

REFERENCIAL SISTÊMICO "IN NATURA" NO ARENITO SERGI, NO SEMI-ÁRIDO DA BAHIA, PARA ESTUDO GEOFÍSICO DA HIDRODINÂMICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA

JOAQUIM X.C. NETO¹, CARLOS A. DIAS² E OLIVAR A.L. DE LIMA¹

A detailed study using geophysical methods sensitive to water saturation changes is being conducted in connection with an artificial water storage experiment in sandstones of the Sergi Formation in the pilot area of Cocorobó, Bahia. The aims of this study are to map the propagation of the injection front, as a function of time, and to evaluate the reservoir petrophysical parameters measured at three different times: before injection starts, under partial saturation and after the complete filling of the reservoir. The results of the pre-injection studies including 28 vertical electrical soundings and 7 seismic refraction profiles showed that the Sergi Formation, locally, is as a two-layer system: the upper layer, transitional to the Itaparica Shales, has a resistivity of about 25 Ωm and a seismic velocity (V_p) of 1,100 – 2,000 m/s. In the main sandstone body rock resistivity varies from 1,200 to 1,600 Ωm and V_p changes from 2,000 – 2,250 m/s, these variations being related to clay content and porosity of the rock. The area is covered by dry sands with thickness of 6 to 8 m. Shales of the Aliança Formation are the reservoir substratum and exhibit lower resistivity (50 Ωm) and larger V_p (2,950 – 3,000 m/s) values. Self potential maps reflect the geological features of the area and differentiate the Sergi and Itaparica Formations. Isolated small size anomalies are due to the iron well casing and/or to local water infiltration from the surface. These results represent a general reference system for future investigations.

Estudos geofísicos de detalhe empregando métodos sensíveis a variações de saturação da rocha, estão sendo realizados, tendo em vista a experiência de injeção de água no arenito Sergi, na área-teste de Cocorobó, Bahia. Os estudos têm como objetivo mapear a propagação, com o tempo, da frente de saturação e avaliar os parâmetros petrofísicos medidos em períodos distintos: (i) antes da injeção, (ii) sob condição de saturação parcial e (iii) após a completa saturação do reservatório. Os resultados dos estudos da fase pré-injeção, referentes a 28 sondagens elétricas verticais e sete perfis sísmicos de refração mostram que, localmente, a Formação Sergi é um sistema de duas camadas: uma superior, transicional aos folhelhos Itaparica, tendo resistividade de 25 Ωm e velocidade sísmica (V_p) 1.100 – 2.000 m/s. A camada principal do arenito tem resistividade de 1.200 a 1.600 Ωm e V_p variando de 2.000 – 2.250 m/s, a depender da porosidade e do teor de argila presente na rocha. A área é coberta por uma camada de areias secas, com espessuras de 6 a 8,0 m. O substrato é formado pelos folhelhos da Fm Aliança, que apresenta os valores mais baixos de resistividade (50 Ωm), bem como os valores mais elevados de V_p (2.950 – 3.000 m/s). Mapas de potencial espontâneo refletem as feições geológicas da área, evidenciando as Formações Sergi e Itaparica e pequenas anomalias, uma delas originada do revestimento metálico do poço de injeção, e as demais, de zonas de infiltração de água. Esses resultados formam o sistema geral de referência para os estudos posteriores.

INTRODUÇÃO

A pesquisa *Reservatórios Naturais de Água Subterrânea*, em realização no âmbito do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica – PPPG/UFBA, consiste na experiência de injeção artificial de água no arenito Sergi, numa área-teste em Cocorobó, Canudos – Bahia (Fig. 1). Tem como objetivo estudar a viabilidade técnica da injeção e do ar-

mazenamento de água no arenito, as condições de transmissão e a capacidade de restituição do reservatório, após períodos de armazenagem. A infra-estrutura, já implantada na área, é constituída de um sistema de adução, com capacidade operacional de 50 l/s, construído em ferro dúctil centrifugado para pressões de 150 mca, extensão de cerca de 2.000 m e diâmetro de 300 mm; uma estação de tratamento e poço de injeção, dimensionados para processar cerca de um milhão de

¹ Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica e Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Campus Univ. da Federação, 40210 Salvador - BA.

² Departamento de Geofísica, Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, Campus Univ. do Guamá, 66000 Belém - PA.

metros cúbicos de água requeridos na experimentação. A estação também é dotada de um pequeno laboratório de análises de água, para os ensaios de rotina. A maior parte dessa infra-estrutura contou com recursos do Fundo de Apoio à Pesquisa Técnico-Científica – FAPESP do Banco do Brasil.

Vários trabalhos do interesse da pesquisa já foram publicados, envolvendo: 1) a seleção e estudo geológico da área-teste (Lima & Dias, 1979); 2) estudo geofísico da rocha reservatório e dos seus contornos estruturais (Lima & Dias, 1980); 3) estudos hidrodinâmicos e petrofísicos de amostras da Fm Sergi (Lima & Dias, 1979); 4) modelamento matemático da injeção (Lima, 1979) e 5) estudos das propriedades físico-químicas da água de injeção e de interações com a água nativa da formação (Cerqueira Neto et al., 1982).

Os estudos geofísicos associados à experiência de injeção visam basicamente monitorar a propagação da frente de saturação de água em função do tempo, determinando as variações de propriedades físicas do meio, medidas em três situações distintas:

- i) nas condições naturais originais;
- ii) sob saturação parcial, durante o experimento de injeção e
- iii) após a completa saturação da rocha

A importância desses estudos vem do interesse científico no conhecimento de parâmetros geofísicos relacionados a propriedades relevantes das rochas sedimentares, e de suas variações com as condições am-

bientais. Neste sentido muitos são os estudos utilizando modelos teóricos, modelos reduzidos ou amostras de pequenas dimensões (testemunhos) de rochas sedimentares provenientes de várias bacias sedimentares do globo (Born, 1941; Gassmann, 1951; Hughes & Kelly, 1952; Biot, 1956; Paterson, 1956; McEuen et al., 1959; Wyllie, 1962; King, 1966; Gregory, 1976; Mavco, 1979; Spencer, 1979; Ramachandran & Nair, 1981; Winkler & Amos Nür, 1982); bem como análises de correlação de resistividade e velocidade sísmica das rochas *versus* porosidade e grau de saturação, e estudos do fenômeno de potencial espontâneo no campo da hidrogeologia, associado ao movimento da água (Archie, 1942; Yüngül, 1950; Ogilvy, 1967; Bogoslovski & Ogilvy, 1970, entre outros).

Yale (1985) apresenta uma revisão do estado-da-arte referente à influência de propriedades da rocha sobre parâmetros geofísicos e petrofísicos, envolvendo os efeitos da litologia, da porosidade e das condições *in situ*: tipo de fluido e grau de saturação, presença de fissuras e fraturas, nas propriedades elásticas, elétricas e dielétricas das rochas.

Neste trabalho são descritos os estudos geofísicos para medidas da resistividade, velocidade sísmica e do potencial espontâneo, referentes às condições naturais, na área-teste da pesquisa. Com esses estudos, acrescidos aos resultados dos trabalhos anteriores, ficam conhecidos todos os referenciais, abrangendo os sistemas geológico-estrutural, hidrodinâmico; de parâmetros geofísicos e físico-químicos, que servirão de base às etapas subseqüentes da experiência.

