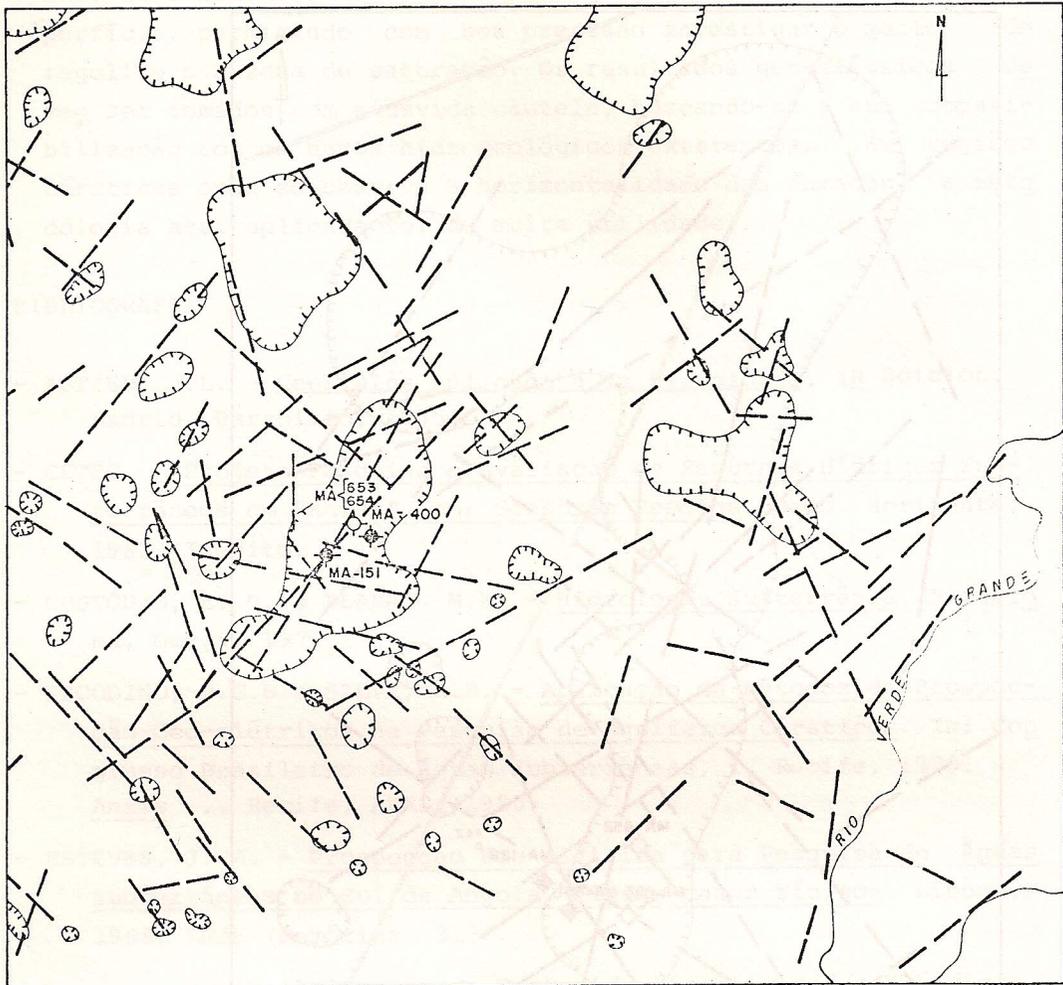
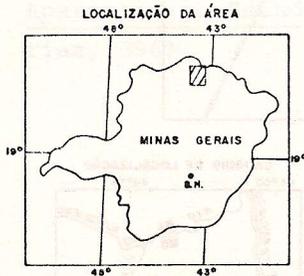


