

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

ESTUDO GEOFÍSICO REGIONAL SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ILHA DO  
MARAJÓ - PARÁ - BRASIL

Tese Apresentada por

ANTONIO ABEL GONZALEZ CARRASQUILLA

como requisito parcial à obtenção do grau em

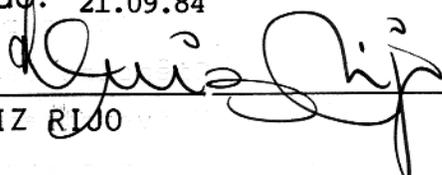
MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

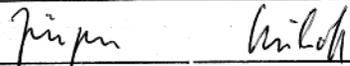
GEOFÍSICA

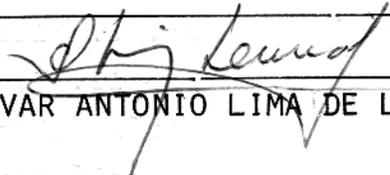
Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Geofísicas e Geológicas da  
Universidade Federal do Pará

Aprovada: 21.09.84

  
LUIZ RIO

(ORIENTADOR)

  
JÜRGEN H. BISCHOFF

  
OLIVAR ANTONIO LIMA DE LIMA

Comitê de Tese

T.233 GONZALEZ, Antonio Abel Carrasquilla

G.643 Estudo geofísico regional sobre  
águas subterrâneas na Ilha do Mara  
jô-Pará-Brasil. Belém, UFPa/NCGG,  
1984.

143 p.

Tese apresentada ao Núcleo de  
Ciências Geofísicas e Geológicas da  
Universidade Federal do Pará, para  
obter o grau de Mestre em Ciências  
na área de Geofísica.

1. Geofísica. 2. Prospecção Geofísi  
ca. 3. Hidrogeologia. Marajó-Pará .  
Brasil. I. Universidade Federal do  
Pará/Núcleo de Ciências Geofísicas  
e Geológicas. II. Título.

CDD.622.154098115

Aos meus pais,

De cujos autênticos cabelos  
brancos, eu sou uma das  
principais causas.

Ao povo Brasileiro,

A quem cheguei a querer e a respeitar ,  
com quem me identifiquei nos seus problemas,  
experimentando suas alegrias e suas  
frustrações.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Luiz Rijo pela motivação, orientação e amigáveis conselhos.

Ao colega Milton Porsani, que acompanhou de perto este trabalho, contribuindo com boas idéias.

As pessoas que exerceram os cargos de Coordenador Geral do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas (NCGG) e do Curso de Pós-Graduação desta Instituição, que sempre se preocuparam com o destino dos Panamenhos que por aqui passaram.

Ao corpo docente e discente do Curso de Pós-Graduação do NCGG, que contribuíram na formação dos nossos conhecimentos, sobre os quais se apoia este trabalho.

Ao Prof. João Batista da Silva e ao compadre Maurício Martínez, pela ajuda na parte de inversão.

Aos funcionários do NCGG que contribuíram com seu trabalho administrativo e de infraestrutura.

Ao desenhista Adalberto Lima pelo excelente trabalho nas ilustrações.

A Prof. Sonia Celia de Oliveira Alves pela revisão do texto.

Aos técnicos Walter, Hamilton e Dário, pela ajuda na confecção dos mapas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo oferecida durante o nosso curso de Pós-Graduação.

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelos recursos financeiros dados ao projeto "Avaliação e Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha de Marajó", no qual está inserido nosso trabalho.

Ao Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP), nas mãos do Dr. A.C. Tancredi, pela facilidade dos dados.

Ao laboratório de Matemática Aplicada e Computação do NCGG, pelas valiosas horas de computação.

Ao povo brasileiro pela sua hospitalidade e por

ser ele quem realmente arcou com nossos gastos neste país.

Enfim, a todos os que involuntariamente não citamos aqui, mas que, de alguma forma, ajudaram ao feliz término deste trabalho.

## PROTESTOS

Os estudantes do Curso de Pós-Graduação do NCGG , como membros da comunidade desta Instituição, têm a obrigação de participar de todas as tarefas próprias dos estudantes. Em contrapartida, também o NCGG nos deve dar o direito de participar , de uma forma mais efetiva, nas decisões dos assuntos relacionados com as atividades por nós desenvolvidas.

Os atuais valores das bolsas de estudo para estudantes de Pós-Graduação dificilmente conseguem manter o equilíbrio físico e emocional de que precisamos para realizar nossas pesquisas.

A atual política dos programas de pesquisa no Brasil continua ignorando os direitos que nós, pós-graduandos, temos, como parte fundamental na realização dessas pesquisas.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<u>FIGURAS</u>		<u>Pag</u>
1	- Áreas e Estimativas do Tempo das Enchentes.....	7
2	- Localização da Área de Estudo.....	11
3	- Área de Campo e Floresta.....	12
4	- Distribuição dos Tipos de Vegetação.....	13
5	- Densidade da População.....	14
6	- a) Tipos de Clima e b) Temperatura Média Anuais para a Área de Estudo.....	16
7	- Relação entre Tipos Climáticos e de Cobertura Vegetal.....	17
8	- Distribuição Pluviométrica.....	19
9	- Regime de Chuvas.....	20
10	- Parte da Coluna Estratigráfica da Bacia da Foz do Rio Amazonas.....	23
11	- Unidades Morfo-estruturais e Domínios Climáticos.....	29
12	- Mapa Geomorfológico da Região dos Campos de Marajó.....	30
13	- Osopacas do Grupo Pará.....	33
14	- Ocorrência de Água Subterrânea.....	38
15	- Áreas Pilotos do Projeto Marajó.....	44
16	- Gráfico da SEV 413.....	50
17	- Interpretação da SEV 576.....	51
18	- SEVs do Grupo A, Primeira Família.....	54
19	- Interpretação das SEVs 116 e 59.....	55
20	- Interpretação das SEVs 183 e 551.....	56
21	- SEVs do Grupo B, Segundo Família.....	60
22	- Interpretação das SEVs 380 e 452.....	62
23	- Interpretação da SEV 406.....	63
24	- Interpretação da SEV 11,2 de Porsani (1982).....	64
25	- SEVs do Grupo C, Terceira Família.....	66
26	- Interpretação das SEVs 83 e 37.....	67
27	- Interpretação das SEVs 390 e 449.....	68
28	- Interpretação da SEV 170.....	70
29	- Interpretação das SEVs 1,2 e 18,2 de Porsani(1982)	74
30	- Interpretação das SEVs 516 e 406.....	77
31	- Interpretação das SEVs 344 e 447.....	78

32	- Interpretação da SEV 459.....	79
33	- Perfis da Profundidade do Aquífero Profundo.....	82
34	- Perfis da Resistividade Média.....	86
35	- Perfis da Condutância Longitudinal Total.....	88
36	- Interpretação das SEVs 90 e 15.....	90
37	- Interpretação da SEV 34 Através do Método de In - versão.....	96
38	- Modelo Inicial da SEV 34.....	98
39	- Matriz Densidade de Informação para a SEV 34.....	100
40	- Escolha do Posto na Inversão da SEV 34.....	102
41	- Interpretação da SEV 570 Através do Método da In - versão.....	104
42	- Modelo Inicial da SEV 570.....	105
43	- Matriz Densidade de Informação para a SEV 570.....	107
44	- Escolha do Posto na Inversão da SEV 570.....	108
45	- Interpretação da SEV 517 Através do Método da In - versão.....	109
46	- Modelo Inicial da SEV 517.....	110
47	- Matriz Densidade de Informação para SEV 517.....	112
48	- Escolha do Posto na Inversão da SEV 517.....	113
49	- Modelo de 3 Camadas Horizontais, Isotrópicas e Ho - mogêneas (TCHIH).....	117
50	- Modelamento do TCHIH pelo Programa SEV2.....	118
51	- Modelamento do TCHIH pelo Programa RES2.FOR.....	119
52	- Alterações do Modelo TCHIH (ATCHIH).....	120
53	- Modelamento do ATCHIH (A e B) pelo Programa RES. FOR.....	122
54	- Modelamento do ATCHIH (C e D) pelo Programa RES.2 FOR.....	123
55	- Interpretação do ATCHIH-A com o Programa SEV2.....	124
56	- Inversão da ATCHIH-A.....	125
57	- Modelos para um Paleocanal (Aflorante e não Aflo - rante).....	126
58	- Modelamento de Paleocanal com o Programa RES2.FOR	127
59	- Comparação de Curvas Padrões para um Vale Elípti - co e para Camadas Horizontais.....	130
60	- Seção Cruzada de um Vale de Semi-Eixos a e b e re - sistividade $\rho_1$ .....	132

TABELA

1	- Dados das SEVs 400 e 401.....	49
---	---------------------------------	----

## SIGNIFICADOS DE ALGUNS TERMOS USADOS NO TEXTO

SEV(s): sondagem(s) elétrica(s) vertical(ais).

Paleocanais: estruturas geomorfológicas com forma semicilíndrica e disposição meandrante, presentes nas fotografias e imagens de radar da Ilha de Marajó (Porsani, 1982). O termo foi utilizado pela primeira vez no Projeto Radam (1974).

Igarapé: denominação dada aos pequenos rios na grande região norte (Amazônia). É um termo indígena que significa "caminho de canoa" (de igara-canoa e pe-trilha, caminho) (Guerra, 1980).

Furos: denominação regional amazônica para os braços de água que ligam um curso fluvial a outro ou a um lago ou, ainda, pelo montante da foz ao curso de água em que deságua. Na Amazônia, são característicos na "região das Ilhas", onde os "furos de Breves" formam um verdadeiro labirinto de canais anastomoseados (Guerra, 1980).

Paraná: terminologia amazônica de origem indígena, que significa o braço de um grande rio, formando uma grande ilha (Guerra, 1980).

Slikke: parte baixa dos terrenos vasosos (argilosos), que permanece quase sempre sob as águas. Esta superfície é separada do Schorre, parte mais alta, por microfalesia (Guerra, 1980).

Schorre: superfície vasosa (argilosa) que aparece numa altura superior a Slikke e que raras vezes é recoberta pelas águas salgadas ou salobras. Separada do Slikke por uma microfaléia (Guerra, 1980).

Paleoprais: estruturas lineares subparalelas as linhas de costa no extremo nordeste da Ilha de Marajó e às margens do Lago Arari, que correspondem provavelmente as sucessivas margens abandonadas no processo sedimentar (Porsani, 1982).

Caboclo: indígena brasileiro: mestiço de branco com índia (Cavero, 1977).

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
PROTESTOS	IV
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	V
SIGNIFICADO DE ALGUNS TERMOS USADOS NO TEXTO	VIII
SUMÁRIO	IX
ESCLARECIMENTO	XII
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	6
1.1 <u>Objetivos</u> .....	6
PRIMEIRA PARTE	9
1.2 <u>Descrição Geral da Ilha de Marajó</u> .....	10
1.2.1 Localização.....	10
1.2.2 Áreas Naturais da Ilha.....	10
1.2.3 População.....	10
1.2.4 Climatologia e Vegetação.....	15
1.2.5 Principais Atividades Econômicas da Região.....	18
1.3 <u>Geologia da Área</u> .....	22
1.3.1 Generalidades.....	22
1.3.2 Estratigrafia.....	22
1.4 <u>Geomorfologia</u> .....	26
1.4.1 Relêvo.....	27
1.4.2 Drenagem.....	31
1.5 <u>Hidrogeologia</u> .....	32
1.5.1 Aquíferos de Média a Elevadas Profundidades....	32
1.5.2 Aquíferos de Pequena Profundidade.....	34
1.6 <u>O Problema Hídrico da Região dos Campos de Marajó</u> .....	35
1.7 <u>Qualidade das Águas Subterrâneas</u> .....	37
1.8 <u>Estudos Geofísicos Anteriores</u> .....	40

SEGUNDA PARTE	47
2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	48
2.1 <u>Tratamento e Interpretação Quantitativa dos Dados..</u>	48
3 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	53
3.1 <u>Classificação das SEVs.....</u>	53
3.2 <u>Interpretação dos Mapas e Perfis Construídos.....</u>	73
3.2.2 Mapa de Localização das SEVs, Baseado na Classi - ficação.....	75
3.2.3 Mapa da Profundidade do Aquífero Profundo.....	80
3.2.4 Mapa da Resistividade Média.....	84
3.2.5 Mapa da Condutância Longitudinal Total.....	87
3.2.6 Mapa da Espessura da Camada que Contém o Aquífero Raso e de Média Profundidade.....	87
TERCEIRA PARTE	91
4 ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA E DOS RESULTADOS AL- CANÇADOS NA PRIMEIRA PARTE .....	92
4.1 <u>Inversão e Estatística dos Dados.....</u>	92
4.1.1 Generalidades.....	92
4.1.2 Razões para usar a Técnica de Ridge Regression na Inversão de Dados Eletroresistivos.....	93
4.1.3 Comentário dos Resultados.....	95
4.1.3.1 SEV do Grupo C (Nº 34).....	95
4.1.3.2 SEV do Grupo B (Nº 570).....	103
4.1.3.3 SEV do Grupo A (Nº 517).....	106
4.2 <u>Efeito das Variações Laterais de Resistividade.....</u>	111
4.2.1 Generalidades do Método de Elementos Finitos.....	114
4.2.1.1 Construção da Malha.....	115
4.2.2 Resultados.....	116
4.2.2.1 Comparação de Modelos.....	116
4.2.2.2 Teste com modelo Bidimensional.....	116
4.2.2.3 Modelamento de um Paleocanal.....	121
5 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	129
6 CONCLUSÕES.....	133
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136



## ESCLARECIMENTO

Este trabalho é constituído de três partes principais:

A primeira parte refere-se a um levantamento geral de informações da Ilha de Marajó, envolvendo generalidades, geologia, geomorfologia e hidrogeologia, em uma tentativa de relacioná-las com a problemática da água desta área.

A segunda consiste na interpretação das 694 SEVs executadas pelo IDESP na região dos campos da Ilha de Marajó, usando-se para tal fim um modelo geofísico simples de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas. Os resultados dessa interpretação foram acrescentados aos obtidos pelo NCGG, com o objetivo de apresentar um estudo integrado de hidrogeologia da área prospectada. Para o leitor interessado somente na prospecção de água subterrânea basta a consulta desta parte.

Na terceira parte, foi testada a validade de se usar esse modelo de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas na interpretação de dados eletroresistivos obtidos numa área de geologia tão recente, complexa e heterogênea como o Marajó. Para tal fim, aliou-se a técnica de inversão ao modelamento bidimensional com elementos finitos, técnicas estas bastantes sofisticadas na interpretação e modelamento de dados geofísicos.

As conclusões referentes a cada uma das partes são apresentadas na conclusão geral deste trabalho.

## RESUMO

Nos últimos dez anos foram realizadas na parte leste da Ilha de Marajó (região dos campos naturais) pelo IDESP e NCGG, mais de 800 SEVs para fins hidrogeológicos. Na época, grande parte dessas SEVs não foram totalmente interpretadas em forma quantitativa, devido à falta de recursos técnicos para fazê-lo de forma eficiente. Agora, usando meios mais modernos para interpretação automática de SEVs, voltou-se a interpretá-las com a finalidade de apresentar uma visão regional dos principais aquíferos da área, agrupar as SEVs em famílias características, testar até que ponto essa interpretação é confiável e propor o modelamento bidimensional como técnica alternativa para interpretar as SEVs realizadas em certos locais da área em questão.

Como resultado dessa interpretação, com base na teoria convencional dos meios estratificados, foram definidos três tipos de sistemas de aquíferos.

1. O primeiro, denominado de aquífero profundo, situado a profundidades maiores que 50m, estende-se por toda a região prospectada, estando provavelmente associada às camadas superiores da Formação Marajó ou às litologias altamente resistentes das camadas mais profundas do Grupo Pará.
2. O segundo, denominado de aquífero raso e de média profundidade, localiza-se na parte sul e sudeste da região a profundidades compreendidas entre 10 a 50m, e está associado às lentes arenosas do Grupo Pará.
3. O terceiro, é constituído pelos paleocanais e estruturas similares, distribuídos aleatoriamente na região a pouca profundidade.

A partir do estudo detalhado das SEVs, decidiu-se classificá-las em 3 famílias características com seus respectivos tipos e apresentar mapas de localização e da espessura dos aquíferos, bem como mapas de condutância longitudinal total e resistividade média da área. Estes últimos, permitem que se divida a região dos campos da Ilha de Marajó em três zonas principais:

1. Uma, altamente resistiva, situada ao sul e sudeste, a qual coincide com os terrenos aflorantes do Grupo Pará.
2. Outra, altamente condutiva, está localizada no centro e norte, onde se encontram aleatoriamente distribuídos os paleocanais e coincide com os terrenos topograficamente mais baixos, geralmente argilosos e embebidos de água salgada, que são procedentes da erosão dos terrenos circundantes topograficamente mais altos.
3. A última é medianamente resistiva e está relacionada com os terrenos vizinhos à cidade de Chaves (noroeste da região dos campos), os quais apresentam semelhanças com os do sul e sudeste da área.

Usando-se a técnica de inversão na interpretação de uma SEV característica de cada família, testou-se, através do seu tratamento estatístico, até que ponto os modelos usados na interpretação dessas SEVs (teoria convencional dos meios estratificados) seriam confiáveis. Conclui-se, então, que a alta correlação existente entre os parâmetros dos modelos assumidos (camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas) pode-se dever à utilização de modelos geofísicos muito simples para interpretar a complexa geologia de Marajó.

Tendo-se verificado que nem sempre é possível aplicar a teoria das SEVs em meios horizontalmente estratificados para interpretar SEVs obtidas em certos locais de Marajó, os quais muitas vezes apresentam bruscas variações laterais de resistividade, passou-se a demonstrar que estas variações laterais afetam profundamente os dados das SEVs, utilizando-se para isto a técnica dos elementos finitos, a qual leva em conta essa variação bidimensional das propriedades físicas do meio. Foi também possível com esta técnica, modelar uma estrutura rasa, semelhante a um paleocanal, concluindo-se que estes resultados sugerem o emprego, numa forma mais profunda, deste tipo de tratamento para os dados obtidos na região dos campos da Ilha de Marajó.

## ABSTRACT

IDESP and NCGG have conducted field work on the East half of the Marajó Island performing over 800 VES (Vertical Electrical Sounding), in the last ten years. The work was done for hidrogeological purposes. A large number of these VES, however, were not adequately interpreted at the time due to lack of application of good quantitative techniques. We have then reinterpreted all the data using recently developed interpretation techniques with the following goals: to present the regional distribution of the main aquifers in the area; to group the VES in characteristics families; to test the goodness of the interpretation; and to propose bidimensional modelling as an alternative technique for interpretation of some of the VES performed in specific locations in the area.

Initially, we did interpretation on assumption of a stratified earth and could identify three types of aquifers:

1. The first, named "deep aquifer", is located at depths deeper than 50m and can be found all over the prospected area. It seems to be associated to the upper layers of the Marajo Formation or it could be related to the highly resistive material of the deep layers of Pará Group.
2. The second, named "shallow aquifer", occur in the Southern and Southeastern portions of the area at depths between 10 and 50m. It is associated to the sandy lenses of the Para Group.
3. The least is represented by paleochannels and similar structures. It occurs scattered in a aleatory way in the area, at shallow depths.

We have classified the VES after a detailed study in three characteristic families with its respective types. This study also provided the preparation of maps of location and thickness of the aquifers, and maps of longitudinal conductance and average resistivity. The last ones helped to divided the region of campos of the Marajó Island in three main zones:

1. The first one is highly resistive and located

in the Southern and Southeastern portions of the area. It correlates to the outcropping ground of Para Group.

2. The second, highly conductive, is located in the Central and Northern portions of the area, where occur the scattered paleochannels. The ground in this zone presents the lowest topographic values in the area and in general contains clays and salty water.
3. The third is fairly resistive and it is related to the ground occurring in the neighborhood of the city of Chaves (Northwest of the region of camps), which are similar to that occurring in the Southern and Southeastern portions of the area.

At last we have tested the interpretation confidence for the horizontally stratified earth conventional model used by applying the inversion technique on one characteristic VES of each family. We found a very high statistical correlation among the model parameters, probably due to the application of a too simple unrealistic geophysical model to the complex real earth of Marajo Island.

The results from digital modelling by the finite element method demonstrated the influence of the abrupt lateral variation in resistivity on VES data. The finite element method was also used for modelling a shallow structure similar to a paleochannel. This result suggests that bi-dimensional models can be very helpful in interpreting resistivity data collected in the region of camps of Marajo.

"O Marajó está no caminho das mudanças. Para sobreviver tem que entrar no nivelamento geral, mais uma vítima do mundo em evolução".

(Giovanni Gallo, 1981).

"Quem manda no Marajó não é o Presidente da República, não é o Governador, não é o Prefeito. Aqui domina uma ditadura absoluta e incontestável, não baseada na Constituição ou nas Forças Armadas. É um dado de fato, quem manda é a água, é a água quem dá sustento e cria as dificuldades, consola e leva ao desespero, condiciona a saúde, o trabalho, a vida da gente: sem levantar a voz, sem violência, mas implacável e total".

(Giovanni Galo, 1981).

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Objetivos

O regime hidrológico da Ilha de Marajó é caracterizado por um período, entre janeiro e julho, marcadamente chuvoso, seguido por seis meses de estiagem. No primeiro período grande parte da Ilha fica alagada (figura 1) e no segundo tudo fica seco, inclusive lagos, rios e igarapés. Neste período, a população dos campos e os rebanhos ficam praticamente sem água de qualidade aceitável para as suas necessidades. Este problema torna-se mais grave devido ao fato de que, em grande parte da região, a água de subsuperfície de apresenta com elevadas concentrações de sais minerais ou em possíveis aquíferos a grandes profundidades. Além disso, a água dos melhores aquíferos encontrados até hoje, está fora das normas técnicas da OMS (Organização Mundial de Saúde) e da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Com o objetivo de determinar as características hidrogeológicas da parte leste da Ilha de Marajó, para a utilização racional dos seus recursos hídricos, o IDESP em 1971-1974 e o NCGG em 1974-1981, realizaram uma série de trabalhos geofísicos. Nesse período uma grande quantidade de dados foi obtida, inclusive mais de 800 SEVs.

O objetivo principal deste trabalho foi homogeneizar e interpretar centenas de SEVs que ainda não tinham sido totalmente interpretadas. Para isso, utilizaram-se os resultados dos trabalhos geofísicos realizados na área durante toda essa década, tentando unificá-los a fim de apresentar uma visão global e uniforme dos diferentes sistemas de aquíferos existentes nessa parte da Ilha, permanecendo, assim, dentro do espírito inicial em que foram projetados esses trabalhos.