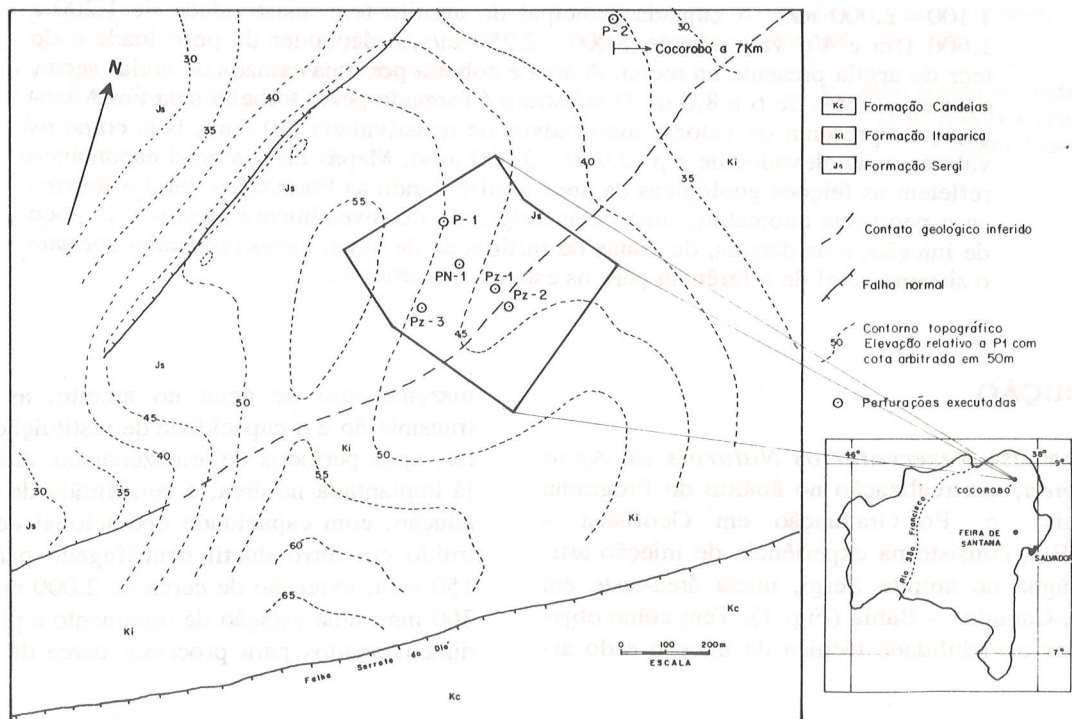


Figura 1. Mapa geológico da área-teste indicando o setor de levantamento realizado.

MEDIDAS DE PARÂMETROS GEOFÍSICOS

O levantamento geofísico foi realizado na área principal de influência do reservatório subterrâneo, definida por linhas transversais e 280 estações destinadas a observações de SP e leitura de nível topográfico (Fig. 2).

a) Resistividade

Foram realizadas 28 sondagens elétricas verticais, usando o arranjo Schlumberger, variando progressivamente o espaçamento dos eletrodos de corrente de 1 a 400 m. A Fig. 2 mostra a localização das linhas (AA', BB', CC', etc.) nas quais foram feitas as expansões do arranjo: i) sistematicamente em todas as linhas, tendo o centro fixo nas estações 10 de cada transversal, e ii) em linhas alternadas, ficando o centro do arranjo fixo nas estações 5 e 15 de cada transversal. No setor da área onde se situa a adutora (Fig. 2), linhas transversais foram dispostas perpendicularmente à mesma, a fim de minimizar a interferência nas medidas elétricas devida à presença da tubulação metálica. No setor SE da área, as transversais se alinham segundo a direção do acamamento da rocha, de modo a melhor se usar na interpretação modelos de camadas horizontais.

As medidas foram realizadas utilizando um resistivímetro ABEM mod. 5312 e fonte de energia de 1 kW.

A construção de curvas teóricas para os modelos geoeletricos interpretados das sondagens elétricas verticais foi feita com o auxílio de computador (Sistema VAX-11/785), utilizando o algoritmo de Anderson (1979) para cálculo das integrais de convolução. Maior automação desse trabalho foi conseguida com um programa desenvolvido para traçar curvas teóricas sobrepostas aos dados de campo correspondentes aos modelos interpretados.

Os resultados da interpretação das sondagens elétricas verticais (SEV) incluem modelos geoeletricos de 4 a 5 camadas, mostrados em curvas típicas na Fig. 3, relativas às sondagens com centros nas estações 10 das linhas transversais indicadas. A Tabela 1 contém os valores da resistividade das várias camadas geoeletricas e suas respectivas espessuras. Observou-se que, apesar de ser mantido constante em 400 m o valor máximo da separação dos eletrodos de corrente, somente em duas sondagens não foi atingida a base do arenito Sergi.

Em todas as curvas as duas primeiras camadas geoeletricas correspondem ao solo arenoso superficial com diferentes graus de umidade. À camada do topo, mais condutora, corresponde a areia umedecida pelas

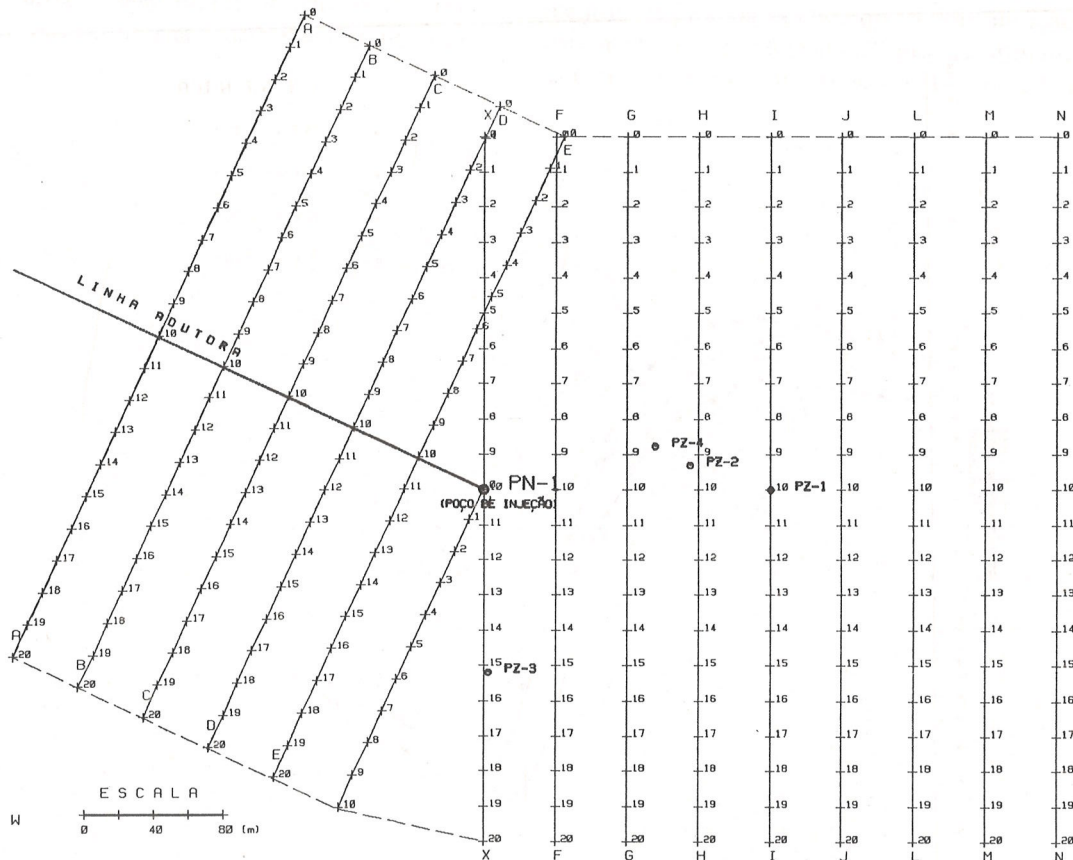


Figura 2. Localização das linhas do levantamento por eletrorresistividade, refração sísmica e potencial espontâneo, na área de influência da injeção.