FIGURA 2
 COLÔNIA DA JAÍBA, IRRIGAÇÃO
 LOCALIZAÇÃO E LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

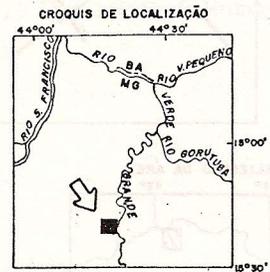


500m 0 500 1000m
 ESCALA

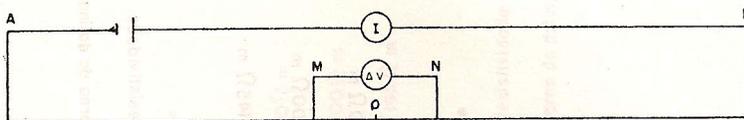


LEGENDA

- DOLINA
- FRATURA
- POÇO EXISTENTE
- POÇO LOCADO



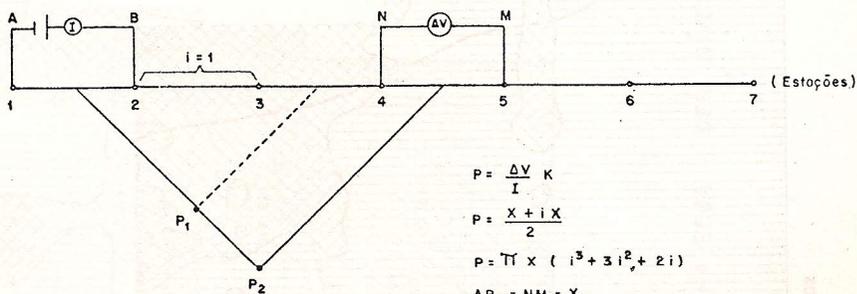
SCHLUMBERGER



$$K = \frac{2(\pi r)}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)}$$