Os trabalhos geológicos e geofísicos realizados na área, revelam que a geologia desta parte da Ilha de Marajó é muito heterogênea e complexa. O uso de modelos geofísicos simples (camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas) para interpretar dados obtidos neste tipo de ambiente, deve ser aceito com restrições. Por esta razão, decidiu-se, nesta parte do trabalho, apresentar uma análise real dos critérios utilizados nessa interpretação quantitativa. Testou-se em primeira instância, através



do método da inversão, a confiabilidade do modelo geofísico que use a teoria convencional dos meios estratificados (modelo unidimensional) para interpretar os dados obtidos em locais que apresentam variações laterais bruscas de resistividade (por exemplo, os paleocanais). Usou-se posteriormente, o modelo bidimensional que leva em conta essas variações, valendo-se, para isso, da técnica dos elementos finitos.

PRIMEIRA PARTE

## 1.2 Descrição Geral da Ilha de Marajó

### 1.2.1 Localização

A Ilha de Marajó com seus 49,606 km<sup>2</sup> esta localizada no estuário do Rio Amazonas, limitada ao norte pelo canal principal do Amazonas e pelo Oceano Atlântico, ao sul pela foz dos Rios Pará e Tocantins, a oeste pelo canal de Breves e a leste pelo Oceano Atlântico. Situa-se entre os meridianos 48°20' e 51°00' de longitude oeste e entre os paralelos 0°00' e 2°00' de latitude sul (figura 2).

### 1.2.2 Áreas Naturais da Ilha

A partir do meridiano 49°30' distinguem-se claramente duas áreas naturais (figura 3):

1. A parte leste com 23,046 km<sup>2</sup>, chamada de região dos campos, constituída por uma grande planície com vegetação de savana.
2. A parte oeste com 26,560 km<sup>2</sup>, constituída de floresta, também chamada região de mata e dos furos.

A primeira é topograficamente mais baixa que a segunda e sua vegetação é adequada à produção agropecuária. A segunda, por sua riqueza florestal, é uma das principais fontes de madeira do Pará (figura 4).

### 1.2.3 População

Segundo o censo de 1980, a Ilha é subdividida em 12 municípios, a maioria deles com infraestrutura sócio-econômica bastante precária (figura 5). A população total da Ilha segundo o mesmo censo era de 285.074 habitantes.

A região de floresta apresentava uma população de 194.501 habitantes (68,23% do total), com uma densidade demográfica de 1,63 hab/km<sup>2</sup> e com 81,27% do total numa situação rural.

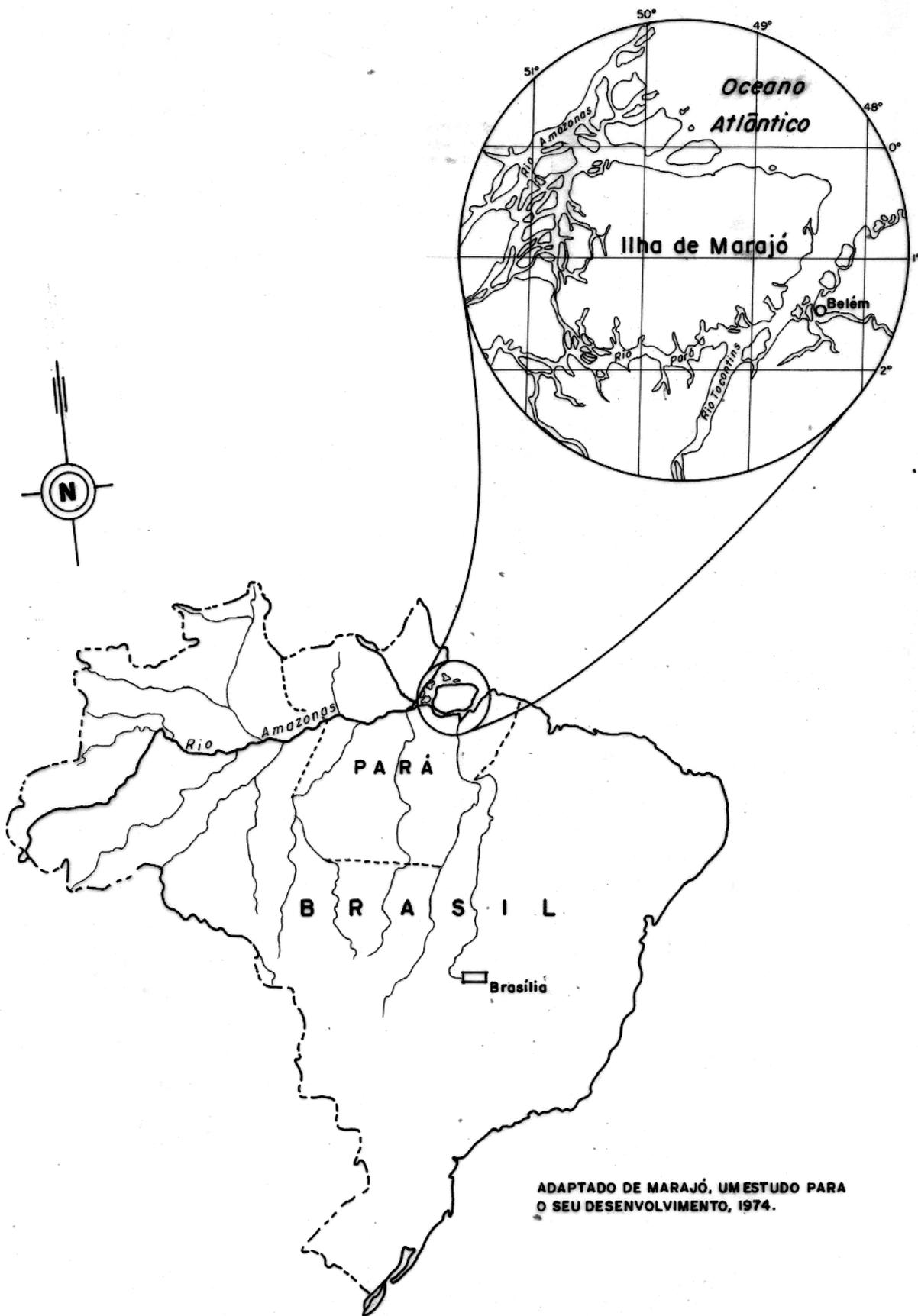
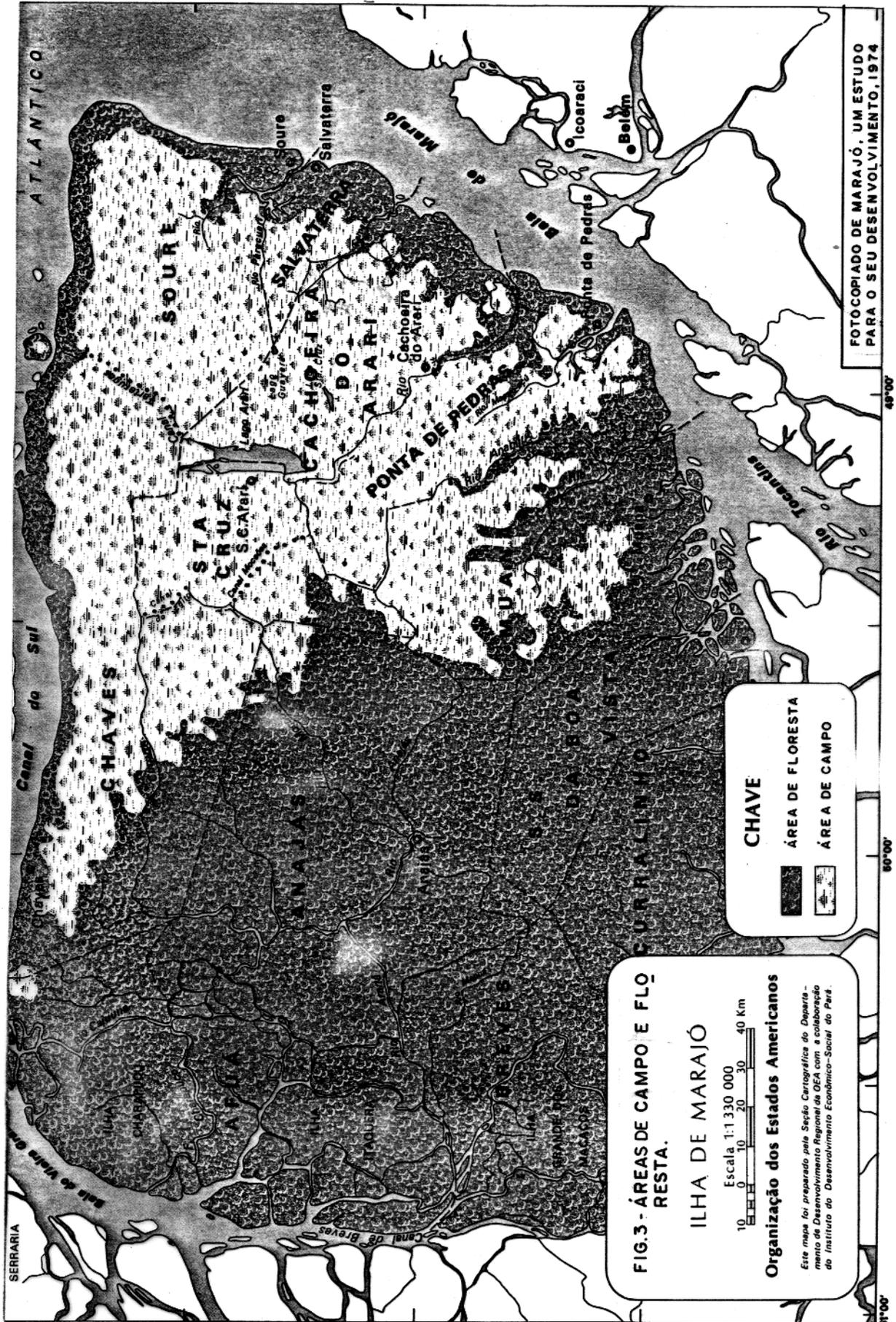


FIG. 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



**FIG.3 - ÁREAS DE CAMPO E FLORESTA.**  
**ILHA DE MARAJÓ**

Escala 1:1.330.000  
 0 10 20 30 40 Km  
**Organização dos Estados Americanos**  
 Este mapa foi preparado pela Seção Cartográfica do Departamento de Desenvolvimento Regional da OEA com a colaboração do Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará.

**CHAVE**

 **ÁREA DE FLORESTA**  
 **ÁREA DE CAMPO**

FOTOCOPIADO DE MARAJÓ, UM ESTUDO PARA O SEU DESENVOLVIMENTO, 1974

ATLANTICO

Canal do Sul

SERRARIA

CHAVES

STA. CRUZ S. CAPELO

SOURCE

Salvaterra

CACHOEIRA DO ARARI

PONTA DE PEDRAS

Salvaterra

Salvaterra

DA BOA VISTA

CURRAL CINHO

RIO TOCANTINS

Ilha de Pedras

Belém

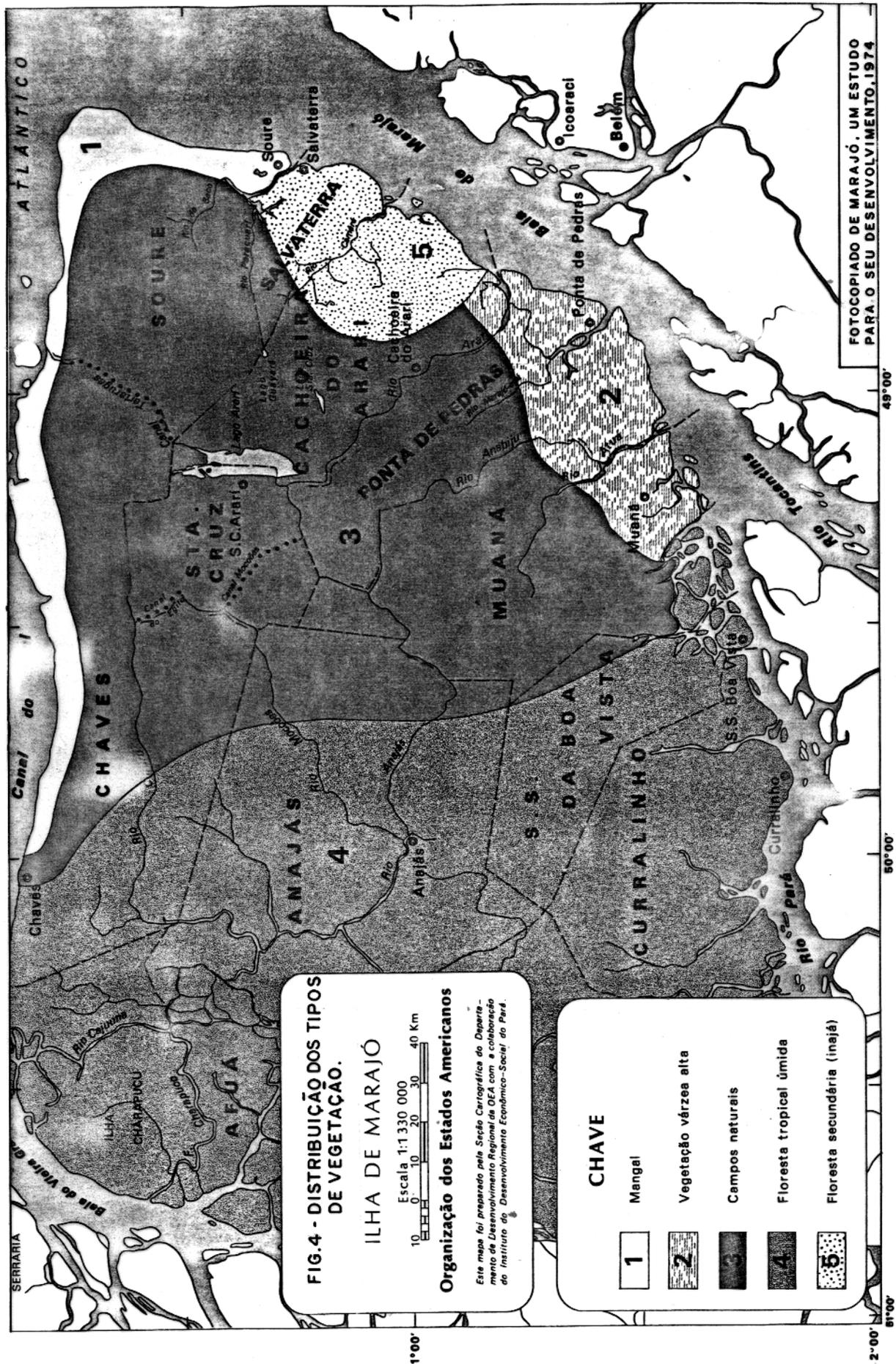
Ilha de Coaraci

2°00'

60°00'

48°00'

1°00'

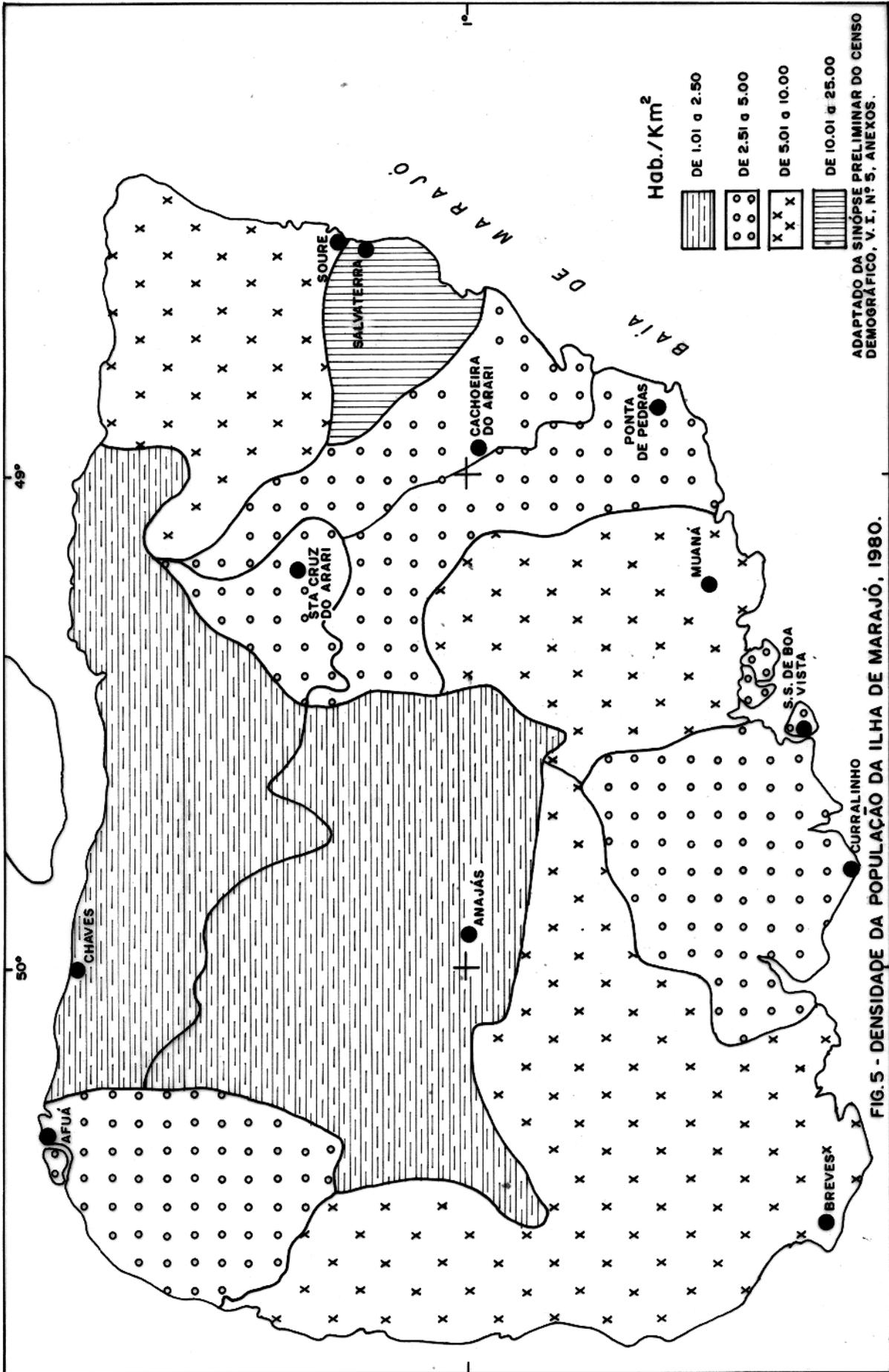


1°00'

2°00'

50°00'

49°00'



A região dos campos tinha em 1980 uma população de 90.573 habitantes (31,77% do total), com uma densidade demográfica de 3,88 hab/km<sup>2</sup> e com 67,97% numa condição rural (figura 5).

Devido às condições fisiográficas e climatológicas da parte oriental da Ilha (região dos campos), com seu ciclo constante de inundações e estiagens, tornam-se precárias, não só a atividade econômica mas também a própria vida nessas localidades. Como consequência disso a região dos campos é a única micro região do Pará que registrou depressão demográfica em 1980, pois sua taxa de crescimento anual não ultrapassa a 0,5, o que pode ser atribuído, principalmente, ao fluxo migratório para outras regiões.

#### 1.2.4 Climatologia e Vegetação

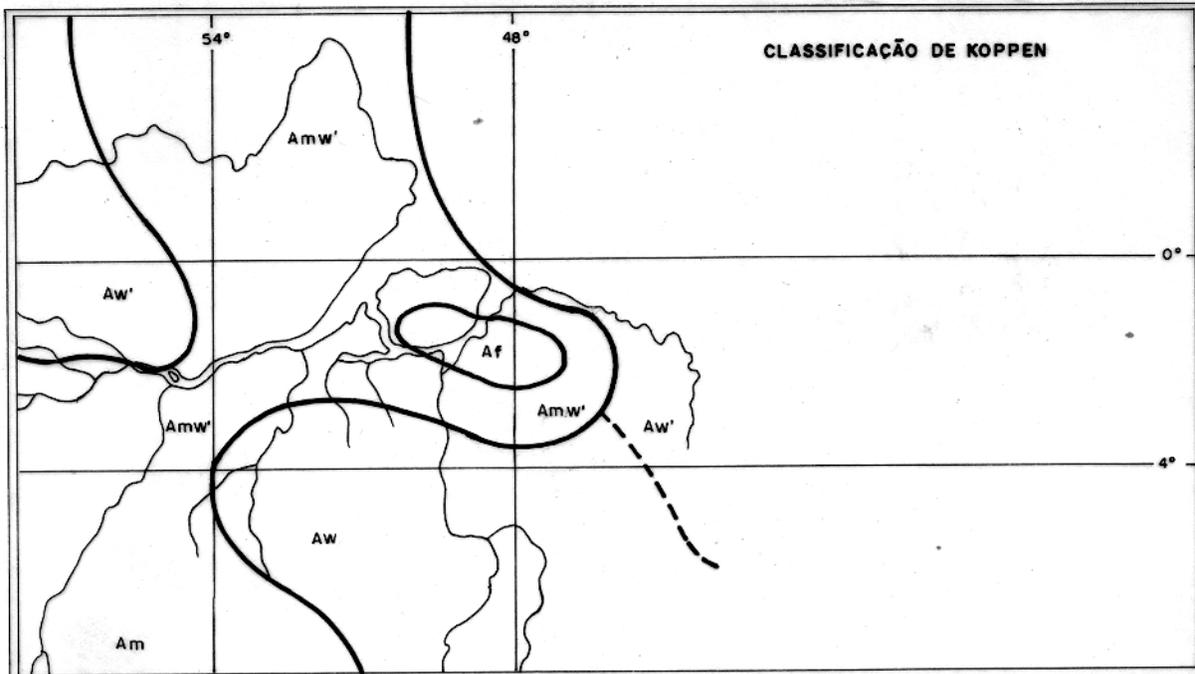
O clima é tropical úmido e segundo classificação de Köppen (figura 6A) situa-se entre os tipos AM (tropical quente, chuvoso em todas as estações), predominantemente na região oriental, e AF (tropical quente com excessivas chuvas sazonais, típico de monções), especialmente na região ocidental.

As temperaturas estáveis apresentam uma média geral de 27°C (figura 6B), com muito pouca variação mensal e anual, atingindo valores limites médios mensais entre 25°C a 29°C. A temperatura é levemente mais baixa na zona da mata do que na dos campos.

Na Ilha estão presentes basicamente quatro tipos de vegetação: floresta tropical densa, cerrado parque, formação pioneira tropical-aluvial campestre e formação pioneira marítima manguezal. Esta classificação pode ser vista com maiores detalhes no projeto Radam (1974).