chuvas que ocorreram na região, durante o período do levantamento. O nível resistivo corresponde às areias secas. Todas as curvas mostram, também, a presença de um marco elétrico importante, representado por uma

camada condutora de 5 a 26 Ωm de resistividade. Esse marco, representa o topo transicional da Formação Sergi e, de acordo com os dados litológicos de poços, é composto de folhelhos e arenitos argilosos, conglô-

Tabela 1. Parâmetros geoeletricos derivados da interpretação das curvas de sondagens elétricas verticais obtidas na área.

Identificação	Resistividade (Ωm)					Espessura das Camadas (m)			
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	h_1	h_2	h_3	h_4
AA'	236,8	2.500	25	1.600	50	0,5	8,2	12	20
BB'	290	1.800	26	1.600	50	0,7	4,9	6	23,5
CC'	301	550	26	1.600	-	0,7	5,0	12,0	-
DD'	620	876	26	1.600	50	0,7	4,8	5,6	33,8
EE'	140	700	26,3	1.600	50	0,7	4,2	6,0	42,5
FF'	150	1.270	25,6	2.930	50	1,5	4,5	14,0	46,0
GG'	100	1.300	26,0	2.500	50	0,4	3,6	20,5	43,0
HH'	1.153	1.250	12,6	1.200	10	0,5	4,6	16,6	(15,2)
II'	136,6	350	8,0	1.200	50	0,4	5,0	26,0	35,0
JJ'	130,0	650	5,0	560	10	0,5	4,5	26,0	-
LL'	252	683	15,0	1.200	50	0,4	5,0	25,5	40,0
MM'	554,6	1.270	18,0	1.200	50	0,6	4,5	36,0	31,0
NN'	703	1.640	25,0	600	50	0,6	5,0	46,0	37,4
OO'	184	1.300	12,0	1.200	50	0,6	3,8	17,0	31,0

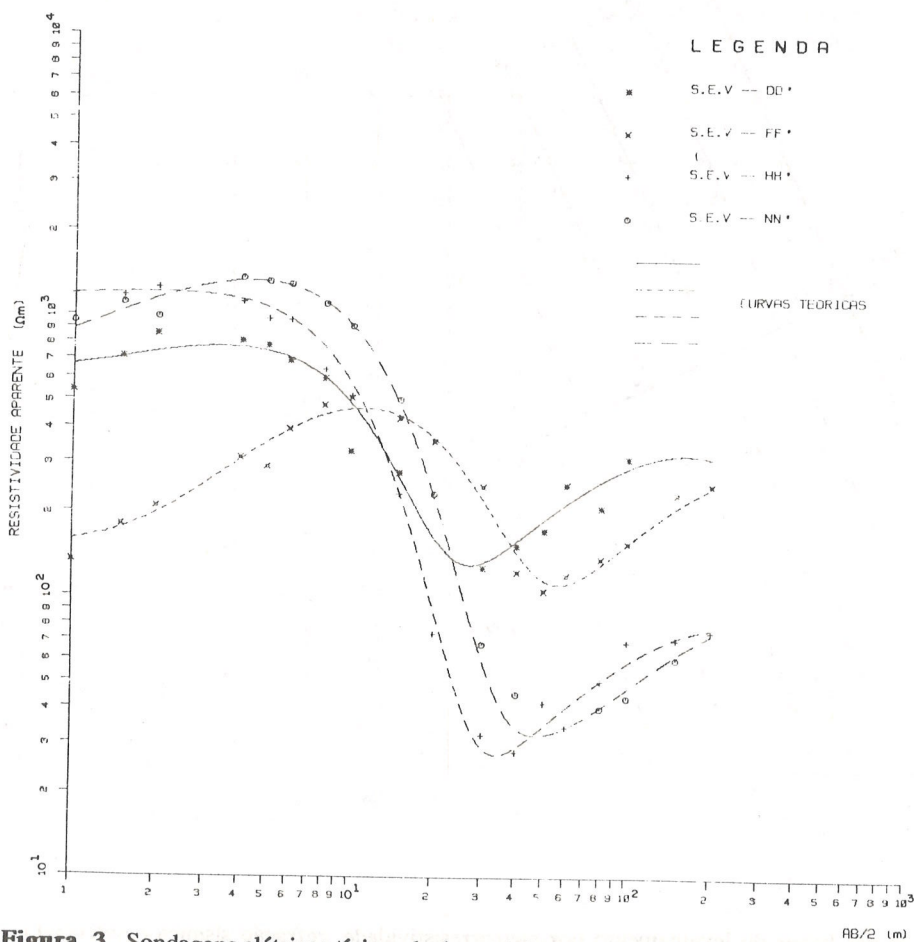


Figura 3. Sondagens elétricas típicas da área, obtidas nas linhas DD', FF', HH' e NN'.

meráticos, contendo numerosos fragmentos de argila. Nas camadas de arenitos, a variabilidade observada na resistividade, no intervalo de 600 a 3.000 Ωm reflete, provavelmente, variações composicionais e de porosidade da rocha, relacionadas com a quantidade de argila presente na formação.

b) Potencial Espontâneo

Potencial espontâneo (SP) é a denominação geral dada aos potenciais elétricos estacionários de origem cinética, produzidos por reações químicas, ou devidos a fontes de correntes telúricas regionais (Grant & West, 1965, p. 389; Sumner, 1976, p. 39). Vários trabalhos experimentais têm evidenciado o relacionamento entre o potencial espontâneo e o fluxo de água subterrânea, por exemplo, a ocorrência de anomalias negativas de SP associadas à topografia e a existência de anomalias de SP positivas na periferia de poços de bombeamento de água ou em zonas de descargas (fundos de rios, lagos ou reservatórios), enquanto que nas zonas de fuga d'água de aquíferos são observadas anomalias negativas (Yüngül, 1950; Meiser, 1962; Ogilvy, 1967; Bogoslovsky & Olgivy, 1970).

Neste trabalho, o método visou determinar a configuração desse potencial na área, antes da injeção, com o fim de estabelecer a referência para as observações futuras e medidas de suas variações durante a experimentação.

As leituras de SP são relativas a uma estação-base, fixada na estação 0 da linha AA'. O equipamento utilizado foi o modelo RP-6 Scintrex, que permite leituras do valor do potencial com a precisão de 1 mV.