OA = OB
OM = ON
OA ≤ 5QM

DIPOLO - DIPOLO



$$P = \frac{\Delta V}{I} K$$

$$P = \frac{X + ix}{2}$$

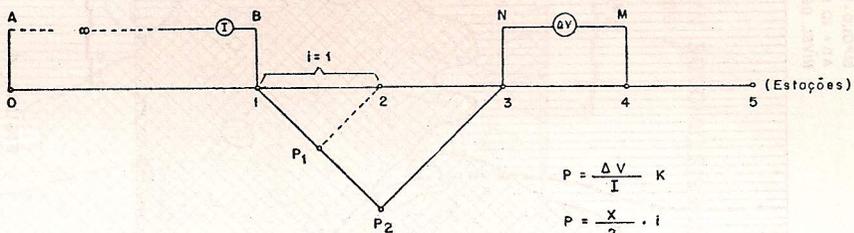
$$P = \pi \times (i^3 + 3i^2 + 2i)$$

$$AB = NM = X$$

$$BN = ix$$

P₁, P₂ = Profundidade 1 e 2

POLO - DIPOLO



$$P = \frac{\Delta V}{I} K$$

$$P = \frac{X}{2} \cdot i$$

$$K = 2\pi (i^2 + i) \cdot X$$

$$AB \geq 8X$$

$$BN = ix$$

$$NM = X$$

P₁, P₂ = Profundidades 1 e 2