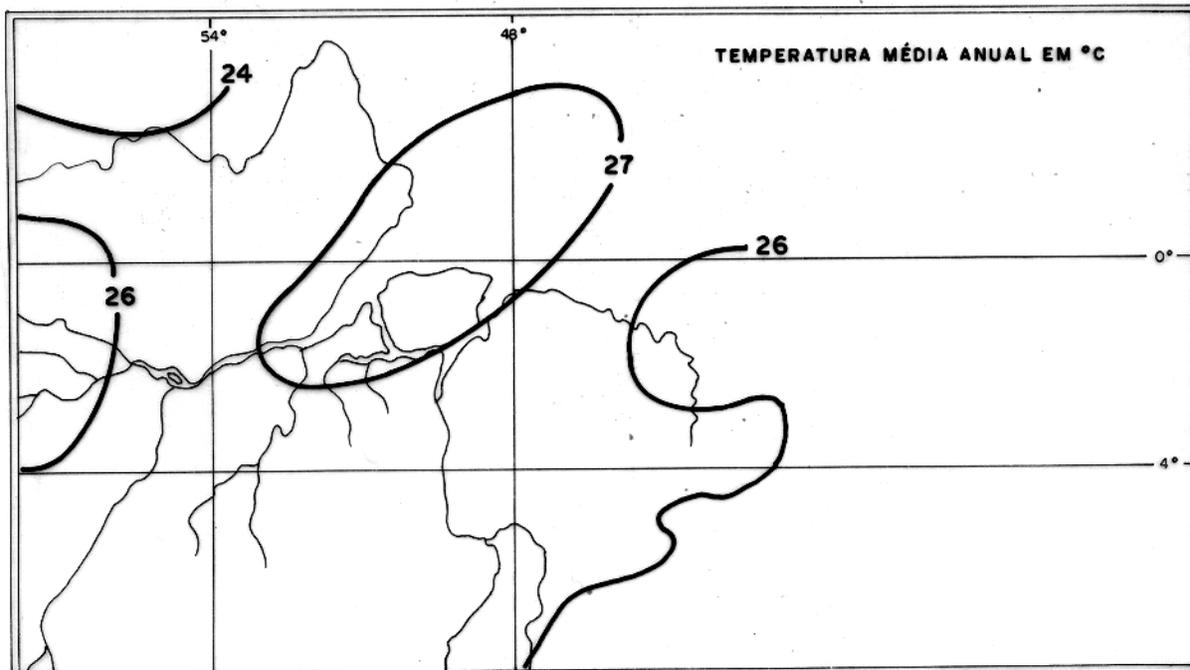
A figura 7 apresenta a relação existente entre os tipos climáticos e os tipos de vegetação presentes na Ilha.

A umidade relativa é muito alta e mantém-se acima dos 80% durante o ano. Em geral, a umidade relativa é menor na zona dos campos que na zona da mata. Nota-se a influência da vegetação, pela maior precipitação na zona da mata.



**CLIMAS** FIG. 6a - TIPOS DE CLIMA SEGUNDO KOPPEN, DA ÁREA EM ESTUDO.

Af - Tropical de floresta  
 Amw' | Distribuições entre Am e Aw com o valor w' correspondendo  
 Aw' | as maiores quedas pluviométricas processadas no outono  
 Am - Tipo monção  
 Aw - Tipo savanas tropicais



ADAPTADO DO ATLAS CLIMATOLÓGICO DO BRASIL IN PROJETO RADAM (1974)

**FIG. 6b - TEMPERATURAS MÉDIAS ANUAIS PARA A ÁREA EM ESTUDO.**

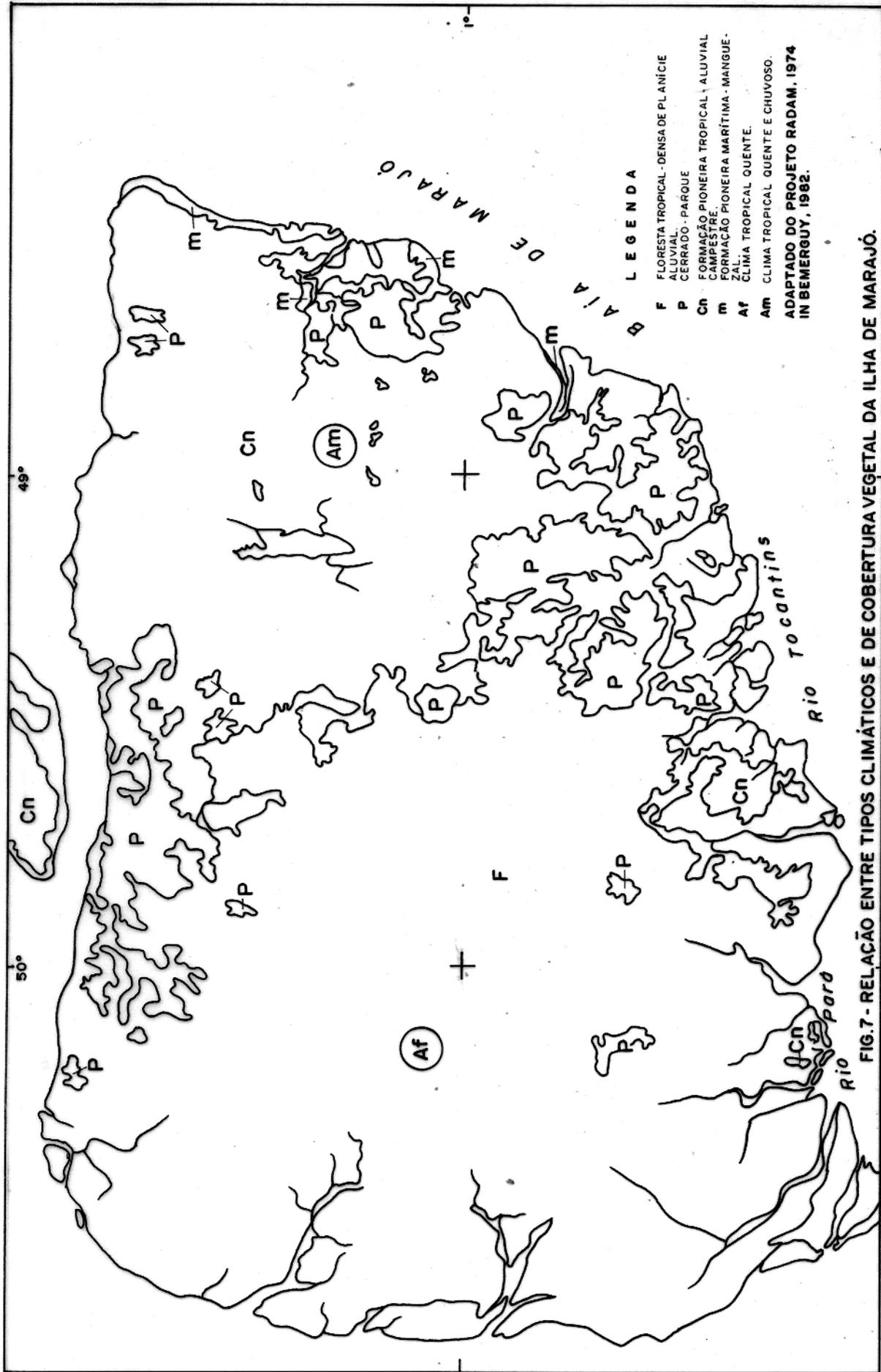


FIG. 7 - RELAÇÃO ENTRE TIPOS CLIMÁTICOS E DE COBERTURA VEGETAL DA ILHA DE MARAJÓ.

As chuvas distribuem-se desigualmente na Ilha, variando de 2.300 a mais de 4.000mm por ano, onde a região dos campos apresenta os índices médios de precipitação e evaporação de 2.700 mm/ano e 1.600 mm/ano, respectivamente. Na floresta, os índices são de 2.960 mm/ano e 650 mm/ano, respectivamente (figura 8).

Há uma estação chuvosa de cinco meses, de fevereiro a junho, onde ocorrem de 80 a 90% das chuvas. Esse período é seguido de outra de transição de dois meses, julho a agosto, de uma estação seca de quatro meses onde praticamente não chove, e de um outro período de transição de um mês. Em fevereiro, março e abril ocorre cerca de 50% da precipitação anual, enquanto que, somente em março ocorre 20% do total/ano (figura 9).

#### 1.2.5 Principais Atividades Econômicas da Região

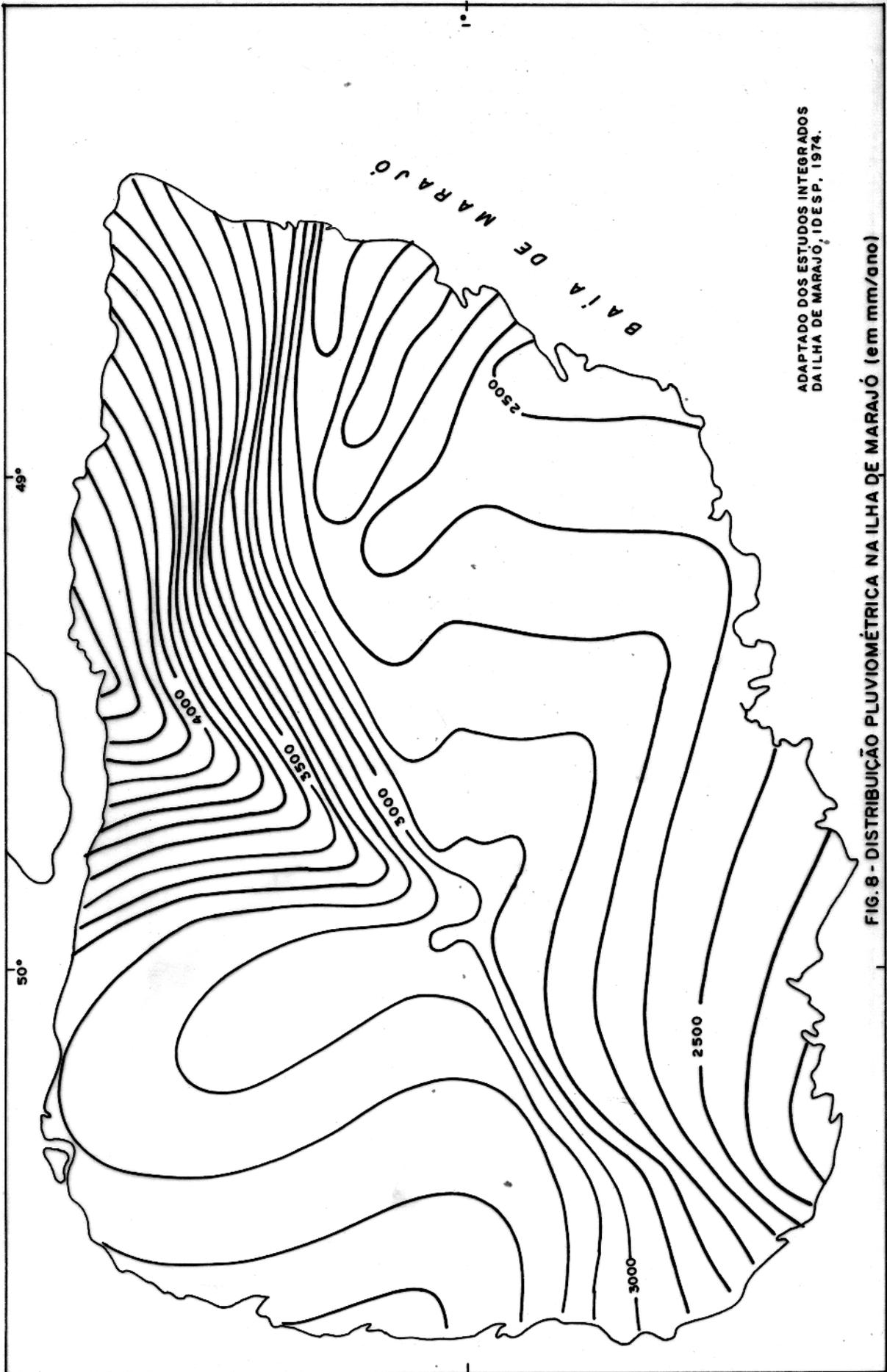
##### 1. Setor Pecuário:

A produção pecuária é a principal atividade econômica da Ilha.

A população bovina atingiu em 1980 cerca de 469.000 cabeças, das quais mais de 90% se encontra na parte oriental da Ilha. Além de bovinos, existia em 1980 uma população de 155.000 bufalinos.

Em termos relativos, Marajó tinha, nesse ano, 16 e 74% das populações bovinas e bufalinas do Pará, respectivamente, sendo que no total, tinha 624.000 cabeças de gado. Além da produção bovina e bufalina, são importantes também (segundo o mesmo censo): eqüino (45.000 unidades, com 99% na região dos campos), suínos (262.000 unidades, com 51% nos campos), caprinos (21.000 unidades, com 99% nos campos), ovinos (26.000 unidades, com 98% nos campos), aves (476.000 unidades, com 25% nos campos).

Foram produzidos também: 3.300 litros de leite (55% nos campos), 804.000 dúzias de ovos (27% nos campos) e 3.700 kg de mel de abelha (100% nos campos) (IBGE, 1979a,b).



ADAPTADO DOS ESTUDOS INTEGRADOS  
DA ILHA DE MARAJÓ, IDESP, 1974.

FIG. 8 - DISTRIBUIÇÃO PLUVIOMÉTRICA NA ILHA DE MARAJÓ (em mm/ano)

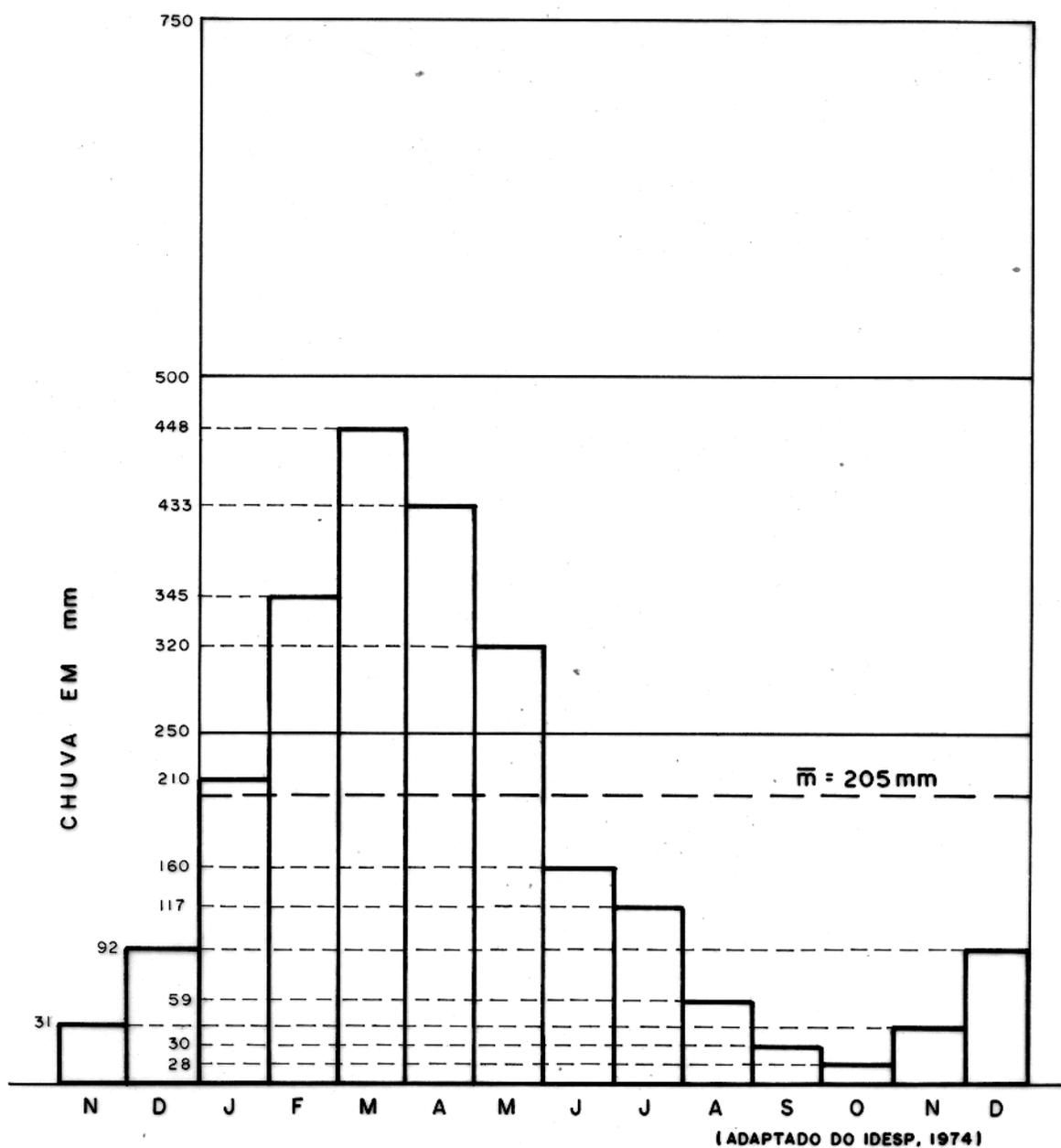


FIG. 9 - REGIME DE CHUVAS DA ILHA DE MARAJÓ - CACHOEIRA DO ARARI. (23 ANOS - 50 a 73)

## 2. Setor Extrativo Vegetal:

A parte ocidental de Marajó, totalmente coberta de floresta e recoberta por cursos naturais de água, é a principal fonte de madeira extraída na Ilha.

A participação de Marajó na produção de madeira no Estado do Pará aumentou significativamente nos últimos anos. Outros produtos de importância neste setor são a borracha, sementes e goma (produtos da seringueira).

## 3. Setor Pesca:

Os habitantes de Marajó têm-se dedicado a pesca oceânica, lacustre e fluvial. A pesca concentra-se em duas regiões:

1. Lago Arari, onde a pesca é lacustre.
2. Região Soure-Salvaterra, onde predomina a pesca fluvial e oceânica.

Grande parte da produção pesqueira de Marajó é consumida internamente.

## 4. Setor Agrícola:

A produção agrícola de Marajó ocupa o quarto lugar em valor depois da pecuária, da extração vegetal e da pesca. Os produtos mais importantes são o arroz, cana de açúcar e a mandioca, nessa ordem. A produção de feijão e milho é baixa, comparada com os outros produtos.

São produtos de importância entre as culturas permanentes: côco da baía, manga, tangerina (nos campos), limão, pimenta do reino (na floresta), banana, cacau, laranja (em ambas as partes).

Entre as culturas temporárias são importantes: abacaxi, malva, tomate (nos campos), arroz em casca, fumo e juta (na floresta), batata doce, cana de açúcar, feijão, mandioca, melancia, milho (em ambas as partes).

A produção agrícola para comercialização é pequena, principalmente por causa da pobreza dos solos disponíveis.

## 5. Potencialidade Turística:

Por sua cerâmica pré-colombiana, seu artesanato e seu folclóre, Marajó apresenta uma potencialidade turística ainda não totalmente explorada.

### 1.3 Geologia da Área

#### 1.3.1 Generalidades

A Ilha de Marajó faz parte da bacia sedimentar da Foz do Rio Amazonas, a qual compreende uma parte emersa, conhecida sob o nome de Bacia de Marajó, e uma parte situada na plataforma continental. Esta bacia é constituída de um espesso pacote sedimentar neocretáceo e cenozóico que ultrapassa 5.000m de espessura, sobre um embasamento cristalino granito-gnáissico. A coluna estratigráfica completa pode ser consultada em Schaller et alii (1974).

#### 1.3.2 Estratigrafia

Os estudos estratigráficos deste trabalho serão centralizados nos horizontes com profundidades de interesse hidrogeológico, notadamente as camadas superiores do espesso pacote sedimentar, isto é, as relacionadas primordialmente ao Grupo Pará e as camadas superiores da Formação Marajó (figura 10). A razão disto é a inviabilidade sócio-econômica atual da região, que impossibilita a perfuração de poços profundos para a captação de águas subterrâneas. Isto deve-se à falta de verbas para fazer obras para o abastecimento da população, ao pouco interesse das autoridades em solucionar este problema, às dificuldades que o clima impõe, às condições gerais da Ilha, e principalmente, à falta de recursos econômicos por parte dos pequenos e médios proprietários, que são os mais necessitados deste tipo de obras. Além disso, os dados das SEVs realizadas pelo IDESP e NCGG no Marajó foram obtidos com aberturas AB de eletrodos de envio de

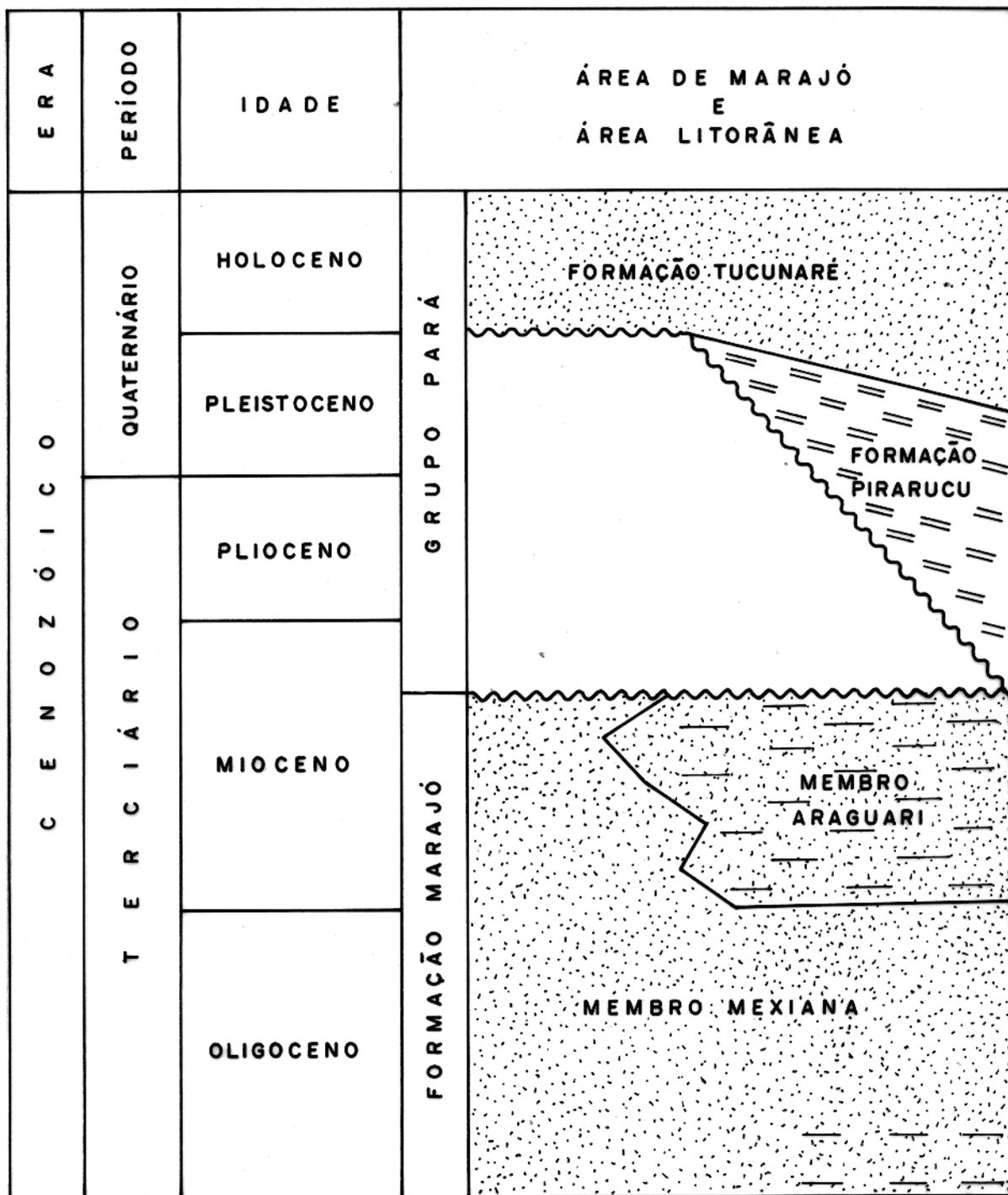


FIG. 10 - PARTE DA COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA SEDIMENTAR DA FOZ DO RIO AMAZONAS (MODIFICADO DE SCHALLER ET ALII, 1974)

corrente de no máximo 1.000m, as quais não atingem grandes profundidades.