O mapa da Fig. 4 mostra as curvas isotopotenciais do campo natural, contendo ruídos de diversas origens. Uma forte anomalia negativa evidencia-se, envolvendo o poço de injeção PN-1, atribuída à presença do tubo metálico de revestimento do poço, funcionando como fonte cilíndrica vertical.

Uma análise de tendência por regressão múltipla e mínimos quadráticos a esses dados foi realizada investigando-se superfícies de forma $z = f(x,y)$ representadas por polinômios até o quarto grau.

A Tabela 2 mostra, na forma usualmente empregada na análise de variância (Davis, 1973), os valores médios quadráticos para superfícies até o 4º grau, os respectivos desvios, bem como os incrementos de predição (variação explicada), quando se considera a superfície de grau imediatamente superior. O teste-F, realizado no nível de significância de 5%, mostra que, em princípio, quaisquer das superfícies poderiam representar o comportamento de tendência do campo SP, pelo fato de ser a hipótese nula (H_0) – isto é, de serem iguais as variâncias dos valores preditos pela superfície e a dos respectivos desvios – rejeitada no nível de significância considerado. Porém, a análise dos incrementos de predição indica que a contribuição é significativa até a superfície do 2º grau. Portanto, esses parâmetros sugerem superfícies do 1º e do 2º graus como

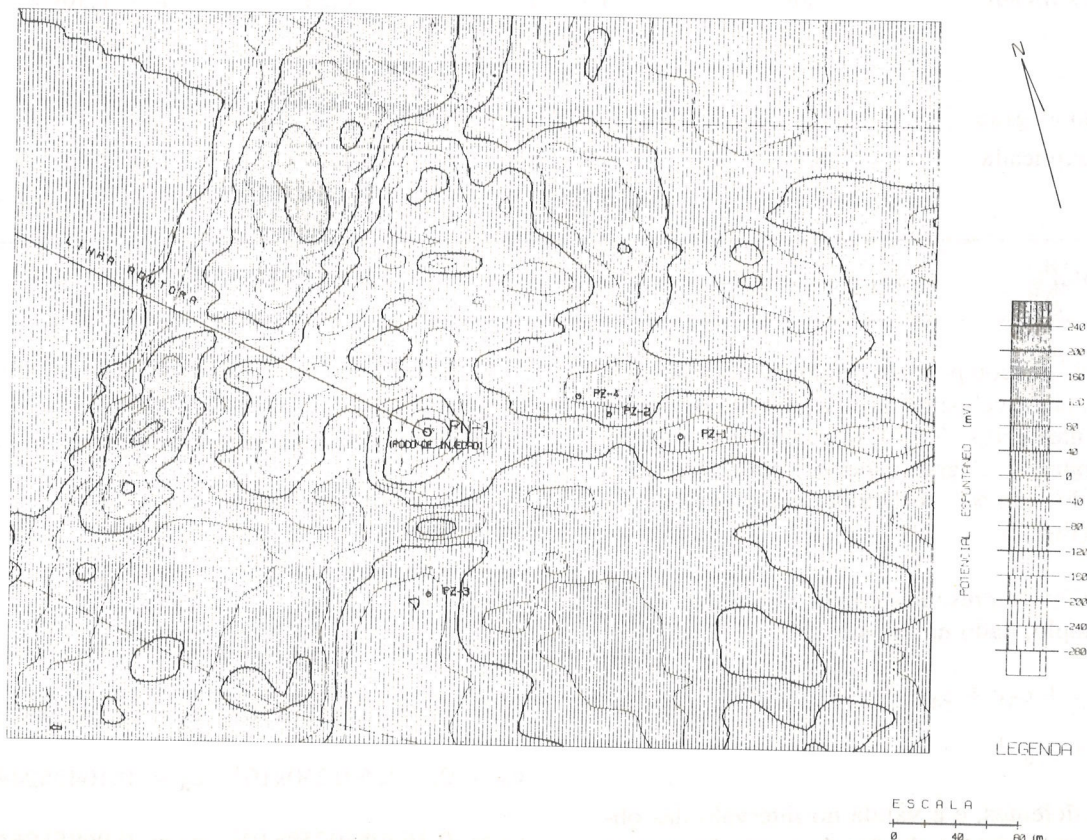


Figura 4. Mapa de potencial espontâneo observado na área de influência da injeção artificial.

Tabela 2. Dados da análise de variância das superfícies de tendência do potencial espontâneo no âmbito regional do reservatório subterrâneo.

Fonte da Variação	Soma dos Quadrados (x 10 ⁴)	Graus de Liberdade	Valores Médios Quadráticos (x 10 ⁺⁴)	Teste - F
Superfície do 4º grau	SS _{r4} = 20,18	15 - 1	1,44	F = 3,69
. Desvios	SS _d = 108,92 10 ⁴	294 - 15	0,39	F _{0,05(14,279)} = 1,70
Superfície do 3º grau	SS _{r3} = 14,21	10 - 1	1,58	F = 3,95
. Desvios	SS _d = 114,29	294 - 10	0,40	F _{0,05(9,284)} = 1,88
Superfície do 2º grau	SS _{r2} = 12,15	6 - 1	2,43	F = 5,93
. Desvios	SS _d = 116,95	294 - 6	0,41	F _{0,05(5,288)} = 2,81
Superfície do 1º grau	SS _{r1} = 4,49	3 - 1	2,25	F = 5,22
. Desvios	SS _d = 124,61	294 - 3	0,43	F _{0,05(2,291)} = 3,00
<i>Incrementos</i>				
Superfície do 2º grau				
. Variação explicada	7,66	6 - 3	2,55	F = 6,22
. Desvios	116,95	288	0,41	F _{0,05(3,288)} = 2,60
Superfície do 3º grau				
. Variação explicada	2,06	10 - 6	0,52	F = 1,30
. Desvios	114,29	284	0,40	F _{0,05(4,284)} = 2,37
Superfície do 4º grau				
. Variação explicada	5,97	15 - 10	1,19	F = 3,05
. Desvios	108,92	291	0,39	F _{0,05(5,291)} = 2,21
Variação Total	SS _t = 129,10	291 - 1		

representativas da componente regional de tendência do campo SP, provavelmente associada à litologia e/ou a fontes distantes (Figs. 5 e 6), enquanto que a superfície do 4º grau (ou de grau superior) pode fornecer a distribuição do campo, refletindo contribuições de fontes locais (Fig. 7).