Figura 3 - DISPOSITIVOS ELÉTRICOS UTILIZADOS

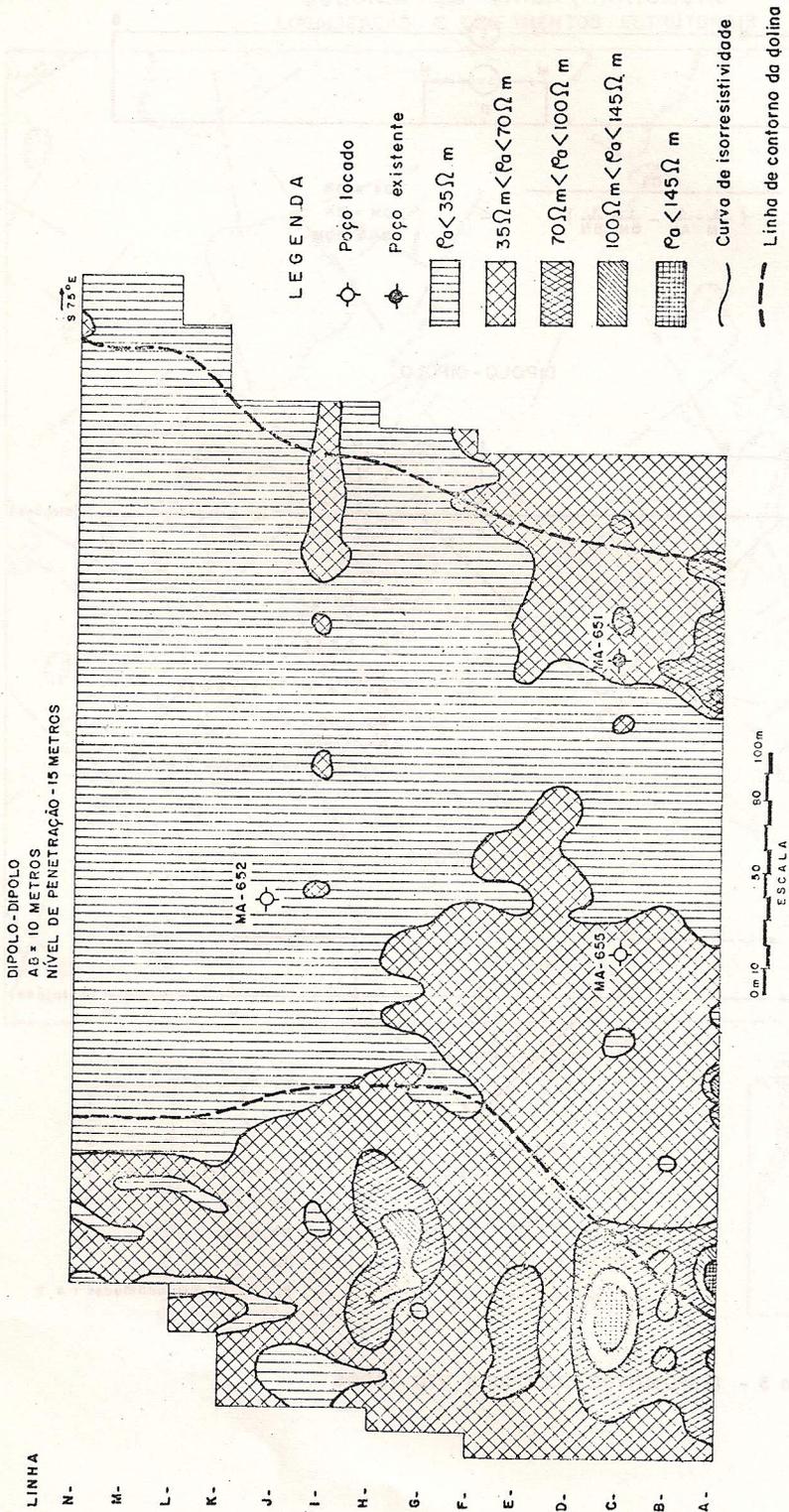


FIGURA 4
CARTA DE ISORRESISTIVIDADE NA ÁREA DA LINHA SECA - DER NÍVEL 2

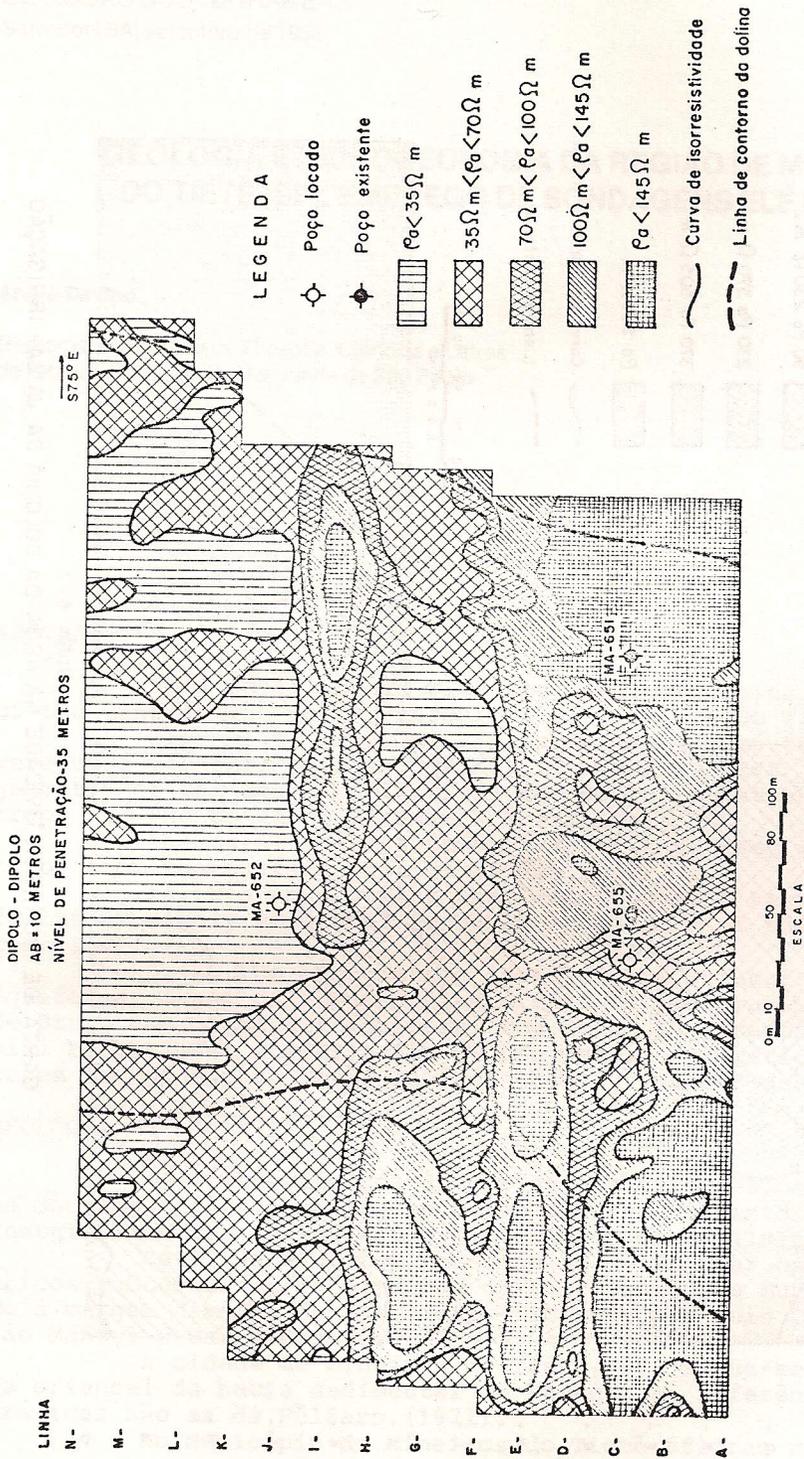


FIGURA 5
CARTA DE ISORRESISTIVIDADE NA ÁREA DA LINHA SECA - DER NÍVEL 6

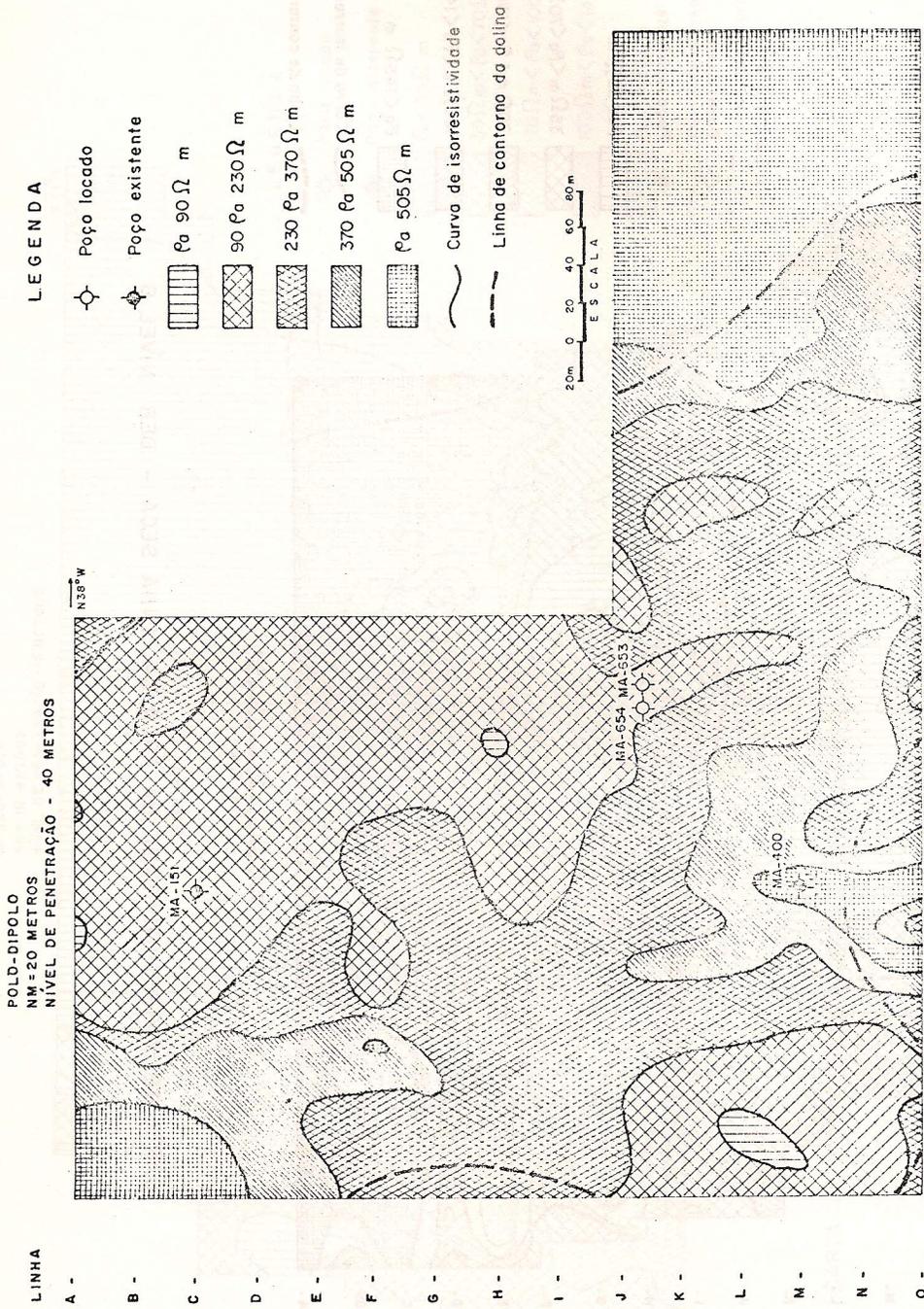


FIGURA 6

CARTA DE ISORRESISTIVIDADE NA ÁREA DA COLÔNIA DA JAIBA - IRRIGAÇÃO