1. Formação Marajó: relacionada com os clásticos terciários que ocorrem em toda a área de Marajó e ao longo do litoral do Amapá e do Pará. Sobrepõe-se concordantemente aos clásticos da Formação Limoeiro e sotopõe-se discordantemente aos clásticos do Grupo Pará, contato este que pode ser localmente erosional. Os componentes básicos desta formação são arenitos argilosos e folhelhos.

Em direção à plataforma continental, estes clásticos gradam lateralmente para uma espessa seqüência de carbonatos, designados de Formação Amapá.

Variações litológicas permitem a subdivisão de formação em quatro membros: Afuá, Cururú, Mexiana e Aragarí. Os membros Afuá e Cururú estão fora da área de interesse deste trabalho por se encontrarem muito profundos (a mais de 1.500m). O membro Aragarí, de ocorrência mais restrita, desenvolve-se na parte setentrional da Ilha de Marajó e daí para o norte e, por isso mesmo, também não interessa diretamente aos fins propostos neste trabalho.

O membro Mexiana é formado por arenitos friáveis, finos e grosseiros, em parte glauconíticos, localmente calcíferos com intercalações locais de folhelhos e argilitos cinzentos piritosos. Em relação aos estudos hidrogeológicos, este último membro é o mais interessante, sendo aquele que pode estar relacionado com o horizonte resistivo profundo (profundidades maiores que 50 m), presente em toda a Ilha, como se verá mais adiante.

Toda a seção sedimentar da Formação Marajó, principalmente aquela dos membros Afuá e Cururú, é pobre em microfósseis. O membro Mexiana é de distribuição cronoestratigráfica mais ampla, do Eoceno ao Mioceno Inferior.

2. Grupo Pará: corresponde aos clásticos de origem fluvial e parálica sobre o continente, do Mioceno ao Holoceno, que ocorrem na embocadura do Rio Amazonas e se estendem sobre a plataforma continental norte brasileiro do Pará e Amapá. É subdividida em duas unidades litológicas dominantes, uma argilosa (Formação Pirarucu) e outra arenosa (Formação Tucunaré).

1. A Formação Pirarucu é a seção pelítica do Grupo Pará. Constitui-se de folhelhos higroscópicos cinza-esverdeados com intercalações irregulares de camadas de areia grosseira e raríssimos leitos carbonáticos. Associados a esta litologia básica ocorrem ainda agregados de argila verde-oliva escura, glauconíticos. Em sua base é marcante a ocorrência de seixos de folhelhos.

2. A Formação Tucunaré é composta de areia amarelada, quartzosa, subangular, muito grossa e granular, de seleção moderada. Disseminados, podem ocorrer raros grãos de fragmentos de rochas, sílex e feldspatos. Existem restos vegetais semi-carbonizados e raras conchas de moluscos, ocasionais espículas de equinóides e escafóides. Leitos argilosos são raros neste intervalo. Fragmentos de dolomita parda são observados através de toda a unidade.

O Grupo Pará marca a predominância dos clásticos sobre outros tipos de sedimentos. A sua base trunca os sedimentos das Formações Marajó e Amapá, que lhe são sotopostos. Nesta unidade tendem a desaparecer os crescimentos carbonáticos, contudo incipientes remanescentes são identificados pela análise geológica das seções sísmicas. Em virtude do grande influxo clástico, nota-se que o processo de escavação e atulhamento se acentuam em diferentes níveis da unidade e, respectivamente, ao longo de suas charneiras. Devido ao fato da taxa de fornecimento sedimentar ser maior do que a razão de subsidência, a frequência de "paleocanions" torna-se marcante. Em termos de análise de velocidade sísmica e comportamento estrutural, pode-se prever uma sequência clástica, em grande porte formada de pacotes

de folhelhos com turbiditos que exibem estruturas argi-  
locinéticas. Sobreposta a estes observa-se uma seção  
provavelmente constituída de alternâncias de folhelhos  
e meios, deformados por estruturas do tipo "roll-over".  
Para o oeste a unidade adelgaça-se rapidamente sobre  
o continente, sendo sua distribuição concentrada nos  
vales pleistocênicos do Rio Amazonas. Na direção leste  
atinge espessuras da ordem de 2.000m. Atribui-se uma  
idade miocênica a holocênica para os sedimentos desta  
unidade. A sua parte superior mostra-se estéril em mi-  
crofósseis diagnósticos. Na parte basal da Formação Tu-  
cunaré e através de toda a seção da Formação Pirarucu  
a situação se inverte, observando-se flora abundante  
e fauna marinha preservada.

As intercalações irregulares de camadas de areia  
grossa da Formação Pirarucu e as lentes de areia da  
Formação Tucunaré formam bons reservatórios naturais  
de água subterrânea. Os aquíferos encontrados na re-  
gião sul e sudeste da região dos campos naturais são  
deste tipo. As perfurações aí realizadas evidenciam a  
presença de arenitos ferruginosos lateríticos denomina-  
dos de Grês do Pará, característicos deste grupo.

A Formação Barreiras, muito comum no litoral brasilei-  
ro, especialmente no nordeste, localiza-se sobre a vasta superfí-  
cie em ambas as margens da porção oriental da Sineclise do Amazo-  
nas (Projeto Radam, 1974). Sua porção aflorante é do terciário  
Superior, sua litologia é de arenitos, finos, argilosos, silti-  
tos, arenitos grossos e conglomeráticos, camadas argilosas e bau-  
xíticas, arenitos quartzosos, feldspáticos ou não, com cimento  
limonítico em porção variável. Tais características, muito seme-  
lhantes às do Grupo Pará, incluindo-se aí a coindidência geográ-  
fica entre eles, levam a supor a existência de uma correlação en-  
tre ambos. Daí as dúvidas sobre a denominação correta dos terre-  
nos aflorantes do sul e sudeste da Ilha de Marajó. Fazem-se ne-  
cessários, entretanto, estudos mais detalhados para a elucidação  
deste fato (Bemerguy, comunicação oral, 1983).

#### 1.4.1 Relevo

O relevo é quase plano, levemente ondulado com níveis muito-baixos. É constituído por duas unidades morfoestruturais que apresentam três feições geomorfológicas distintas e abrangem dois domínios morfoclimáticos (Projeto Radam, 1974).

1. Planalto Rebaixado da Amazônia (do Baixo Amazonas) ,  
abrange o centro sul da Ilha de Marajó, limitando nitidamente a este com a planície colmatada e a oeste com os terraços e áreas em colmatagem. A cobertura vegetal é a floresta densa. A superfície é conservada sendo cortada pela intrincada rede de drenagem constituída de furos e igarapés. Toda a extensão desta unidade está incluída no domínio morfoclimático dos planaltos amazônicos rebaixados e dissecados das áreas colinosas e planícies revestidas de floresta densa.
2. Planície Amazônica: é uma faixa nas duas margens do rio Amazonas alargando-se na região da Foz nas inúmeras ilhas, inclusive Marajó. Tem características bem distintas não comparáveis a nenhuma outra área da planície no que diz respeito à particularidade e diversidade de feições que apresenta. Um emaranhado de canais recentes, paleocanais, furos, igarapés, paranás, meandros abandonados e lagos marcam um complexo mixto de terra e água em evolução atual. A planícies tem partes sujeitas a inundações periódicas, quer seja de chuvas, das cheias dos rios ou de influência da maré. A inundação é um dos elementos que possibilita a sedimentação recente de uma grande área, contribuindo também para o desenvolvimento de novas formas de vegetação. Os canais marcam a orientação da sedimentação e os diques marginais são os reflexos do último evento de todo um processo de sedimentação. Algumas áreas, alagadas geralmente, são as que concentram maior número de lagoas. Estas não possuem uma rede de canais para promover o escoamento, e têm cobertura gramínea rala. As áreas da Planície Amazônica já colmatadas por sedimentos holocênicos têm, em Marajó, sua maior extensão, tendo a planície fluvial colmatada inúmeras lagoas sujeitas a

inundações fluviais. Nos vales que cortam a planície nota-se uma vegetação arbustiva, enquanto na maior extensão predomina uma vegetação de gramíneas. O Lago Arari tem áreas bem marcadas de influência dando origem a zonas de "Slikke" e "Schorre" alinhadas e nítidas. Os paleocanais ao norte de Marajó têm formas de meandros e são identificados também na Ilha Mexiana. A faixa oeste de Marajó apresenta um nível de baixos terraços e áreas em colmatagem cortadas por furos e igarapés. Destacam-se, ainda, nesta planície, numerosos lagos de barragem. Esta faixa da planície, amazônica já é uma área de terrenos fixados que possibilita a instalação de floresta densa. Desta forma, dois são os domínios coincidentes com a larga faixa de Planície Amazônica:

1. Domínio morfoclimático das planícies inundáveis recobertas por campos.
2. Domínio morfoclimático dos planaltos amazônicos ou dissecados, das áreas colinosas e planícies revestidas por floresta densa (figura 11).

A evolução geomorfológica da Planície Amazônica, na região de Marajó, está relacionada com a subsidência da fossa Marajoara e da transgressão Flandriana.

O Projeto Radam (1974) apresenta uma visão mais específica da geomorfologia da região dos campos da Ilha de Marajó, baseada na presença de formas erosivas e formas de acumulação (figura 12).

#### 1. Formas Erosivas:

1. Superfície Pediplanadas: aplainamentos em retomada de erosão elaborados geralmente em rochas sedimentares. São parcialmente recobertos por depósitos inconsolidados.

#### 2. Formas de Acumulação:

1. Planície Fluviomarinha: com rias e mangues.
2. Planícies Fluviolacustres: áreas complexas de acumulação fluviolacustres, periodicamente inundáveis,

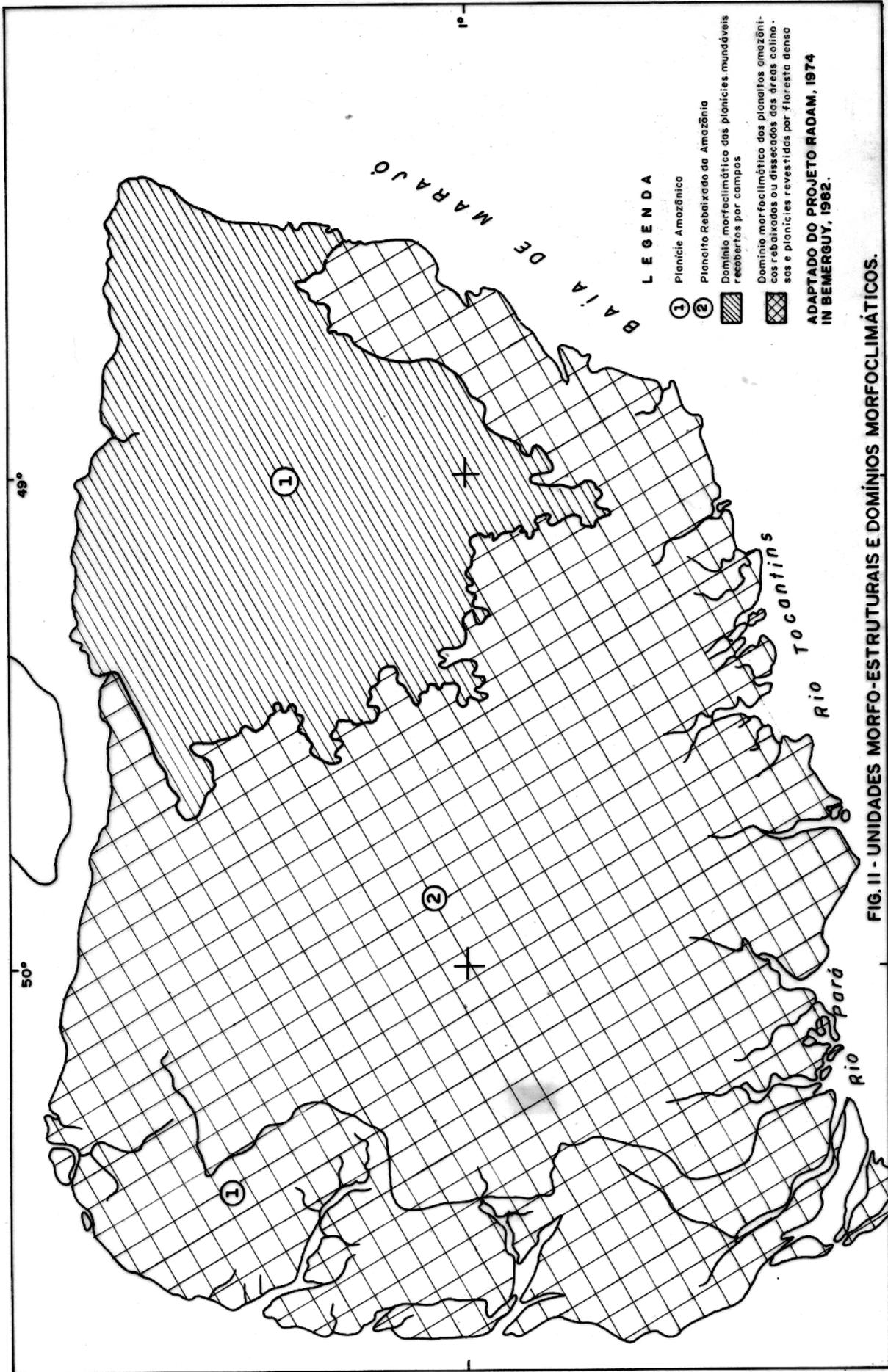
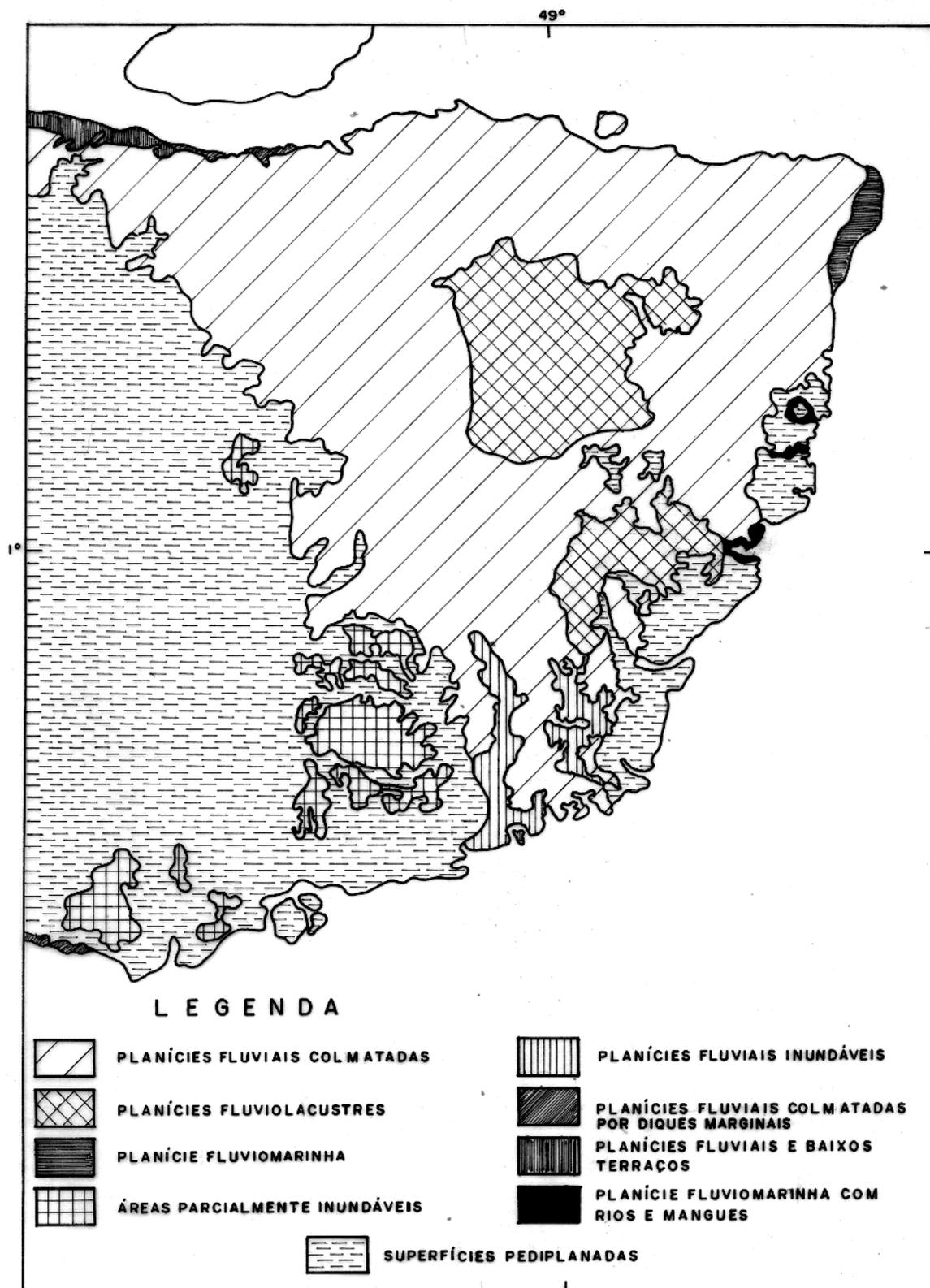


FIG. II - UNIDADES MORFO-ESTRUTURAIS E DOMÍNIOS MORFOCLIMÁTICOS.



- ADAPTADO DO MAPA GEOMORFOLÓGICO DO PROJETO RADAM (1974)

**FIG.12- MAPA GEOMORFOLÓGICO DA ILHA DE MARAJÓ (Baseado na presença de formas erosivas e de acumulação).**

com paleocanais anastomosados, numerosos lagos e áreas permanentemente alagadas.

3. Planícies Fluviais Colmatadas: planícies fluviais colmatadas por sedimentos holocênicos, sujeitas a inundações fluviais. Localmente apresenta vales de fundo chato entulhados por aluviões devido à incompetência da drenagem.
4. Planícies Fluviais Inundáveis: extensas planícies de inundação periódica, cobertas por aluviões holocênicos, fluviais e lacustres, fixadas progressivamente por vegetação pioneira. São planícies com drenagem do tipo amazônico: furos, paranás, igarapés, meandros abandonados, diques e lagos.
5. Planícies Fluviais e Baixos Terraços: baixos e áreas em colmatagem, com lagos de barragem, sujeitos a inundações periódicas.
6. Áreas Parcialmente Inundáveis: depressões planas, arenosas, inundáveis nas partes mais baixas e cobertas por vegetação rasteira. São possivelmente "paleopraias", localizadas em áreas de dispersão de drenagem.
7. Planícies Fluviais Colmatadas por diques marginais, parcialmente inundáveis com acréscimos periódicos de aluviões.
8. Planície Fluviomarinha: área complexa de depósitos fluviais recentes, sujeitos a inundações periódicas com cordões arenosos marinhos.

A região dos campos da Ilha de Marajó apresenta uma topografia suave que no máximo, atinge duas dezenas de metros. Em geral, pode-se dizer que a região da mata é mais alta e melhor drenada que a região dos campos.

#### 1.4.2 Drenagem

Segundo Bermerguy (1982), a Ilha de Marajó, que está situada em pleno estuário do Rio Amazonas, apresenta um sistema hidrográfico composto por inúmeros rios sob influência da ma-

ré. Estes constituem bacias hidrográficas interligadas, entre as quais a mais importante é a do Rio Arari, não só pela sua extensão e grandeza do volume que drena, como também por sua importância econômica.

A rede de drenagem apresenta dois arranjos distintos:

1. A oeste (região da mata fechada) é densa e ativa, caracterizada por um entrelaçado de furos e igarapés.
2. A leste (região dos campos naturais) a rede de drenagem é esparsa, constituída por rios em sua maioria de caráter temporário e inúmeros lagos (anexo 1).

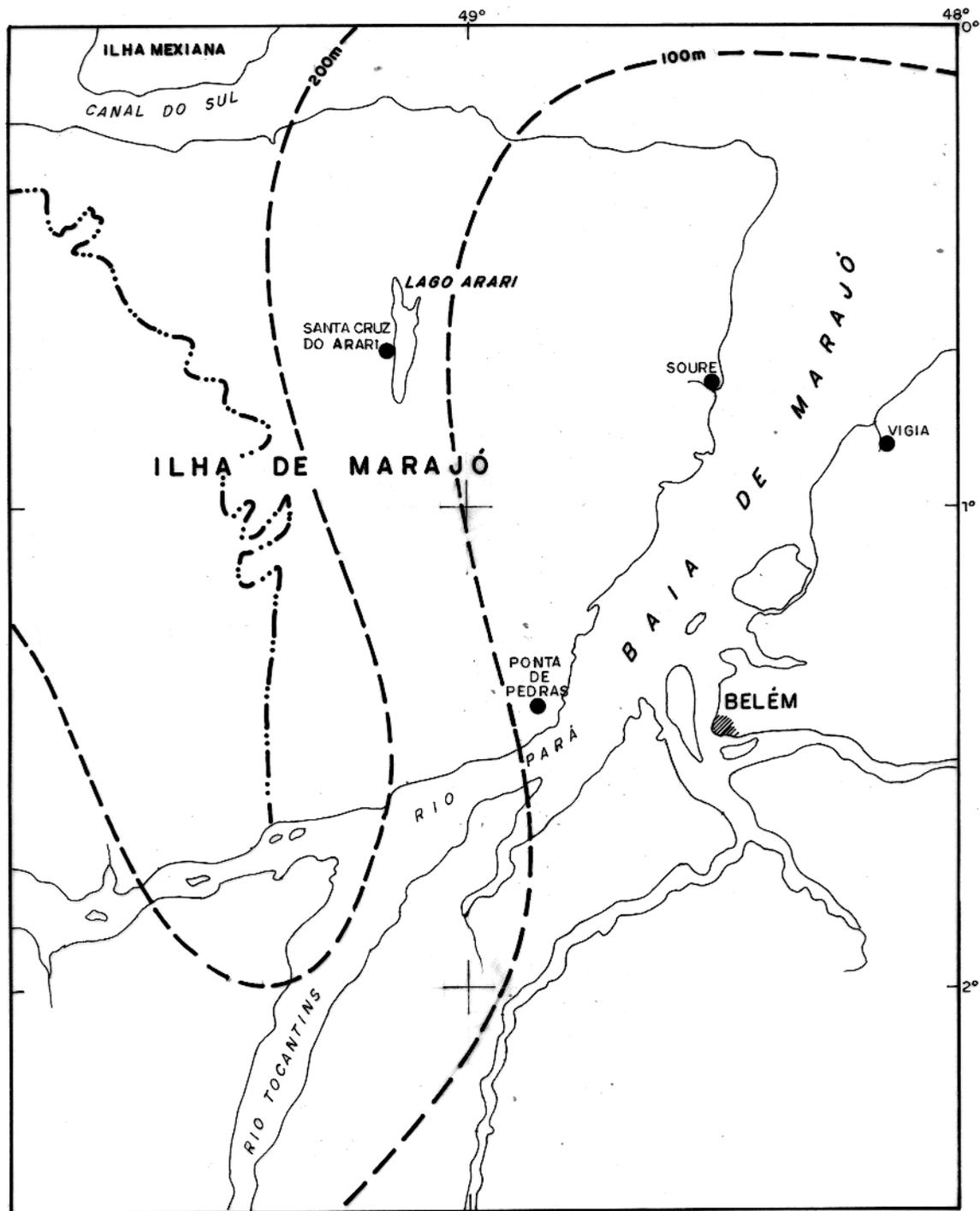
No interior da Ilha, destaca-se o Lago Arari com uma área de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, funcionando como principal receptor da precipitação fluvial. Esse conjunto hidrográfico sofre a influência marinha, onde as amplitudes das marés variam de 3,5 a 5,0m. A ação das marés é tão intensa que provoca a inversão de corrente nos rios e nas baías. A influência das marés nos canais fluviais é um fenômeno natural, causando uma redução da capacidade do canal e não há vazante efetiva durante metade do tempo. Isso naturalmente causa represamento da descarga e aumenta o nível das águas da área inundada.