A superfície representada pelo polinômio do 4º grau, por exemplo, dado na forma

$$z = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2 + \dots + c_{14}xy^3 + c_{15}y^4$$

requer 15 coeficientes, e é válida no intervalo das observações. Os coeficientes obtidos da regressão para as

superfícies de interesse estão indicados abaixo:

coeficientes para a superfície do 1º grau:

$$c_1 = -0,2489564747 \times 10^1 \quad c_2 = -0,3806659935 \times 10^1 \\ c_3 = 0,4642642630 \times 10^0$$

Coefficientes para a superfície do 2º grau:

$$c_1 = 0,5043884526 \times 10^1 \quad c_2 = -0,1085882674 \times 10^2 \\ c_3 = 0,3886601250 \times 10^1 \quad c_4 = 0,1047524477 \times 10^1 \\ c_5 = -0,1640840258 \times 10^1 \quad c_6 = 0,9685596422 \times 10^0$$

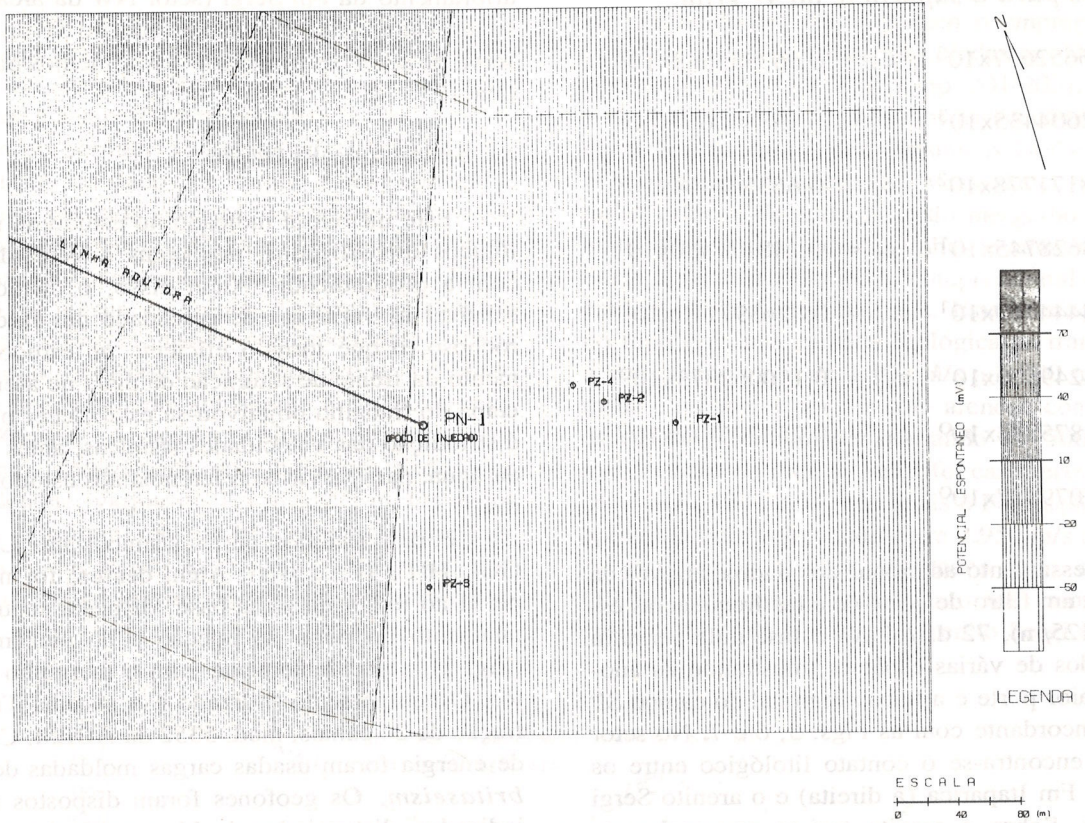


Figura 5. Mapa de tendência do potencial espontâneo para uma superfície do 1º grau.



Figura 6. Mapa de tendência do potencial espontâneo para uma superfície do 2º grau.

Coeficientes para a superfície do 4º grau:

$$\begin{aligned} c_1 &= -0,206652657 \times 10^3 & c_2 &= 0,563555568 \times 10^2 \\ c_3 &= 0,192604435 \times 10^3 & c_4 &= -0,138340650 \times 10^2 \\ c_5 &= -0,158171778 \times 10^2 & c_6 &= -0,663544464 \times 10^2 \\ c_7 &= 0,183628745 \times 10^1 & c_8 &= -0,148171450 \times 10^1 \\ c_9 &= 0,564444769 \times 10^1 & c_{10} &= 0,826397110 \times 10^1 \\ c_{11} &= -0,824249500 \times 10^{-1} & c_{12} &= 0,150062873 \times 10^0 \\ c_{13} &= -0,181875834 \times 10^0 & c_{14} &= -0,253225812 \times 10^0 \\ c_{15} &= -0,367079347 \times 10^0 \end{aligned}$$

O processamento adicional dos dados, através da aplicação de um filtro de corte de altas frequências espaciais (0,0125/m), 72 dB/oitava e fase nula permitiu eliminar ruídos de várias espécies, mostrando as anomalias de maior porte e a feição regional do campo SP de forma concordante com as Figs. 5, 6 e 7. No setor SE da área encontra-se o contato litológico entre os folhelhos da Fm Itaparica (à direita) e o arenito Sergi (à esquerda). Sobre o arenito tem-se provavelmente zonas de maior permeabilidade associadas a valores mais baixos de SP. Um aspecto importante é a correlação entre os valores básicos do potencial espontâneo (mostrados na Fig. 5) e a geologia da área. Na zona de

afloramento da Fm Sergi (setor NW da área) constata-se um valor relativo mais elevado do SP do que se observa no setor SE associado aos folhelhos da Fm Itaparica.

c) Sísmica de Refração

Este método é indicado no estudo de meios geológicos estratificados, nos quais a velocidade cresce com a profundidade. Além disso, o método é muito sensível às variações de densidade das fases do meio rochoso, o que torna-o eficiente no estudo do movimento da frente de saturação da água no arenito. Nesta etapa do trabalho objetivou-se estabelecer o padrão de distribuição das velocidades sísmicas, antes da injeção da água, para servir de referência aos estudos posteriores.

Foram medidos perfis sísmicos nas Linhas FF', GG', HH', JJ', e NN'. Além desses, foi medido um perfil ao longo da linha-base, disposta segundo o alinhamento do poço de injeção e do piezômetro Pz-1 (Fig. 2), coincidentemente com o mergulho dos estratos. O equipamento utilizado é o sistema Trio de Refração de 24 canais, mod. 5352 da ABEM. Como fonte de energia foram usadas cargas moldadas de dinamite *britaseism*. Os geofones foram dispostos nas linhas indicadas, distanciados de 11 m entre si e o centro da expansão situado na linha-base. Também, foram medidos perfis de detalhe, com geofones distanciados de 2,0 m, a fim de determinar a espessura e velocidade da camada de intemperismo.