## 1.5. Hidrogeologia

### 1.5.1 Aqüíferos de Média a Elevadas Profundidades

Porsani (1982), destacou que na região dos campos naturais, o Grupo Pará, que corresponde ao topo da espessa coluna sedimentar, atinge uma profundidade de 200m (figura 13). A formação Tucunaré (pertencente a este grupo), de natureza clástica predominantemente arenosa, é propícia ao armazenamento de água subterrânea, se bem que, esta nem sempre é de boa qualidade, conforme mostram os diferentes estudos geofísicos realizados na região.

Segundo o relatório do IDESP (1974), na superfície da Ilha encontram-se areias, siltes, argilas e lateritas, da forma alternada indo da superfície até uma profundidade de 100m. A



**LEGENDA**

- · — LIMITE APROXIMADO DA REGIÃO DE CAMPOS
- - - LINHAS DE IGUAL ESPESSURA

**FIG. 13- ISÓPACAS DO GRUPO PARÁ. ADAPTADO DE SCHALLER ET ALII, 1971, IN PORSANI, 1982.**

Ilha possui aquíferos livres e confinados. O nível hidrostático médio do aquífero livre estaria a cerca de três metros da superfície, com uma amplitude de variação de até 4m, enquanto que nos aquíferos confinados, situados na região dos campos naturais, onde ocorre predominância de terrenos argilosos superficiais e impermeáveis, a profundidades da água subterrânea é de cerca de 15m. A realimentação da água subterrânea é de origem fluvial, processando-se por infiltração direta e/ou diferencial. As águas subterrâneas apresentam baixo gradiente hidráulico e pequena velocidade de escoamento, em razão da topografia ser baixa e homogênea.

Segundo Porsani (1982), a Formação Marajó, estratigraficamente abaixo do Grupo Pará, poderia ter sua porção superior atingida na profundidade de uma ou mais centenas de metros. Ainda que não exista na região infraestrutura adequada ao aproveitamento da água subterrânea a uma profundidade dessa ordem, sua captação representa uma alternativa que deve ser levada em conta. Os arenitos que constituem esta formação têm a litologia mais promissora ao armazenamento de água, se bem que, não se tenha conhecimento da sua qualidade. O relatório do IDESP (1974), afirma que existe um substrato resistivo a uma profundidade de 100 ou mais metros, o qual está presente em toda a Ilha, podendo estar associado ao aquífero da Formação Marajó.

#### 1.5.2 Aquíferos de Pequena Profundidade

1. Paleocanais: Porsani (1982) relata que as regiões central, noroeste, norte e nordeste aos campos naturais da Ilha de Marajó, são recobertas por sedimentos quaternários predominantemente argilosos. Presente nessa matriz argilosa, encontra-se um grande número de estruturas geomorfológicas facilmente observadas, as quais, supostamente, foram modeladas na superfície por eventos geológicos recentes (anexo 1). Estas formas meandranes e bifurcadas apresentam grandes semelhanças morfológicas com os atuais cursos de água, correspondendo certamente a antigos canais de drenagem.

Segundo Bemerguy (1982), os paleocanais são consti-

tuídos por areias texturalmente maduras de granulação média e fina, bem selecionadas. Seus sedimentos foram depositados em ambiente fluvial de média e alta energia, sugerindo um complexo fluvial típico de bacia de estuário. A predominância de areias finas e bem selecionadas indica bons índices de porosidade e permeabilidade, o que torna os corpos arenosos promissores ao armazenamento de águas subterrâneas. Nessas áreas, a qualidade de água atinge melhores índices de potabilidade. As características texturais das areias demonstram que eles constituem bons horizontes aquíferos, devendo servir de controle-guia para a prospecção de água subterrânea próxima à superfície.

2. Paleopraias (Linhas de Praia): Segundo Porsani (1982) existem estruturas lineares subparalelas às linhas da costa no extremo nordeste da Ilha e às margens do Lago Arari (anexo 1), que correspondem provavelmente a sucessivas margens abandonadas no processo sedimentar. Estas estruturas refletem ambientes de sedimentação com maior energia de deposição dos sedimentos, os quais podem estar associados a materiais arenosos capazes de armazenar água doce. A natureza geológica dessas estruturas lhes confere boas condições potenciais para o armazenamento de água, e podem, portanto, ser consideradas como de grande interesse hidrogeológico para a região.

#### 1.6 O Problema Hídrico da Região dos Campos de Marajó

Embora sempre tenha sido uma das áreas mais importantes do Pará, a Ilha de Marajó ainda não pode oferecer ao Estado os recursos naturais potencialmente contidos em seus campos e matas. Marajó defronta-se com sérios problemas na manutenção de seu desenvolvimento econômico e social, devido principalmente à falta de infraestrutura para viabilização de seus recursos hídricos, o que constitui um dos maiores entraves ao estabelecimento da população e ao desenvolvimento de suas atividades econômicas.

O regime hidrológico da Ilha comporta-se da seguinte

te maneira: sua parte leste fica anualmente inundada em 70% de sua superfície (figura 1). Isso é devido aos seguintes fatos: as fortes chuvas na primeira metade do ano; a topografia geral da Ilha, que é muito plana; às marés que fazem mais demorada a drenagem natural como freio ao escoamento; o sistema de drenagem pouco denso e muito influenciado pela topografia completamente plana; aos solos impermeáveis, os quais são de origem sedimentar, em geral argilosos.

Depois de um período de transição de dois a três meses, devido à pouca chuva, e à alta evapotranspiração, ocorre o fenômeno contrário, a seca (as estações chuvosas e seca chamam-se "inverno" e "verão" apesar de não coincidirem com aquelas estações do ano, no sul do país), onde a maioria dos mananciais de águas superficiais, na região dos campos naturais, são esgotados. Por outro lado, grande parte dos recursos de águas subterrâneas possuem elevado teor em sais dissolvidos, sobretudo na parte central da região dos campos naturais.

Como pode ser verificado pelo apresentado anteriormente, a parte leste de Marajó é prejudicada pelo duplo problema de secas e inundações, que afetam não somente a pecuária, mas também a agricultura, as vias de comunicação e as condições de vida, em geral, da população.

Grandes são os prejuízos infligidos à economia regional, causados especialmente pelas enormes perdas observadas anualmente na pecuária, já que, todos os anos cerca de 10% dos rebanhos da Ilha são vitimados durante as inundações, durante as secas e durante parte do período de transição (OEA, 1974).

Os meios de comunicação são marcadamente influenciados por este regime hidrológico. Ele torna quase impossível a existência de caminhos na maior parte da Ilha, existindo somente alguns na região leste. As inundações interrompem completamente toda comunicação terrestre e os únicos meios de transporte em terra são animais. Por outra parte, todos os rios são navegáveis e constituem a mais importante via de penetração. Durante o "inverno" as bacias se ligam podendo-se viajar mais facilmente de barco. No "verão" as marés tem efeito benéfico, ao permitir a navegação. Nesse sentido, é muito mais simples movimentar-se no "inverno" que no "verão", onde só é possível atravessar os

campos em veículos de rodas, entre os meses de novembro a janeiro. Dos campos de pouso, poucos são o suficientemente elevados para serem usados o ano inteiro.

Devido a estas características particulares de Marajó qualquer projeto de desenvolvimento econômico e social que se idealize para a mesma, deverá estar baseado necessariamente, num conhecimento profundo da hidrologia, a fim de se proceder ao controle das águas mediante drenagens para o problema da época de enchentes (saída muito cara, segundo estudos IDESP/OEA (Organização dos Estados Americanos) e, para a época de seca, a construção de açudes, represamento de pequenos meândros ou canais e perfuração de poços para extração de água subterrânea. A agropecuária e a população da região seriam os principais beneficiários desse tipo de obras.

Considera-se neste sentido, que o controle de água é condição imprescindível para o desenvolvimento desta parte da Ilha de Marajó.

#### 1.7. Qualidade das Águas Subterrâneas

A água de Marajó é usada principalmente para o abastecimento da população humana e pecuária. As cidades da Ilha utilizam, para seu abastecimento, água subterrânea captada de poços construídos pela FSESP (Fundação Serviço Especial de Saúde Pública). A maioria das fazendas situadas na parte oriental da Ilha utilizam para consumo doméstico, água subterrânea captada de poços escavados de pouca profundidade.

Essa água consumida pela população tem sua fonte em aquíferos geralmente contaminados sob o ponto de vista bacteriológico, ou mesmo apresentando um teor de sais que a torna inadequada ao consumo humano (Kobayashi, 1979).

Num trabalho da OEA (1974), são apresentadas três áreas de ocorrência de água subterrânea (figura 14), devendo notar-se que as áreas apresentadas, especialmente a 2 e 3, também possuem águas subterrâneas a menor profundidade da que foi indicada, águas essas que seriam, entretanto, salgadas e/ou salobras.

Em toda a porção leste dos campos naturais, a população se encontra principalmente nas partes do terreno topografi



camente mais elevadas (chamados "tesos" pelos habitantes e que as vezes coincidem com os paleocanais), onde a qualidade da água subterrânea utilizada para o consumo humano é superior àquela encontrada nas áreas adjacentes.

Porsani (1982), afirma que é bastante pequena a possibilidade de se encontrar água de boa qualidade a pequena profundidade na região dos campos naturais, fora dos paleocanais ou estruturas similares. Embora não satisfazendo as exigências de potabilidade da OMS e na falta de água de melhor qualidade, a água associada a essas estruturas pode ser aproveitada de forma satisfatória para o atendimento da população rural, ou com maior propriedade, pelos rebanhos, os quais aceitam água mesmo fracamente salgada.

Fora dos paleocanais, os sedimentos sílticos-argilosos são saturados de água salobra, talvez devido a suas baixas permeabilidades e à alta evaporação.

Segundo relatório do IDESP (1971-1972, 1974), a Ilha apresenta aquíferos livres, cujo nível hidrostático está em torno de 20m ou menos de profundidade, o que pode sugerir a possibilidade de se localizar água subterrânea a pouca profundidade. Este fato foi comprovado por registros de perfurações feitos por Piuci (1979) na sua área de trabalho, na região sul dos campos naturais. Em termos de qualidade, essas águas foram classificadas como "excelentes" para fins agrícolas.

Os diferentes trabalhos realizados na Ilha têm verificado que a maiores profundidades, entre 60 a 100m, os sedimentos não têm boa potencialidade hidrogeológica. Isso se deve ao fato de estarem saturados com água salgada, ou por existir grande quantidade de argila.

Porsani (1982), afirma que os altos custos inerentes à captação de água a grandes profundidades e as elevadas concentrações iônicas da água captada a 100m em certos locais da Ilha tornam inviável a exploração do aquífero profundo por parte dos pequenos e médios proprietários rurais. Estas são razões bastante fortes para se procurar alternativas mais adequadas para o abastecimento da população do interior dos campos, como, por exemplo, a exploração do aquífero presente nos paleocanais e estruturas similares.

Piuci e Fenzl (1978) afirmam que a influência das marés parece não atingir o quimismo das águas subterrâneas rasas, fato também verificado por Cutrim e Sauck (1978). Muitas dessas águas apresentam elevada acidez (pH 3,5 - 6,7) o que implica em restrições ao uso humano e agrícola. O ferro também se apresenta em concentrações de até 4,0 mg/litro, e a maioria dos seus teores estaria acima do padrão máximo exigido (0,3mg/litro) para uso humano, sendo um dos fatores mais limitantes para o uso geral dessas águas.

De acordo com Piuci (1978) o uso doméstico das águas de aquíferos rasos está limitado normalmente pelas seguintes características: pH ácido, ferro total muito alto, isentas de fluoretos, excesso de manganês e excesso de cloreto. O uso dessas águas subterrâneas na agricultura pode estar limitado em alguns locais onde se observa pH menor que 5,0, condutividades altas durante períodos de menor precipitação e altas percentagens de sódio (83 a 97%).

Nos finais dos períodos chuvosos essas águas subterrâneas são menos salinizadas. Por outro lado, nos períodos de pequenas precipitações até o início da estação chuvosa, o excesso de sais impede a potabilidade de várias dessas águas.

A avaliação qualitativa e quantitativa das águas subterrâneas é pois, de grande importância na solução do problema de abastecimento de água na Ilha de Marajó, tanto para a população como para a agropecuária.

#### 1.8 Estudos Geofísicos Anteriores

Estudos geofísicos objetivando o levantamento dos recursos de água subterrânea na porção leste da Ilha de Marajó foram realizados entre 1971 e 1981, por duas entidades: o IDESP e o NCGG.

1) O IDESP (1971-1974), dentro de um programa financiado pela SUDAM (Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia) e contando com a assessoria técnica da firma Geomineração S.A., orientou seu trabalho para localizar aquíferos associados a formações geológicas de grandes extensões. Os objetivos deste trabalho, na sua parte geofísica, eram obter conhecimentos sobre as características hidrogeológicas dos terrenos que constituem

essa parte da Ilha, com a finalidade de ter as informações necessárias para o inventário dos recursos de água e suas pesquisas de potencial disponível.

O trabalho consistia de uma campanha de prospecção elétrica numa área de  $16.325 \text{ km}^2$ , segundo uma malha de 4 a 5 km de espaçamento, recobrando quase toda a parte leste da Ilha; tendo-se projetado fazer no princípio, um total de 5.000 SEVs e alguns perfis de eletroresistividade, acompanhados por sondagens geológicas.

O método utilizado durante a campanha foi o quadri-polo Schlumberger, com uma linha de envio de corrente de, no máximo, 1.000m, sendo que na maioria das vezes, não era necessária uma linha com tal extensão. A localização dos pontos geográficos para a realização das SEVs era feita sobre fotos aéreas, já que não existem mapas de detalhe da região.

Tinha-se planejado também colocar a totalidade das informações concernentes aos problemas hidrogeológicos num suporte informático a fim de permitir o tratamento e interpretação dos dados através do computador.

Devido às grandes dificuldades experimentais durante o desenvolvimento dos trabalhos (chuvas, inundações, dificuldades de transporte, áreas de difícil acesso, etc.), o rendimento da campanha de prospecção geofísica diminuiu muito, sendo realizadas apenas 694 SEVs (anexo 2), além de 2 perfis de resistividade e 8 sondagens geológicas. Relatórios apresentando os serviços realizados em diferentes períodos foram entregues na época (Geominação (1971a, 1971b, 1973) IDESP (1971a, 1971b, 1971c, 1971d, 1971e, 1971-1972)). Ao mesmo tempo, a falta de recursos técnicos para a interpretação eficiente dos dados levou a que não fosse cumprido o objetivo inicial de tratamento e interpretação quantitativa dos mesmos, através do uso de computadores.

Os dados das SEVs foram apresentados em forma de curvas de sondagem, dispostos em papel duplo logarítmico. Nos casos de SEVs feitas sobre furos de sondagem geológica, a interpretação geofísica foi comparada com a seção registrada nesses furos. A partir desta comparação, foram apontadas classes de variações de resistividade para as unidades mais importantes, es-

colhendo-se 4 horizontes-guias de resistividade aparente, através de uma série de separações de eletrodos AB/2 (2, 40, 300 e 400m). Foram preparados mapas de curvas de iso-resistividade aparente para cada uma das separações-guias entre os eletrodos, apoiando-se nos mesmos a interpretação hidrogeológica. Os perfis elétricos foram trabalhados usando-se 6 separações diferentes entre os eletrodos (2, 40, 100, 200, 300 e 400m). Estes resultados aparecem num relatório final apresentado pela companhia Geominação S.A. (1973), onde são ressaltadas três regiões geoeletricas distintas, como componentes da área de estudo:

1. Na parte leste e sudeste da área, encontram-se terrenos resistivos próximos à superfície, os quais estão associados às formações arenosas (possível fonte de água subterrânea de pequena e média profundidade), constituindo-se nos melhores aquíferos localizados. As seqüências condutivas que ficam na continuação, têm pequenas possibilidades como aquíferos, apesar de que um substrato resistivo existente em profundidade pode-se tornar numa fonte adicional de água subterrânea.
2. No centro, centro-norte e nordeste, estão zonas de terrenos argilosos onde a possibilidade de armazenamento de água a pequena e média profundidade é mínima; contudo, o substrato resistivo existente em profundidade consiste na única possível fonte de água subterrânea de boa qualidade.
3. Na parte noroeste da área (Chaves), os terrenos são basicamente similares aos descritos na região 2, devendo também ser explorados em profundidade para investigar um possível substrato resistivo. As zonas de resistividade intermediária associadas a lentes de material arenosos, podem constituir aquíferos locais de pequeno porte.

2) Em 1974, surgiu o projeto "Avaliação e Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha de Marajó", de um convênio entre a FINEP e o Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas (NCGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), com o objetivo de avaliar quantitativa e qualitativamente os recursos hídricos da parte leste da Ilha de Marajó, bem como sua utilização econômica

racional, através de estudos geofísicos, hidrológicos, hidrogeológicos e sedimentológicos. Foram definidas cinco áreas-pilotos: municípios de Soure, Salvaterra, Ponta de Pedras, região de baixo e médio Paracaurí, e circunvizinhanças do Lago Arari (figura 15). Realizaram-se cerca de 248 SEVs, 22 piezômetros, 12 perfis de caminhamento elétrico, 29 km de caminhamento elétrico, 11 km de caminhamento eletromagnético, aplicação do método do Potencial Espontâneo e do método sísmico de Refração em caráter experimental, além dos trabalhos de sedimentologia, hidrogeoquímica e hidrogeologia. Cinco teses de mestrado em geofísica foram desenvolvidas com base na interpretação desses dados (Kobayashi (1979), Bezerra (1979), Cavalcante (1979), Porsani (1982) e Guimarães (1983)). Também foi publicado um trabalho em revista especializada (Kobayashi, 1982), além de 6 trabalhos apresentados em diferentes congressos, seminários e simpósios a nível nacional (Kobayashi e Rijo (1980), Porsani et alii (1980), Rijo (1977b), Kobayashi et alii (1978), Bezerra e Sauck (1979), Sauck e Cavalcante (1979), Cavalcante et alii (1978), Cutrim e Sauck (1978)) e internacional (Rijo et alii (1982)). A especificação de alguns dos trabalhos se encontra a seguir:

1. Na área-piloto de Ponta de Pedras, de 25 km<sup>2</sup> (Kobayashi, 1979), realizaram-se 28 SEVs, um perfil elétrico, três perfurações geológicas, e usou-se o método sísmico de refração em caráter experimental. O objetivo principal do trabalho foi o dimensionamento geométrico e seleção de zonas favoráveis à água subterrânea, sendo confirmada a existência de horizontes geológicos pouco profundos (aproximadamente entre 0 e 50, ), favoráveis à captação de água subterrânea, com resistividades entre 100 ohm.m e 1.600 ohm.m.
2. Na área-piloto de Salvaterra, de 200 km<sup>2</sup> (Bezerra, 1979), realizaram-se 65 SEVs, 6 perfilagens horizontais e quatro furos de sondagem, buscando determinar áreas favoráveis a exploração de água subterrânea, através do método de eletroresistividade. Foi localizada uma camada arenosa a aproximadamente 60m de profundidade, com água sem problemas quanto a qualidade, e com resistividade entre 500 e 4.000 ohm.m.

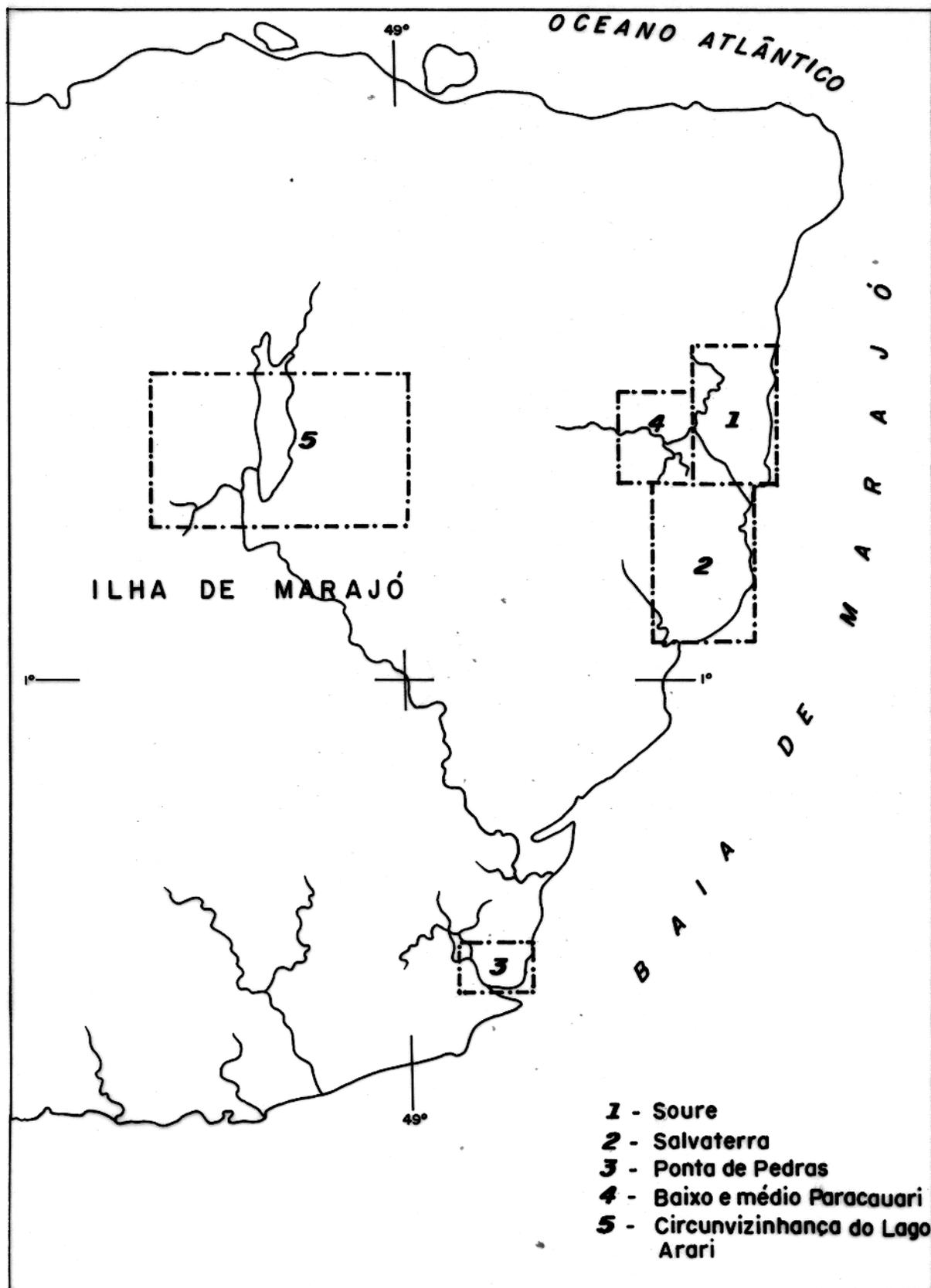


FIG.15- ÁREAS PILOTOS DA ILHA DE MARAJÓ

3. Na área-piloto do Rio Paracuarí (Cavalcante, 1979) , foram realizadas 53 SEVs e 5 perfis de resistividade , tendo-se determinado uma área com excelentes aquíferos (com predominância de areia), provavelmente paleocanais, e outra com água salobra, constituída de sedimentos argilosos e sílticos. Somente 30% da área estudada foi considerada como viável para a exploração de água subterrânea.
4. Numa região adjacente à área-piloto do Lago Arari (Bor sani, 1982), foram utilizados os métodos de eletroresistividade e eletromagnético, realizaram-se 59 SEVs , 17km de caminhamento elétrico, 11km de caminhamento eletromagnético e 4 perfurações geológicas com o objetivo de demonstrar a validade da utilização dos paleocanais para a captação de águas subterrâneas de pouca profundidade. Neste trabalho ficou comprovada a eficácia do método EM na localização dos paleocanais, assim como a existência de água de boa qualidade nestas estruturas.
5. Numa área situada na fazenda São Miguel (Paleocanal Mãe Rita) a leste do Lago Arari (Guimarães, 1983), foram aplicados os métodos sísmico de refração e eletromagnético, em caráter experimental, para prospecção de água subterrânea. Destes, o primeiro para a delimitação geométrica em três dimensões dos paleocanais, em 1.500m de perfis, e o segundo com um perfil eletromagnético (técnica Slingram) para a detecção dos contatos laterais de água doce-água salobra. Os dados eletromagnéticos foram analisados (semiquantitativamente) com o auxílio de um modelo reduzido construído a partir de uma seção de resistividades aparentes. Os resultados não aconselham o uso do método sísmico de refração para o mapeamento de paleocanais salvo com a utilização de técnicas especiais. Seria recomendável, isto sim, a utilização dos métodos eletromagnéticos para o reconhecimento lateral de zonas de água doce-água salobra, já que apenas uma parte do paleocanal se comporta como um aquífero.

6. Na área-piloto do Rio Paracauari (Porsani, 1978), alunos do curso de Pós-Graduação em Geofísica do NCGG, sob orientação do Prof. William Sauck, trabalharam em detalhe em cima de paleocanais, utilizando o método de eletroresistividade e de Potencial Espontâneo, apresentando excelentes resultados na separação de ambientes condutores e resistivos.
7. Numa área de aproximadamente 300 km<sup>2</sup> (Kobayashi e Ri-jo, 1980), pertencente às áreas-pilotos de Soure e Rio Paracauari (área do Rio Saco), foram realizadas cerca de 43 SEVs, 12 km de perfis elétricos horizontais e perfurados 4 poços de aferimento, com o objetivo de determinar as áreas favoráveis à exploração de água subterrânea de boa qualidade. Com base na interpretação dos dados eletroresistivos, assim como das análises hidroquímicas, foram destacadas duas áreas ditas favoráveis: ao sul da região e nos paleocanais.

Trabalhos complementares de sedimentologia (Bemerguy, 1982), hidrogeologia (Piuci (1979), Fenzl e Piuci (1981)) e hidrogeoquímica (Piuci e Fenzl (1981), Fenzl e Piuci (1977), Fenzl e Piuci (1978), Fenzl et alii (1978), Fenzl et alii (1980), Piuci e Fenzl (1978)), também foram desenvolvidos na região dos campos da Ilha de Marajó, dentro do Projeto Marajó.

SEGUNDA PARTE

## 2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

### 2.1 Tratamento e Interpretação Quantitativa dos Dados

Por uma gentileza especial do Dr. A.C.Tancredi do IDESP (atualmente no INPA - Manaus) os dados das 694 SEVs coletadas por aquela Instituição, foram cedidos ao Projeto "Avaliação e Utilização dos Recursos Hídricos da Ilha de Marajó" para serem processados e interpretados, usando-se os recursos computacionais existentes no NCGG-UFPa.

Os dados de cada SEV foram organizados através de um programa elaborado por Porsani (1982) para o sistema HP-9830 e HP-9866A, na forma que aparecem na tabela 1; sendo posteriormente plotados usando-se um programa desenvolvido, na presente trabalho, por seu autor para o sistema HP-9825 e HP-9862A, como aparecem na figura 16.

Em seguida, as SEVs foram interpretadas (tal como aparece na figura 17) através de um programa desenvolvido por Rijo (de nome SEV), e posteriormente adaptado por Porsani (SEV 1) e Carrasquilla (SEV 2) para o sistema HP-9845, baseado nos trabalhos de Ghosh (1971), Koefoed et alii (1971), Kunetz (1966) e Anderson (1975; 1973, in Rijo et alii, 1977). A interpretação consiste em calcular o modelo teórico através de um método numérico que envolve filtros digitais lineares, interagindo através do fornecimento dos parâmetros do modelo geofísico (espessura e resistividade das camadas) e testando visualmente o ajuste com a curva de campo. Para facilitar este processo de interpretação utilizou-se o graficador de vídeo (CRT).

As SEVs mais difíceis de serem interpretadas com o modelamento direto foram interpretadas através do método de inversão, usando-se o programa de nome INVSEV, FOR (Rijo et alii, 1977) implementado no computador DEC-System-1091 da UFPa. Este programa, também desenvolvido por Rijo, e baseado na técnica de regressão múltipla (Ridge Regression) para dados Schlumberger (a teoria será abordada em detalhes no capítulo 4). Neste programa, parte-se de um modelo inicial aproximado e, a partir dele, iterativamente novos modelos são gerados até atingir certo critério de convergência que minimiza as diferenças entre o modelo e os dados de campo. Finalmente, parâmetros (espessuras e resisti-

S.E.V. EXECUTADA PELO IDESP: 400  
 NUMERO DE OBSERVACOES= 21

	AB/2	MN	V1	I1	R1
1	1.5	0.5	37.20	73.80	6.93
2	2.0	0.5	22.00	87.00	6.26
3	3.0	0.5	8.95	77.50	6.49
4	3.0	2.0	42.60	77.20	6.93
5	5.0	2.0	12.90	100.00	4.86
6	7.0	2.0	5.19	80.20	4.88
7	10.0	2.0	3.48	120.00	4.51
8	10.0	5.0	9.20	122.00	4.44
9	15.0	5.0	2.60	105.00	3.40
10	20.0	5.0	1.04	92.50	2.78
11	30.0	5.0	0.31	86.00	2.02
12	40.0	5.0	0.33	205.00	1.61
13	50.0	5.0	0.20	207.00	1.51
14	50.0	20.0	0.87	207.00	1.58
15	70.0	20.0	0.38	186.00	1.54
16	100.0	20.0	0.24	221.00	1.69
17	150.0	20.0	0.22	330.00	2.35
18	150.0	80.0	0.91	328.00	2.28
19	200.0	80.0	0.22	104.00	3.19
20	300.0	80.0	0.31	198.00	5.44
21	400.0	80.0	0.46	382.00	7.49

S.E.V. EXECUTADA PELO IDESP: 401  
 NUMERO DE OBSERVACOES= 21

	AB/2	MN	V1	I1	R1
1	1.0	0.5	1300.00	14.90	513.94
2	1.5	0.5	468.00	16.80	382.88
3	2.0	0.5	198.00	16.20	302.38
4	3.0	0.5	55.00	14.80	208.69
5	3.0	2.0	288.00	14.90	242.89
6	5.0	0.5	21.00	16.80	195.86
7	5.0	2.0	92.00	16.90	205.23
8	7.0	2.0	36.90	12.50	222.58
9	10.0	2.0	18.90	13.80	212.98
10	10.0	5.0	52.90	13.80	225.80
11	15.0	5.0	48.00	33.00	199.92
12	20.0	5.0	21.30	32.50	162.14
13	30.0	5.0	5.90	28.70	115.44
14	40.0	5.0	2.09	27.90	75.01
15	50.0	5.0	0.83	26.10	49.83
16	50.0	20.0	3.60	26.60	51.02
17	70.0	20.0	0.72	25.30	21.46
18	100.0	20.0	0.13	29.30	6.90
19	150.0	20.0	0.04	45.20	3.11
20	150.0	80.0	0.24	45.20	4.36
21	200.0	80.0	0.13	49.00	4.00

V<sub>1</sub> - Voltagem medida

I<sub>1</sub> - Corrente medida

R<sub>1</sub> - Resistividade aparente calculada

TABELA 1 - DADOS DAS SEVs 400 E 401 DO IDESP.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

PROJETO: MARAJÓ  
LOCAL: BAIXA DO AVIADOR  
INTERPRETAÇÃO

**NCGG**

SEV. - Nº 413  
DATA: 9/12/71  
EQUIPAMENTO:  
EQUIPE:

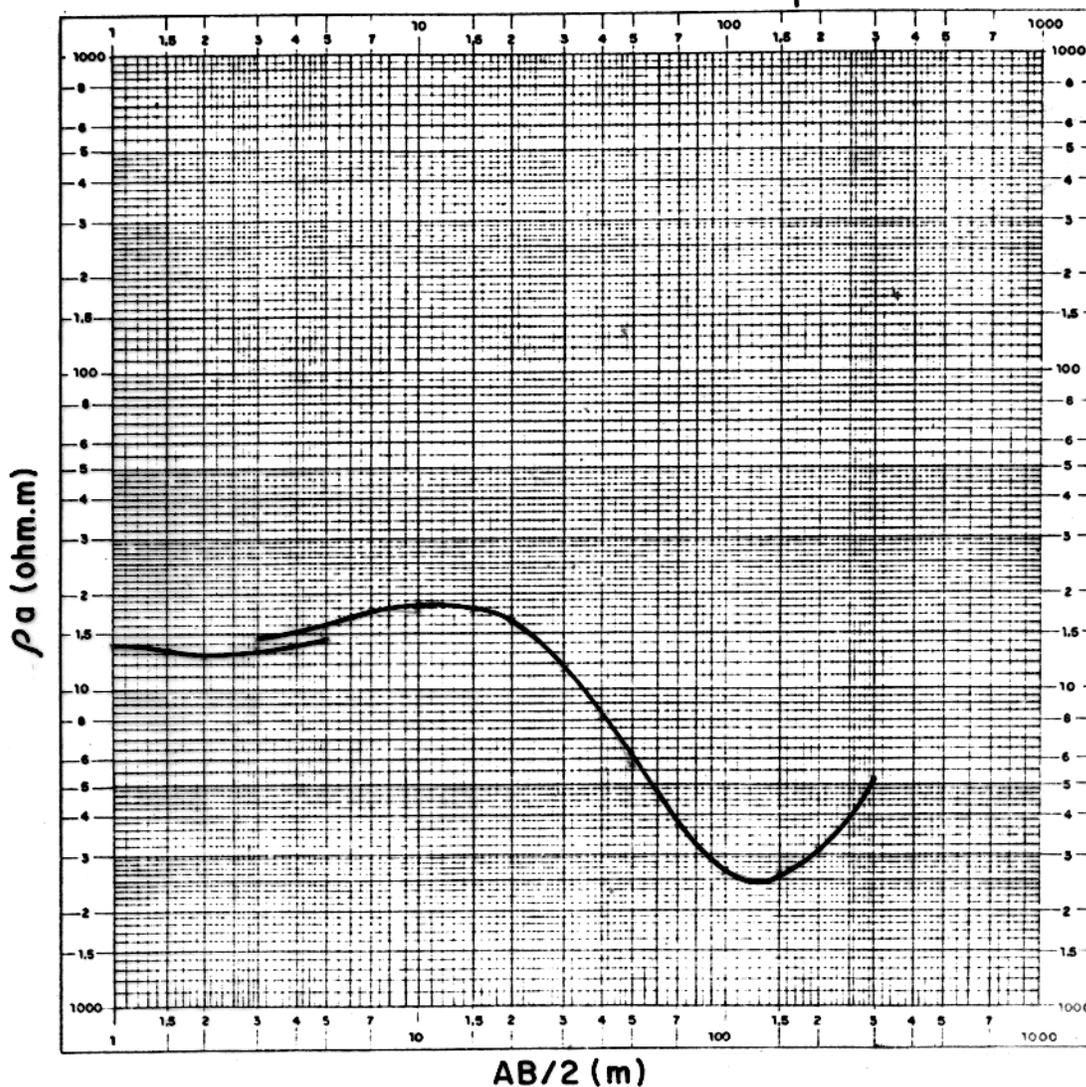


FIG. 16 - GRÁFICO DA SEV 413.

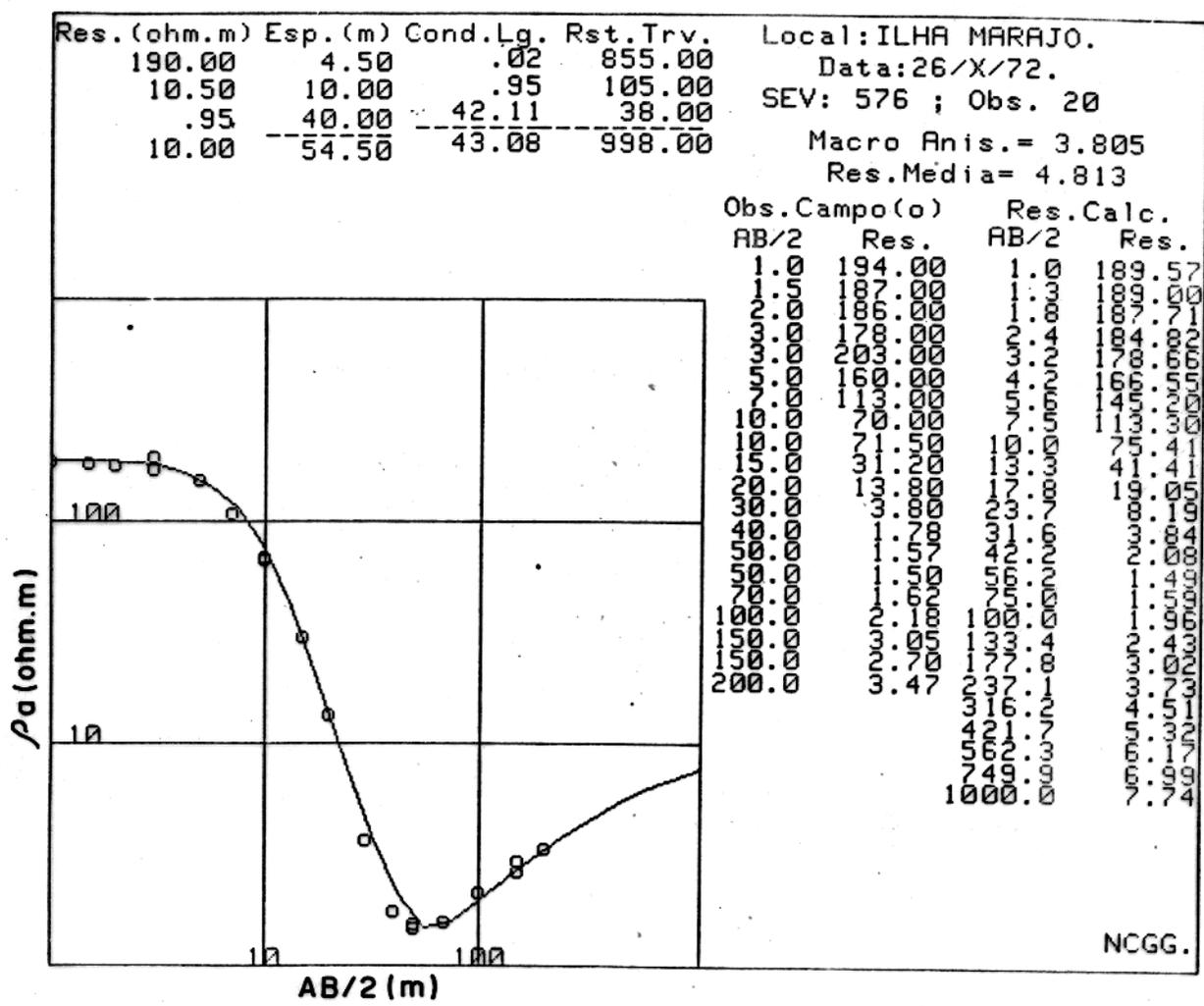


FIG. 17 - INTERPRETAÇÃO DA SEV-576.

vidades) do modelo final são introduzidos novamente no programa SEV 2, de modelamento direto, com o fim de obter o formato final da SEV interpretada.

O programa INVSEV.FOR também provê informações estatísticas na resolução dos parâmetros das camadas, na forma de erro no ajuste dos dados, percentagem de desvio de cada parâmetro e densidade de informação das observações. Aproveitando tais informações, foram estudadas algumas SEVs características.

Como o programa INVSEV.FOR faz as sucessivas iterações para atingir o mínimo usando os parâmetros em formas logarítmica, modificou-se esse programa para outro de nome INVSEM.FOR, com o fim de fazer um estudo da condição da matriz sensibilidade, das matrizes resolução, correlação e matriz densidade de informação, como também das regiões de confiança.

O INVSEM.FOR converge e faz a estatística usando os parâmetros em forma logarítmica, e termina fazendo estas avaliações com os parâmetros em sua forma normal. Para isso, foram usadas as sobrotinas SVA.FOR, CONREG.FOR, SMAT.FOR, RMAT.FOR e CORMANT.FOR, proporcionadas pelo Prof. João Batista Correa da Silva (notas de aula, 1983). Assim, a partir da classificação das SEVs em suas diferentes famílias, selecionou-se uma SEV de cada grupo com o fim de fazer esses estudos e tentar estender essa análise as respectivas famílias das SEVs escolhidas, ressaltando-se, porém, a possibilidade de resultarem erros dessas generalizações.

Para o modelamento bidimensional, usou-se o algoritmo desenvolvido por Rijo (1977a), de nome FERES.FOR que foi posteriormente modificado por P.B.M. Guimarães (1983) com o nome de IPRESV.FOR. o qual é próprio para o modelamento de IP (Polarização Induzida), e está adaptado para o DEC-System 1091. Com pequenas modificações, foi possível transformar este programa num outro que modela com dados Schlumberger (de nome RES2.FOR), conseguindo desta forma demonstrar a influência das variações laterais nos dados das SEVs e modelar uma estrutura em forma de paleocanal.

### 3 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Classificação das SEVs

Analisando todas as SEVs do IDESP e do NCGG, verificou-se que se pode subdividi-las em três famílias distintas. Esta classificação é semelhante às feitas anteriormente pelo IDESP (1974), Cavalcante (1979), Kobayashi e Riho (1980) e Porsani (1982), porém, com algumas modificações.

1. Primeira Família; SEVs do Grupo A (subdividido em quatro tipos A1, A2, A3 e A4, como é ilustrado na figura 18), caracterizam-se por ter valores muito altos de resistividade na camada superficial, sucedida por um horizonte condutivo, sobre um horizonte resistivo profundo. Caracterizam-se ainda por baixos valores de condutância longitudinal total (geralmente menores que 1 ohm.m), resistência transversal total com altos valores (de centenas a milhares de ohms.m), resistividades médias altas (de centenas a milhares de ohms.m), e coeficientes de macroanisotropia maiores que 1.

Esta família de SEVs é característica da parte sul e sudeste da região dos campos da Ilha. O tipo A2 encontra-se mais ao sul da Ilha, enquanto que os outros estão distribuídos em todo o sul e sudeste. Esse tipo apresenta um horizonte altamente resistivo e outro condutivo, localizados entre o primeiro horizonte condutivo e o horizonte resistivo profundo, dando uma forma de sino no ramo terminal da curva. Este horizonte altamente resistivo pode corresponder a um corpo arenoso não descrito em nenhum dos trabalhos anteriores.