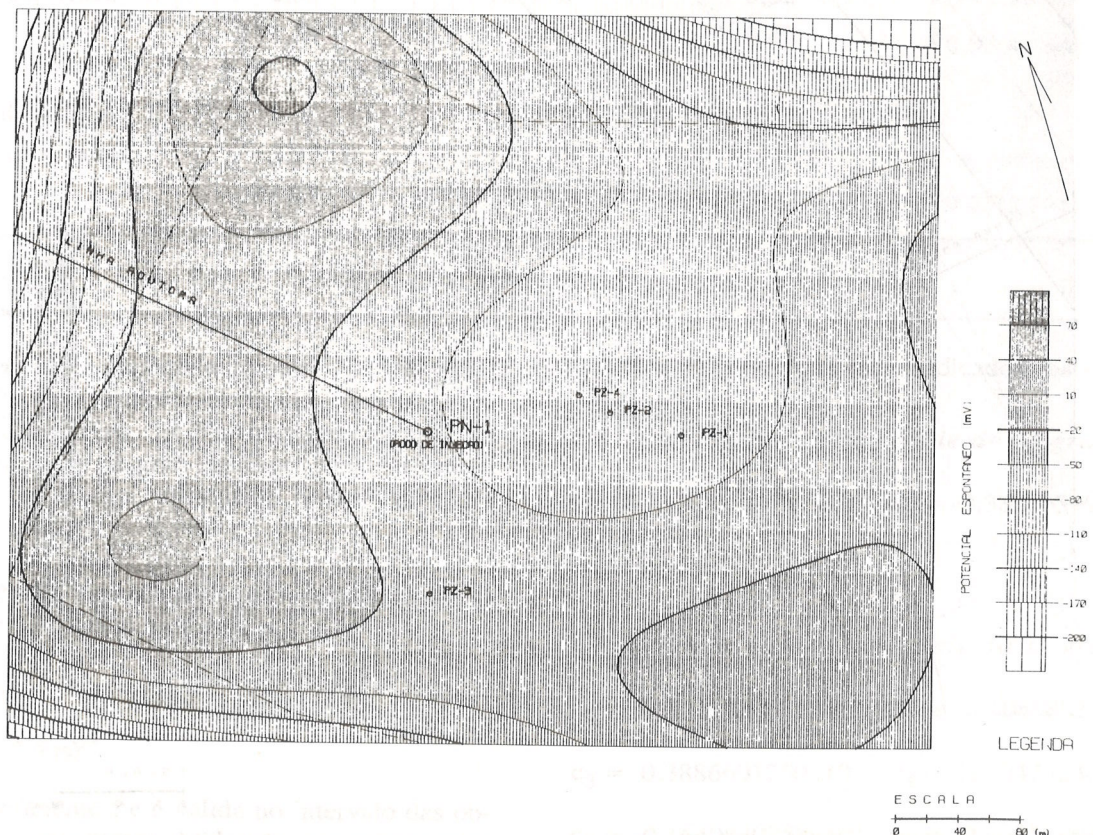


Figura 7. Mapa de tendência do potencial espontâneo para uma superfície do 4º grau.

Nas Figs. 8 e 9 são mostrados gráficos *tempo x distância* típicos do levantamento dos perfis investigados. Nesses gráficos estão indicadas as velocidades aparentes, nos sentidos direto e contrário ao mergulho das camadas, e a superfície topográfica.

A fim de permitir a interpretação geológica dos perfis sísmicos, os dados de campo foram corrigidos para eliminar, em cada geofone, os efeitos da elevação e a influência da camada de baixa velocidade (intemperismo) usando o procedimento descrito por Dobrin (1981, p. 336). Assim, os valores do tempo de chegada do pulso de energia elástica correspondente a cada geofone foram reduzidos a um plano *datum*, passando na camada imediatamente subjacente à de baixa velocidade (300 m/s). A espessura média da camada de intemperismo, determinada com base nos dados dos perfis de detalhe, variou de 1,5 m a 2,5 m. Os dados corrigidos definiram melhor as camadas litológicas, evidenciando, em alguns casos, refratores pouco perceptíveis no gráfico *tempo-distância*, antes da correção.

A determinação da espessura de cada camada sob os pontos-de-tiro foi feita com o emprego das equações do tempo de interseção, dadas em Dobrin (1981, pp. 296-300) e Knox (1967, pp. 201-203).

As Figs. 8 e 9 mostram as secções geológicas, correspondentes aos perfis sísmicos GG' e HH'. A Tabela 3 mostra os valores das velocidades reais, dos ângulos críticos de refração e do mergulho de cada camada, obtidos em todas as linhas levantadas. O arenito Sergi apresenta velocidade compressional com valores entre 2.000 m/s e 2.250 m/s. Este arenito é marcado no topo por uma camada litológica de transição, onde a velocidade varia de 1.100 m/s a 2.000 m/s. Esta camada é recoberta por um solo arenoso com 6 a 8 m de espessura e velocidades variando de 500 m/s a 710 m/s. A base do arenito Sergi foi caracterizada nas secções GG', HH', e JJ' nas quais a Formação Aliança se apresenta com velocidade entre 2.950 m/s a 3.000 m/s. A comparação desses resultados com os de Lima (1979), são concordantes quanto aos valores de velocidades de onda sísmica no arenito Sergi e na camada