A interpretação deste grupo de SEVs (figuras 19 e 20) revela os seguintes horizontes:

1. O primeiro horizonte, com altos valores de resistividade (mais de 1.000 ohm.m) e espessuras geralmente menores que 5m, é devido à lixiviação na superfície da formação arenosa-laterítica (IDESP, 1974), contendo concreções limoníticas (grês do Pará) (Ko-

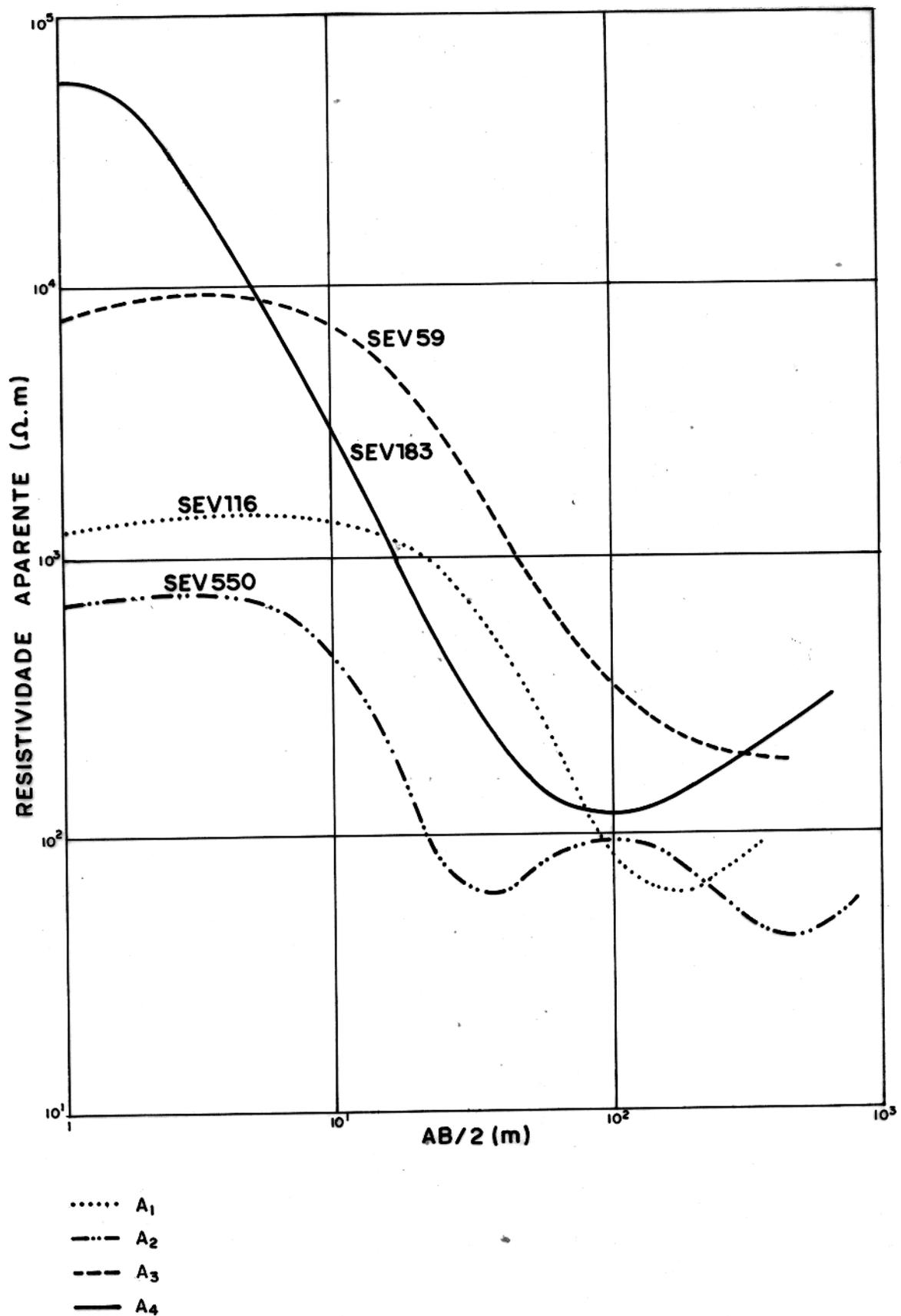


FIG.18 - SEVs DO GRUPO A - PRIMEIRA FAMÍLIA.

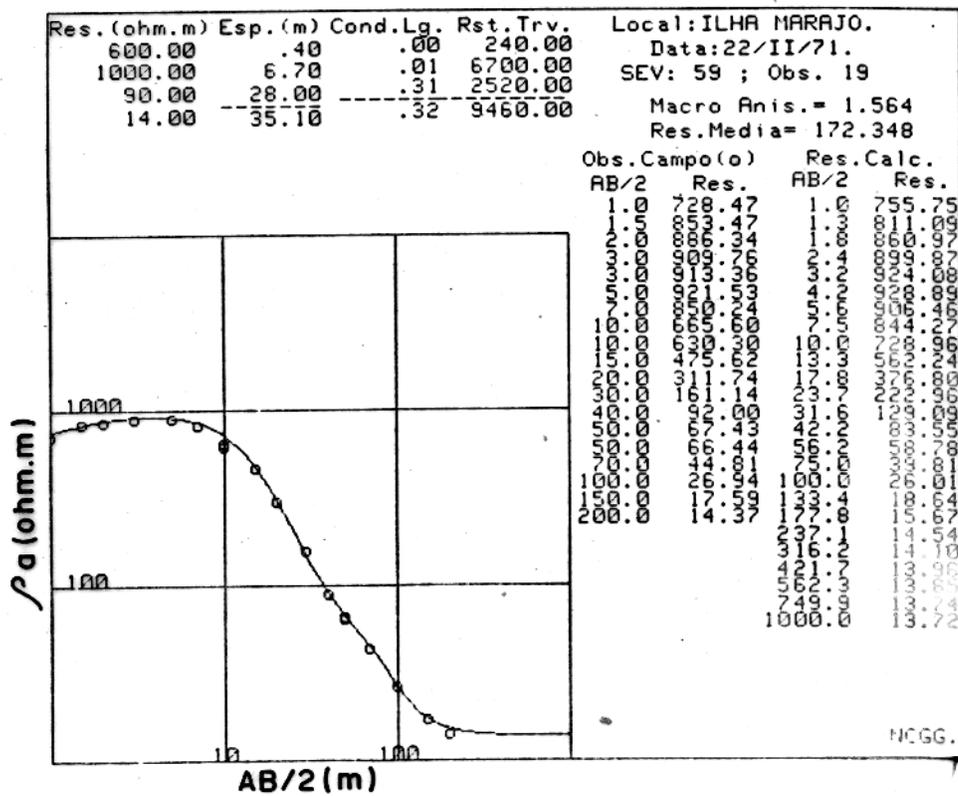
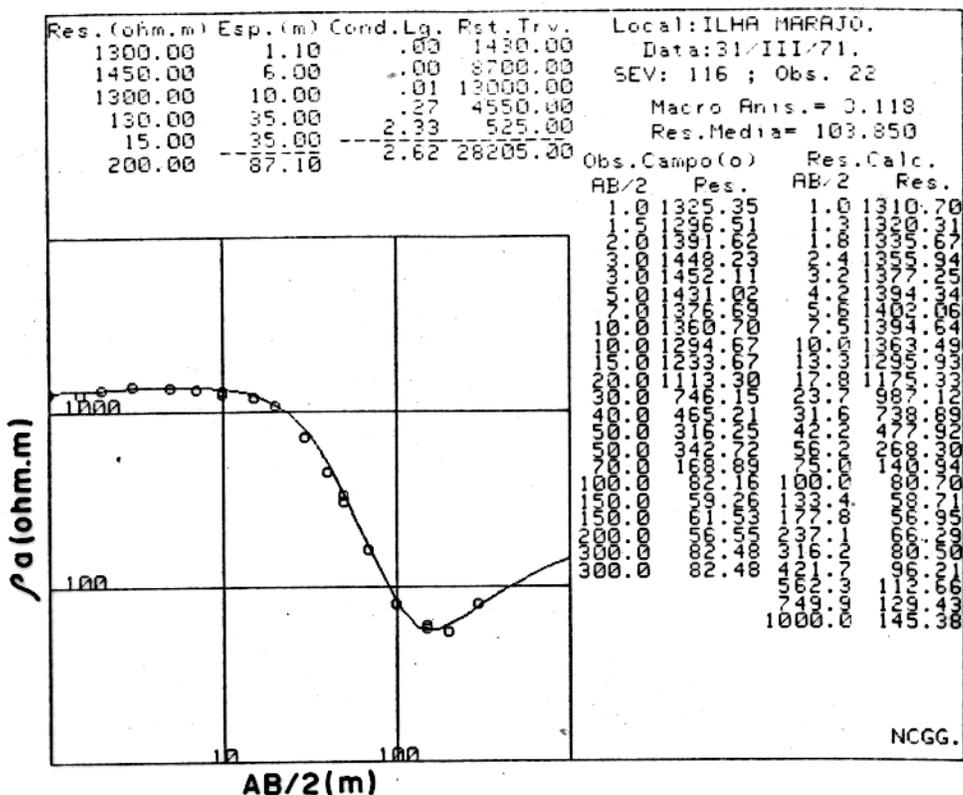


FIG. 19 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs - 116 E 59.

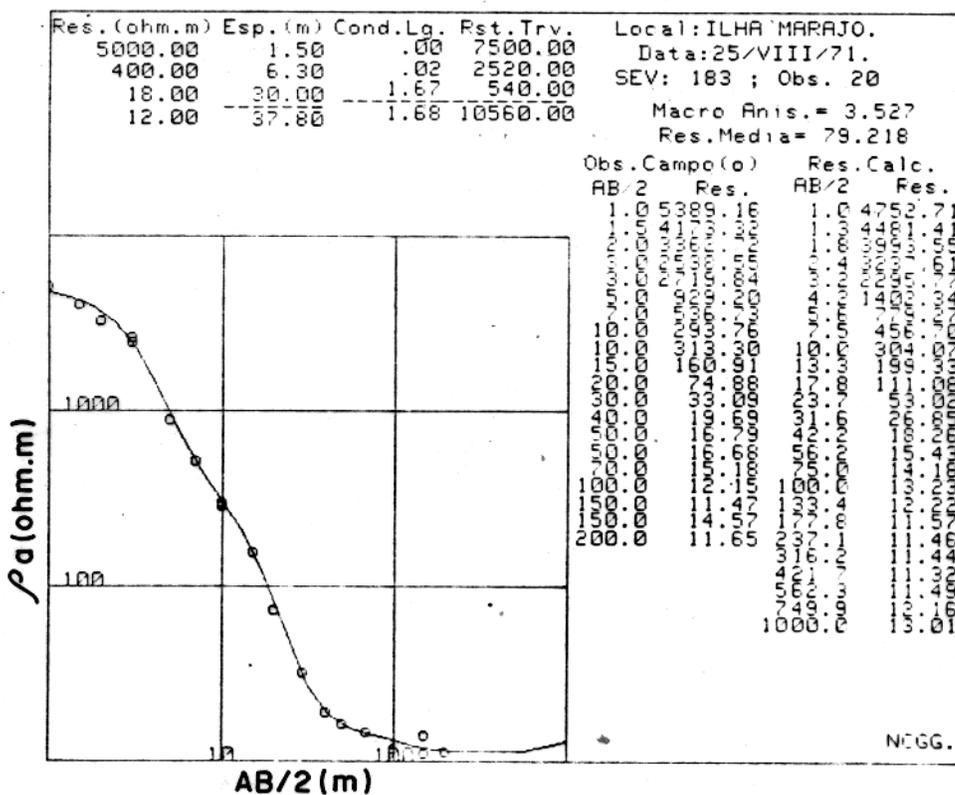
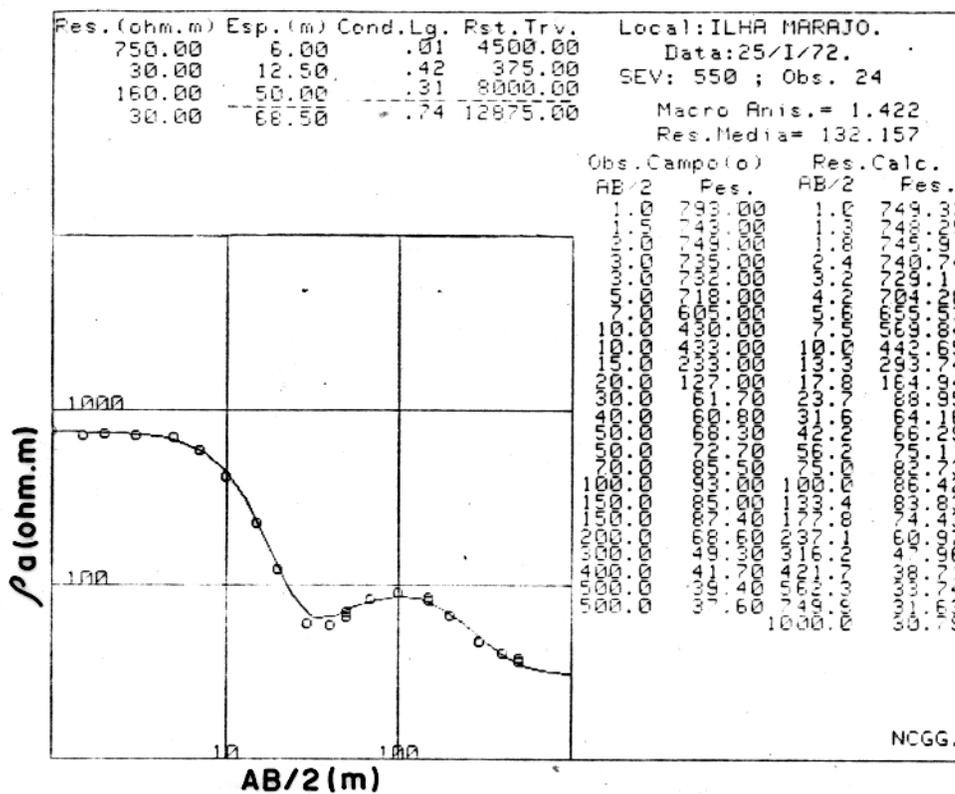


FIG. 20 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 183 E 550.

bayashi, 1879; Bezerra, 1970), intercalados em arenitos não saturados. A presença dessa camada resistiva foi evidenciada pelo IDESP (1974) ao tracejar o mapa de resistividade aparente com linha de envió de corrente de AB=2m.

Esses altos valores de resistividade podem variar, diminuindo durante a época chuvosa, onde as camadas superficiais podem estar saturadas de água, tendo os eletrólitos, nesse caso fácil movimento nos poros de rochas, facilitando assim a condução elétrica (Kobayashi, 1979).

2. Em seguida tem-se um segundo horizonte também com resistividades altas (variando aproximadamente entre 400 a 1.500 ohms.m), que segundo o IDESP (1974) e Kobayashi e Rijo (1980), representam os terrenos de média profundidade atingidos pela corrente, que correspondem aparentemente ao aquífero mais superficial da região, explorável em poços da ordem de até 20m de profundidade. Esta camada pode ser interpretada como predominantemente arenosa (saturada com água doce de diferentes composições) com frações de argila. No tipo A2, esta camada aparece unida ao solo. Nos tipos A1 e A3, pode-se considerar que esta segunda camada apresenta camadas extensivas (terceira e quarta camadas no tipo A1, e terceira camada no tipo A3), possivelmente com litologias semelhantes. De acordo com o IDESP (1974), os valores de resistividade aparente dessa camada são fortemente influenciados pelas resistividades dos terrenos superficiais. Isto foi evidenciado no mapa feito pelo IDESP com linha de envió de corrente de AB=40m, onde a configuração das resistividades aparentes destes terrenos é semelhante ao mapa de resistividade superficial.
3. Segue-se então, um terceiro horizonte, bastante condutivo, com resistividade de algumas unidades até dezenas de ohm.m., constituindo formações argilo-arenosas contendo água salobra, cujas resistivida-

des são também fortemente influenciadas pelos terrenos sobrejacentes. Isto também foi verificado pelo IDESP (1974), através do mapa de resistividade aparente com linha de envóio de corrente de  $AB=300m$ . Kobayashi (1979), sugere a realização de uma perfuração até a profundidade de 100m, para verificar se este horizonte é realmente uma camada argilosa com água doce ou arenosa com água salgada, ou ainda argilosa com água salgada. O método de IP poderia também ser utilizado, já que ele apresenta boa resposta nessas condições.

4. Finalmente, verifica-se, na maioria das SEVs realizadas em toda a Ilha, a presença de um horizonte resistivo profundo situado a profundidades geralmente maiores que 50m. Este horizonte pode estar associado ao aquífero profundo das camadas superiores da Formação Marajó ou às litologias de elevadas resistividades das camadas mais profundas do Grupo Pará (intercalações de areia grossa ou calcário). Ele se traduz nas SEVs pela presença de um ramo terminal ascendente que corresponde ao nível resistivo associado a essas formações calcárias e arenosas. Kobayashi (1979), sugere fazer SEVs com grande comprimento de linha de corrente AB, com eletrodos não polarizáveis, e perfurações de poços estratigráficos, para determinar com maior precisão este horizonte, já que ele poderia representar um bom aquífero, pois está, provavelmente, livre de contaminação superficial. Segundo o IDESP (1971-1972), este horizonte resistivo profundo apresenta recursos de água que não se deve negligenciar. Por exemplo, o poço efetuado pelo FSESP em Santa Cruz do Arari, captou um horizonte de calcário a 80m de profundidade (com 2m de espessura) contendo água medianamente salobra com resistividade elétrica de 6 ohms.m. Isto indica a existência de possíveis aquíferos a maiores profundidades nas formações calcárias ou arenosas. Segundo o IDESP (1974), é para estas profundidades que devem ser orientadas todas as pesquisas de água

subterrânea na parte central e norte da Ilha, e , particularmente, na região do Lago Arari, para se obter água subterrânea de boa qualidade.

As perfurações geológicas realizadas na área ca racterísticas desta família não são muito profundas por tal razão, não apresentam uma visão completa dos estratos referidos.

2. Segunda Família: SEVs do Grupo B (subdividido nos tipos B1, B2, e B3, figura 21); caracterizadas por apresentarem horizontes condutivos sobre um horizonte resistivo profundo. Este grupo de SEVs também se caracteriza por apresentar resistências transversais totais baixas ( $\leq 100$  ohm.m), condutividades longitudinais totais altas ( $>1$  ohm.m), resistividades médias baixas ( $< 3$  ohm.m) e coeficientes de macro anisotropia com valores próximos de 1.

A interpretação deste grupo de SEVs revelou o seguinte:

1. Os dois primeiros horizontes, de resistividade aparente baixa ( $\leq 10$  ohm.m), são interpretados como constituídos de sedimentos argilosos e/ou, arenosos salinizados, com uma espessura de até cem metros, sendo que, a primeira camada pode ser interpretada como a camada intemperizada. IDESP (1974), encontrou valores de resistividade baixos ao fazer o mapa de iso-resistividade aparente com linha de envóio de corrente de AB=2m, em SEVs localizadas principalmente nas áreas central, norte e nordeste da região dos campos naturais da Ilha, indicando que solos argilosos ocupam superficialmente grande parte dessas áreas, estando embebidos de água salobra, o que contribue para descer mais o valor de resistividade. É evidente os terrenos localizados nestas áreas são de baixíssima potencialidade hidrogeológica, a pouca profundidade.
2. Seguindo por esse pacote argiloso de baixa resistividade, encontra-se o horizonte resistivo profundo

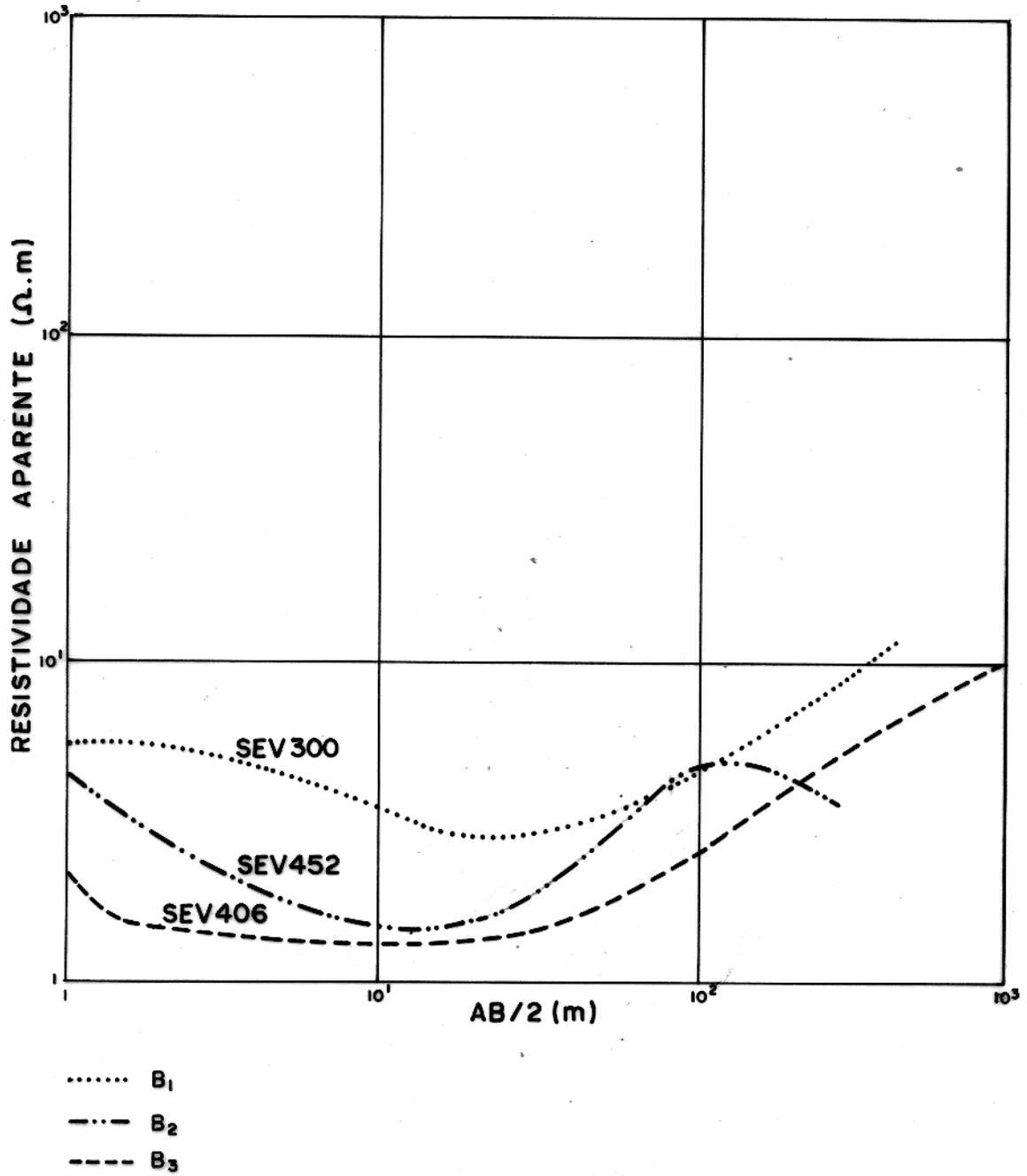


FIG.21 - SEVs DO GRUPO B - SEGUNDA FAMÍLIA.

descrito anteriormente nas SEVs do Grupo A.

A interpretação das SEVs 300, 452 e 406 aparece nas figuras 22 e 23.

As SEVs do tipo B2 apresentam um horizonte resistivo que não está bem evidenciado no tipo B1. Isto pode ser devido ao fato dos terrenos argilosos serem mais condutivos (possivelmente com maior concentração de sais) e terem muita influência sobre os valores de resistividade deste horizonte, não existindo informações anteriores sobre sua natureza. Elas também apresentam resistividades médias e transversais maiores que no caso B1, e, encontram-se geralmente localizadas na parte norte da região dos campos.

Numa perfuração de 42,5m, feita numa área adjacente a um paleocanal, Porsani (1982) encontrou a seguinte distribuição vertical de materiais:

1. Argila de cor marron-cáqui a cinza, com espessura de 8,0m.
2. Argila escura com bastante matéria orgânica, com espessura de 3,0m.
3. Argila cor cinza, com espessura de 9,0m.
4. Argila com intercalações centimétricas de areia, com espessura de 9,0m.
5. Areia média cor amarelada, com espessura de 13,5m.