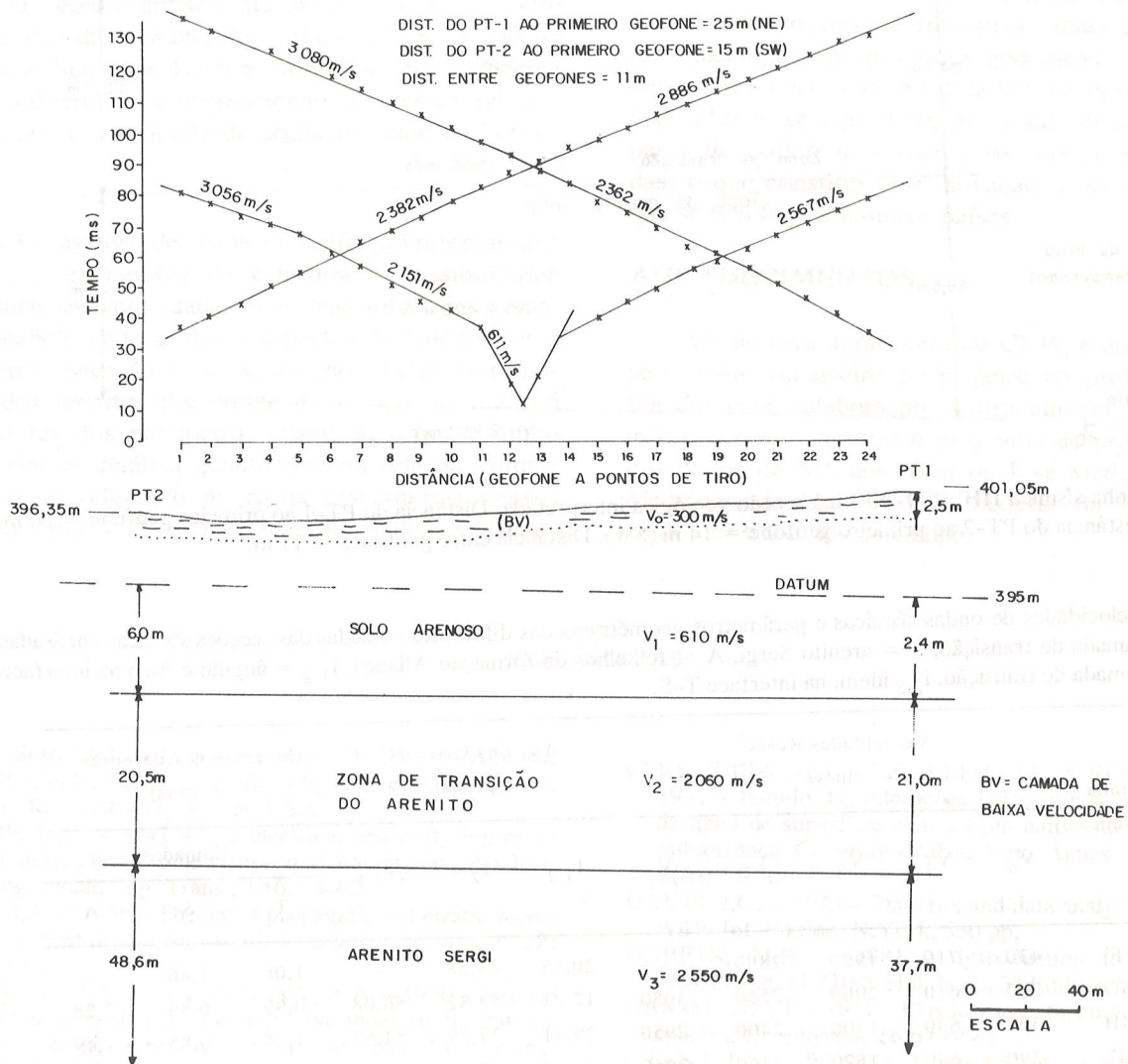


Figura 8. Linha sísmica GG' (SW-NE) e a secção geológica interpretada.

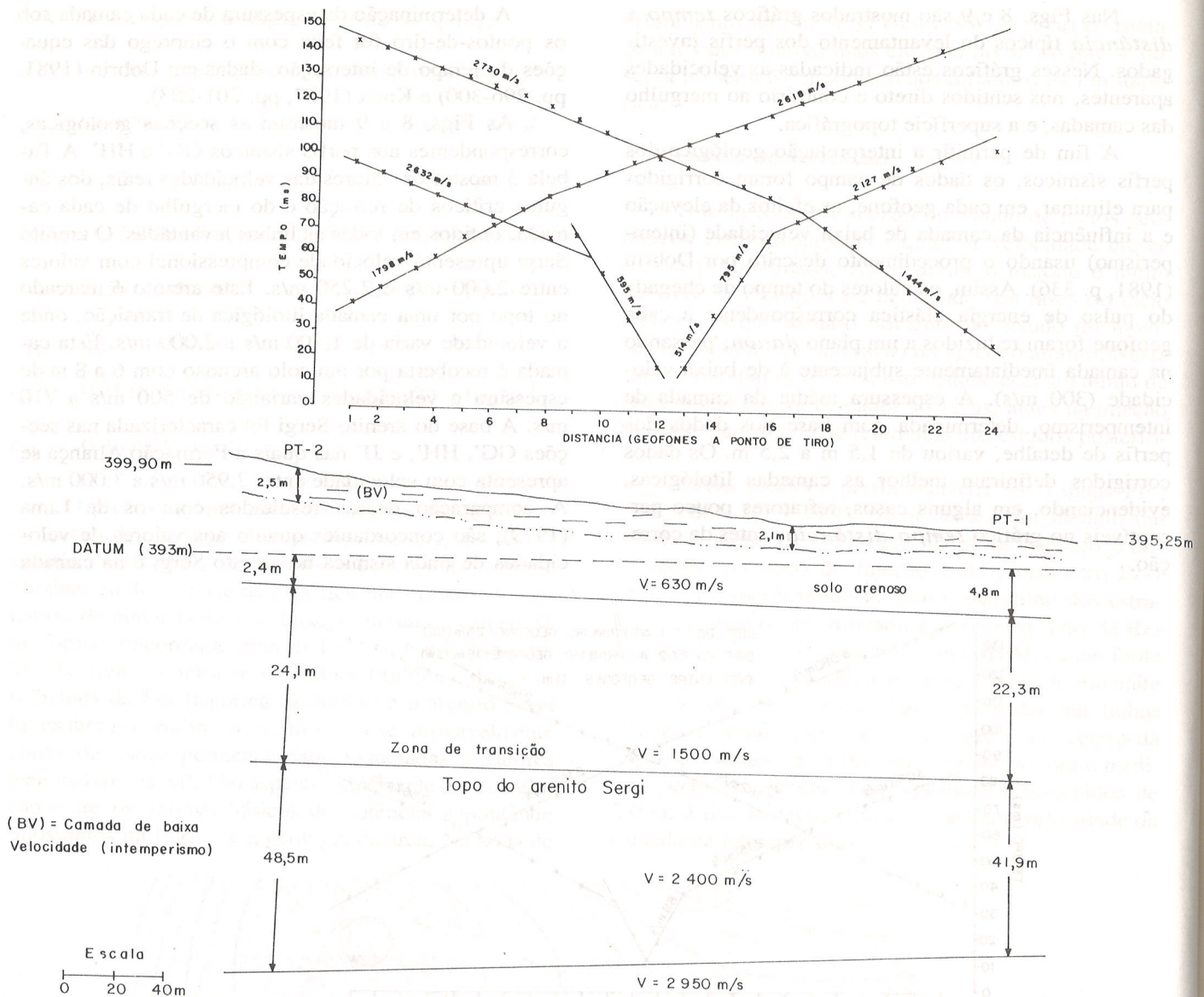


Figura 9. Linha sísmica HH' (SW-NE) e a secção geológica interpretada. Distância do PT-1 ao primeiro geofone = 20 m (NE). Distância do PT-2 ao primeiro geofone = 14 m (SW). Distância entre geofones = 11 m.

Tabela 3. Velocidades de ondas sísmicas e parâmetros geométricos das diferentes camadas das secções sísmicas analisadas. T = camada de transição, S = arenito Sergi, A = folhelhos da formação Aliança, $i_{1,2}$ = ângulo crítico na interface solo-camada de transição, $i_{2,3}$ idem, na interface T-S.

Linha Sísmica	Velocidades Reais*					Ângulos Críticos*			Mergulhos Aparentes*		
	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I _{1,2}	I _{2,3}	I _{3,4}	Camadas		
									T	S	A
FF'	430	710	1990	2890	-	20,95	43,38	-	1,06	2,86	-
GG'	300	610	2060	2550	3080	17,21	53,82	56,08	0,99	0,86	2,28
HH'	300	630	1500	2400	2950	29,41	37,39	54,57	1,24	0,85	1,49
JJ'	290	680	1520	2460	2950	25,04	38,16	56,50	0,08	1,54	0,99
NN'	310	530	1050	2000	2950	25,19	32,16	42,68	1,02	0,97	-

(*) Valores médios de cada secção.

de transição, excetuando a camada de solo arenoso, para a qual a velocidade média encontrada (620 m/s) é mais elevada 55%. Essa diferença é explicada pela maior umidade dos sedimentos, face ao período chuvoso à época do levantamento de campo. As espessuras das diferentes camadas apresentam valores que se ajustam bem àquelas fornecidas por alguns perfis de poços feitos por Lima (1979), em fase anterior do trabalho.

CONCLUSÕES

Os estudos geofísicos nesta fase da pesquisa envolvendo os métodos eletrorresistividade, potencial espontâneo e sísmica de refração permitem as seguintes conclusões:

– O levantamento geolétrico evidenciou a presença de uma camada de baixa resistividade (5 a 16 Ω m) que marca o topo da Formação Sergi. A base dessa formação no âmbito do reservatório, foi identificada na maioria das sondagens elétricas, exceto nas linhas CC' e JJ', com o máximo afastamento de 400 m entre os eletrodos de corrente. As variações de resistividade no arenito Sergi (de 1.200 a 1.660 Ω m) possivelmente refletem diferenças composicionais do arenito, relacionadas com a quantidade de argila presente na Formação.

– Os estudos de sísmica de refração reforçaram a delimitação geométrica da estrutura e possibilitaram determinar as velocidades reais nas diferentes camadas, estabelecendo assim o espectro de valores desse parâmetro, antes do início da injeção. O efeito da saturação dos arenitos decorrente da injeção se refletirá nos valores dos parâmetros sísmicos, o que é muito importante na análise quantitativa da relação volume de água introduzindo na rocha reservatório *versus* resposta sísmica. A interpretação dos dados de sísmica

na área requer a correção rigorosa dos dados de campo, eliminando os efeitos da camada de baixa velocidade e da topografia, em razão do baixo contraste das velocidades reais das diferentes camadas de rocha sedimentares.

– Os dados de SP processados com filtro passa-baixa e frequência de corte igual a 0,0125/m evidenciam as anomalias mais significativas da área, eliminando os ruídos de diversas origens. A análise de tendência por meio da regressão múltipla, por mínimos quadrados, forneceu uma superfície analítica de tendência do campo de SP, que servirá de referência para as medições futuras, durante as várias fases do processo de injeção. As variações temporais no campo de SP, nas fases subseqüentes da pesquisa, serão correlacionadas com o movimento da água na formação. Na área de influência do reservatório existe uma forte correlação entre as duas principais litologias (Fm Sergi e Fm Itaparica) e a superfície do 1º grau, evidenciada por valores típicos de SP mais baixos sobre a Fm Sergi.

– Os arenitos da Formação Sergi constituem os mais importantes reservatórios de hidrocarbonetos na Bacia do Recôncavo e bons aquíferos nas suas áreas de afloramento, nesta e em outras bacias. Assim, o conhecimento das propriedades geofísicas e petrofísicas desses arenitos (a seco e saturado no próprio ambiente) é de alto valor científico, por estar sendo extraído a partir do estudo *in natura*, sob condições controladas, o que constitui uma inovação, comparada com o que se tem feito em outros países.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao FIPEC-BB pelo apoio financeiro ao projeto; ao prof. Milton J. Porsani pela colaboração e fornecimento de um dos módulos que compõem o programa de processamento dos dados de SP; aos técnicos José Medeiros e Luiz Medeiros, da Universidade Federal da Bahia, pelo apoio nos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, W.L. – 1979 – Programa MARQDCLAG: inv. of DC-Schlumberger Soundings by Lagged-Convolution. USGS Rept. 79-432, Denver, USA.
- ARCHIE, G.E. – 1942 – The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. An. Inst. Mining Metall. Eng. Trans., **146**: 54-62.
- BIOT, M.A. – 1956 – Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. J. Acoust. Soc. Am., v. **28**: 168-178.
- BOGOSLOVSKY, V.A. & OGILVY, A.A. – 1970 – Natural potential anomalies as a quantitative index of the rate of seepage from water reservoirs. Geophys. Prospecting, **18**(2): 1527-1532.
- BORN, W.T. – 1941 – The attenuation constant of earth materials. Geophysics, **6**: 132-148.
- CERQUEIRA NETO, J.X., LEITE, J.L. & ROCHA, V.C. – 1982 – Estudo das interações físico-químicas e biológicas da água de superfície com a água nativa no Reservatório Subterrâneo Cocorobó-Bahia. Rev. Águas Subterrâneas, **2**(6): 53-76.
- DAVIS, J.G. – 1973 – Statistics and data analysis in geology. Wiley Int. Edition, N.York, 530 pp.
- DOBRIN, M.B. – 1981 – Introduction to geophysical prospecting. McGraw Hill, N.Y., 3ª Edition, 630 pp.
- GASSMANN, F. – 1951 – Elastic waves through a packing of spheres. Geophysics, **16**: 673-685.
- GRANT, F.S. & WEST, G.F. – 1965 – Interpretation theory in applied geophysics. McGraw Hill Book Co., N. York, 584 pp.

- GREGORY, A.R. - 1976 - Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, **41**: 895-921.
- HUGHES, D.S. & KELLY, L.L. - 1952 - Variation of elastic wave velocity with saturation in sandstones. *Geophysics*, **17**: 739-752.
- KING, M.S. - 1966 - Wave velocities in rocks as a function of overburden pressure and pore fluid saturation. *Geophysics* **31**: 50-73.
- KNOX, W.A. - 1967 - Multilayer near-surface refraction computation in: *Seismic Refraction Prospecting*. Ed. Albert W. Musgrave - SEG Tulsa, pp. 197-216.
- LIMA, O.A.L. - 1979 - Estudo da utilização de reservatórios subterrâneos naturais para armazenamento de água numa área experimental na região semi-árida do Nordeste Brasileiro. Tese de Doutorado, PPPG/UFBA, 145 p.
- LIMA, O.A.L. & DIAS, C.A. - 1979 - Estudo das propriedades hidrodinâmicas da Formação Sergi numa área experimental na região de Cocorobó, Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, **9**: 140-150.
- LIMA, O.A.L. & DIAS, A.C. - 1980 - Estudos geofísicos de uma área experimental na região semi-árida do Nordeste, para armazenamento subterrâneo de água. *Rev. Bras. Geoc.*, **10**(2): 141-154.
- MAVCO, G. - 1979 - Frictional attenuation: An inherent amplitude dependence. *Geophys. Res.*, **84**: 4769-76.
- McEUEN, R.B., BERG, J.W. & COOK, K.L. - 1959: Electrical properties of synthetic metalliferous ore. *Geophysics*, **24**(3): 510-530.
- MEISER, P. - 1962 - A method for quantitative interpretation of self potential measurements. *Geophys. Prospecting*, **10**: 203-218.
- OGILVY, A.A. - 1967 - Geophysical prospecting for groundwater in the Soviet Union. In: *Mining and Groundwater Geophysics*, 1967. *Econ. Geol. Rep.* **26**: 536-543.
- PATERSON, N.R. - 1956 - Seismic wave propagation in porous granular media. *Geophysics*, **21**: 691-714.
- RAMANCHANDRAN, C. & NAIR, M. - 1981 - Elastic properties of lower Gondwana rocks of eastern India. *Geoexploration*, **19**: 15-32.
- SPENCER, J.W. - 1979 - Bulk and shear attenuation in Berea sandstone: the effects of pore fluids. *J. Geophys. Res.*, **84**: 7521-23.
- SUMMER, J.S. - 1976 - Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam, 277 pp.
- WINKLER, K.W. & AMOS NÜR - 1982 - Seismic attenuation. Effects of pore fluids and frictional sliding. *Geophysics*, **47**(1): 1-15.
- WYLLIE, M.A. - 1962 - Studies in elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics*, **27**: 569-89.
- YALE, D.P. - 1985 - Recent advances in rocks physics. *Geophysics*, **50**(12): 2480-91.
- YÜNGÜL, S. - 1950 - Interpretation of spontaneous polarization anomaly caused by spheroidal orebodies. *Geophysics*, **15**(2): 237-46.

Versão original recebida em Set./88
 Versão final, em Jun./89
 Editor Associado: W.S.