A SEV respectiva 11,2, localizada perto do furo, depois de interpretada, apresentou o modelo geofísico que aparece na figura 24. A correlação entre as camadas litológicas e as camadas geo-elétricas para esta SEV, muito embora a perfuração não exceda 42m, impondo-se desta forma, a necessidade de se admitir a existência de algumas camadas, é segundo Porsani (1982), a seguinte:

1. A primeira camada, de resistividade 3,39 ohm.m e espessura de 0,33m, equivale ao solo.
2. A segunda camada, com resistividade de 1,51 ohm.m e

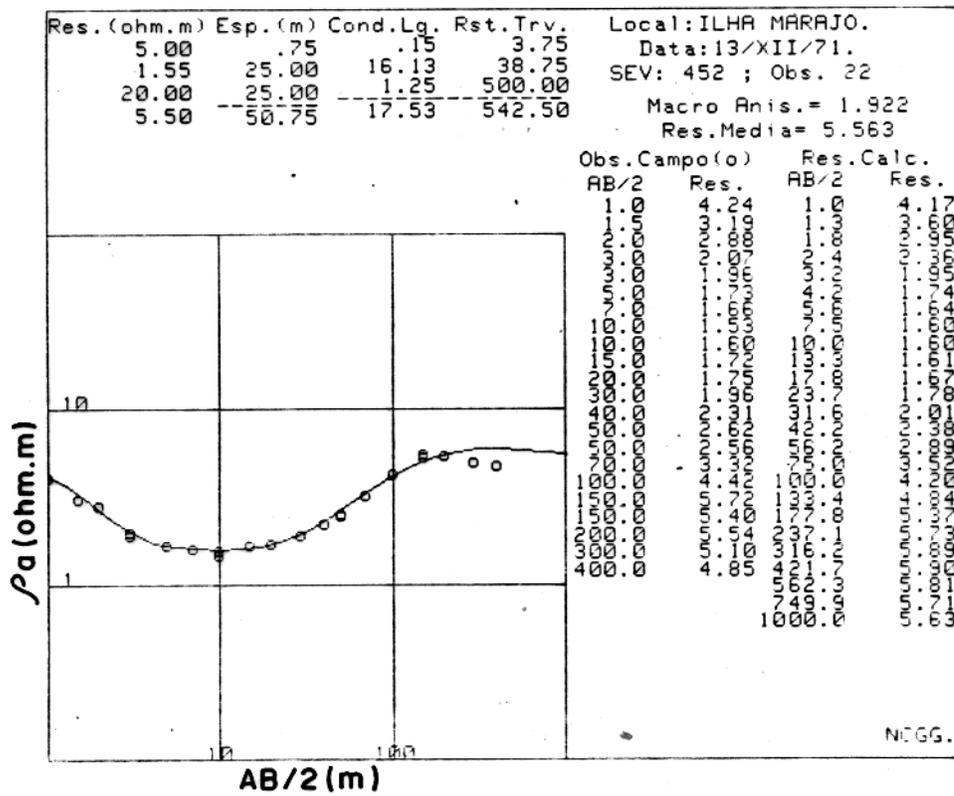
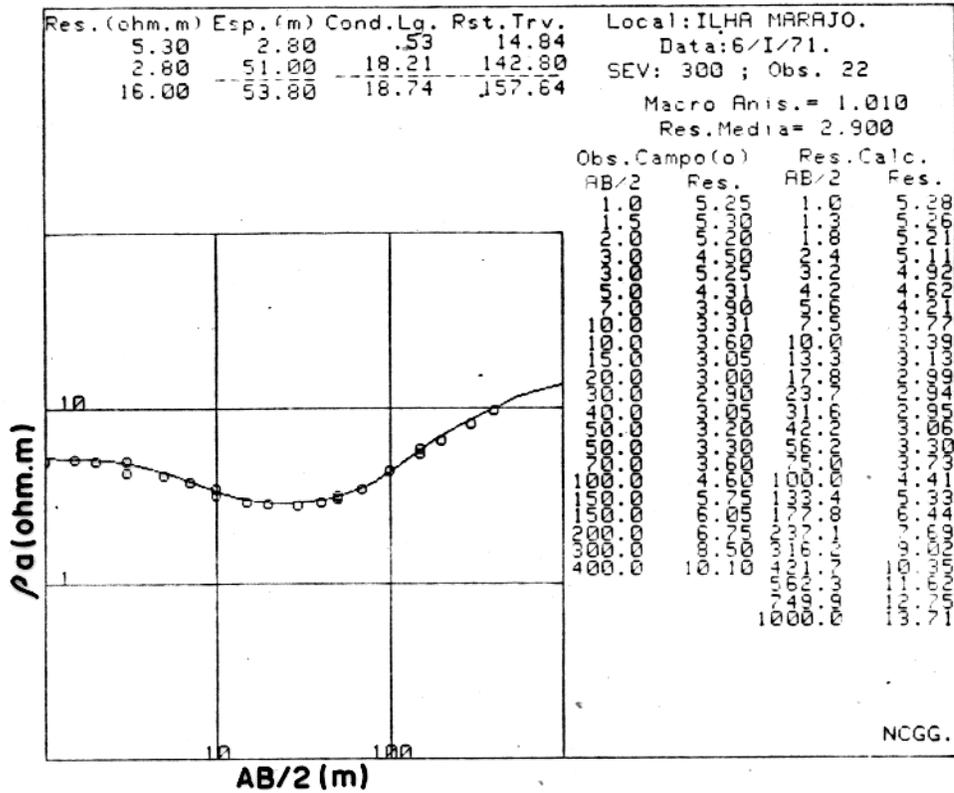


FIG. 22 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 300 E 452.

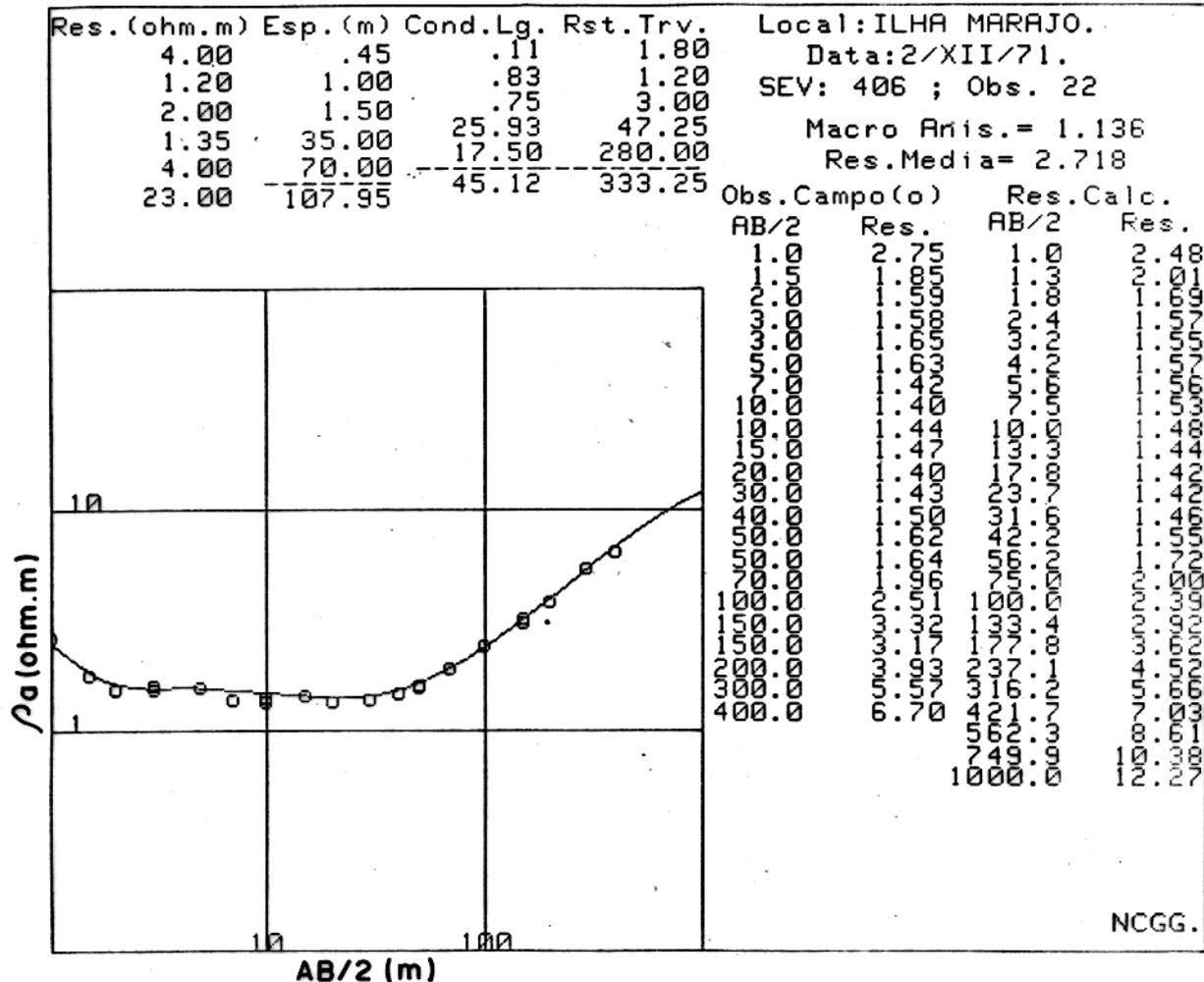


FIG. 23 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 406.

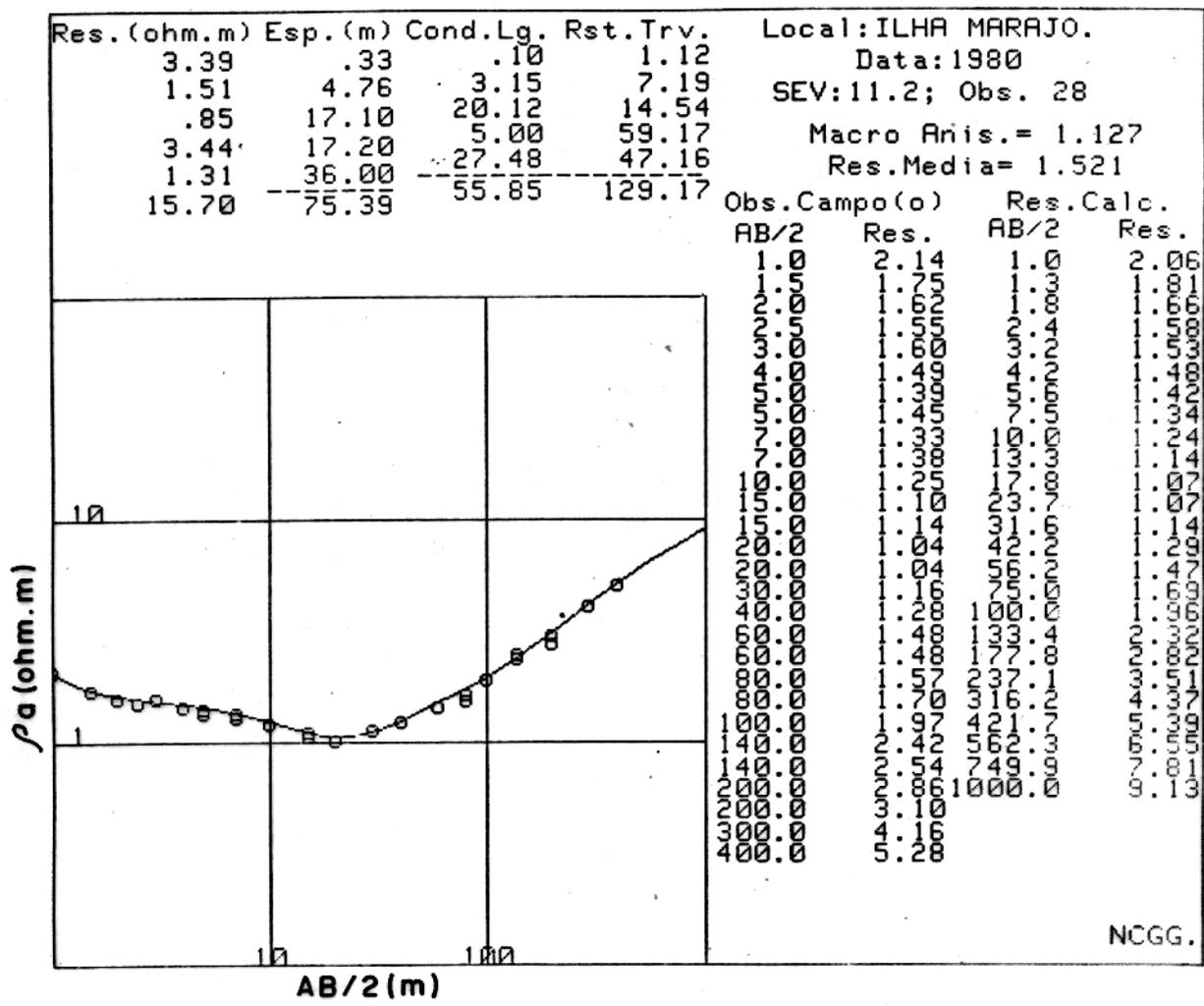


FIG. 24 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 11,2 DE PORSANI, (1982).

espessura de 4,76m, equivale à argila.

3. A terceira, de resistividade 0,85 ohm.m e espessura de 17,10m, equivale também à argila.
  4. A quarta, com resistividade de 3,44 ohm.m e espessura de 17,20m, equivale a sedimentos arenosos salinizados de granulação média.
  5. A quinta, que é bastante condutiva, tem resistividade de 1,31 ohm.m e espessura de 36,0m, equivalendo a sedimentos argilosos.
  6. A sexta camada, com resistividade de 15,70 ohm.m e que é o ramo final ascendente da SEV, equivale à areia.
3. Terceira Família. SEVs do grupo C, subdividida em cinco tipos: C1, C2, C3, C4 e C5. Caracterizam-se por apresentar um segundo horizonte mais resistivo do que os outros, o que se deve a presença de água doce e material arenoso (figura 25). Com respeito a resistência transversal total, resistividade média e condutância longitudinal total, estas SEVs apresentam características intermediárias entre as do grupo A e do grupo B. Seus coeficientes de macroanisotropia são geralmente maiores que 1. Este grupo de SEVs se encontra distribuído em toda a parte leste da Ilha de Marajó, e podem ser definidas como curvas típicas de ambientes arenosos.

A interpretação deste tipo de SEVs (figuras 26, 27 e 28) indica a presença de cinco horizontes geoeletricos principais (podendo em muitos casos faltar alguns deles):

1. O primeiro é um horizonte intemperizado, com menos de um metro de espessura e resistividade variável entre 10 e 800 ohm.m (esta camada não existe por exemplo, no tipo C2).
2. A segunda camada apresenta-se com resistividades entre 100 e 500 ohm.m, e espessuras entre 1 e 10m, constituída predominantemente de argilas arenosas,

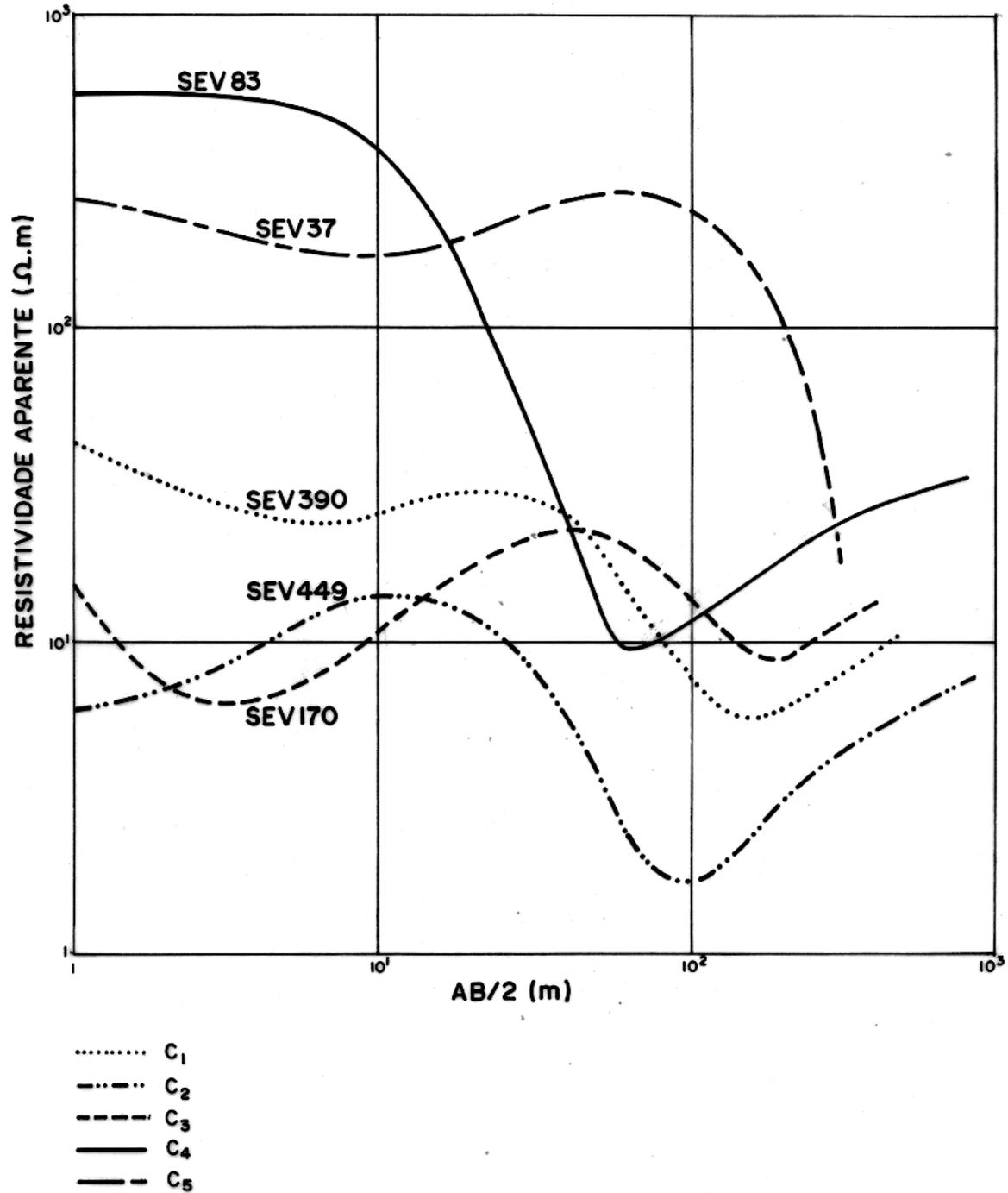


FIG.25- SEVs DO GRUPO C - TERCEIRA FAMÍLIA.

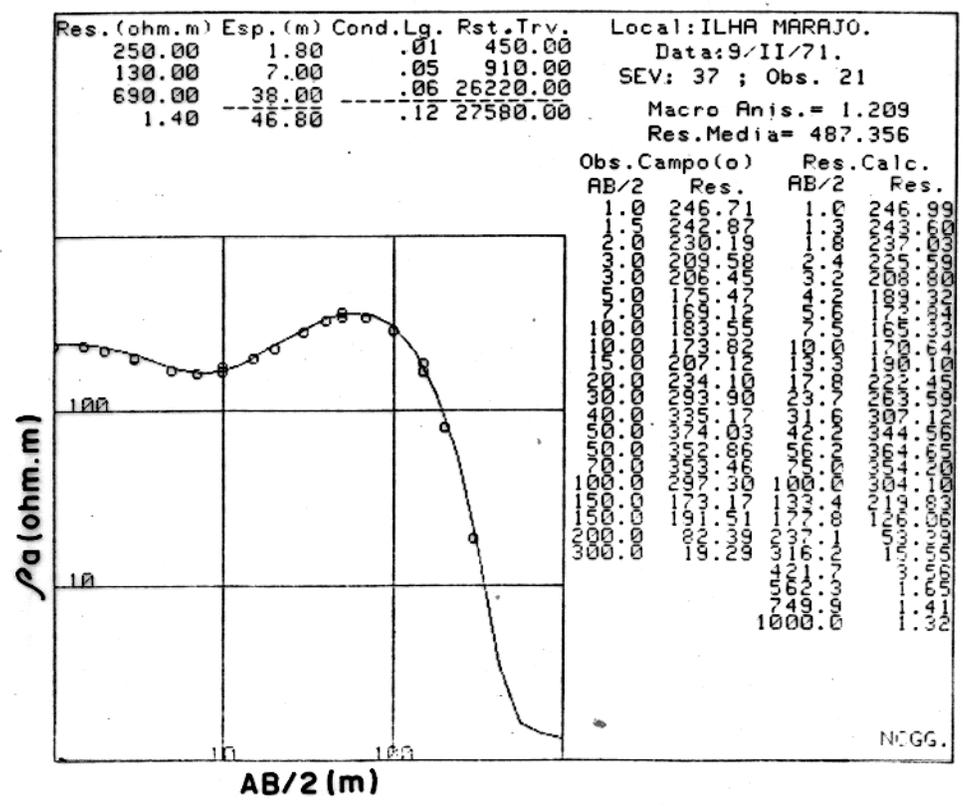
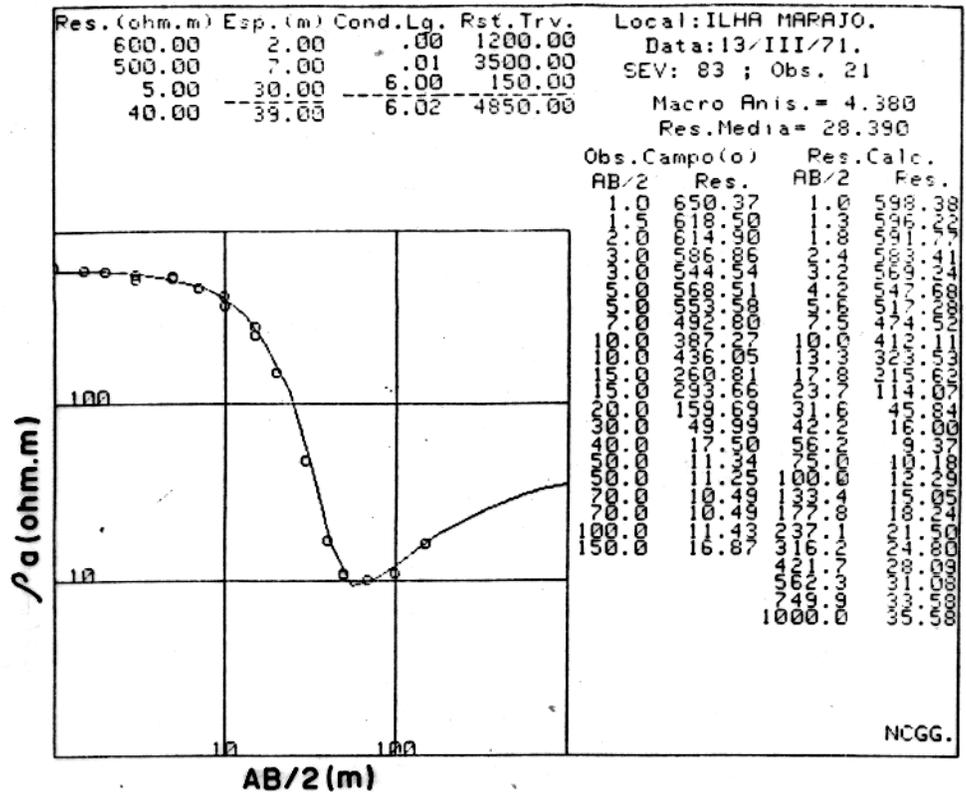


FIG. 26 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 83 E 37.

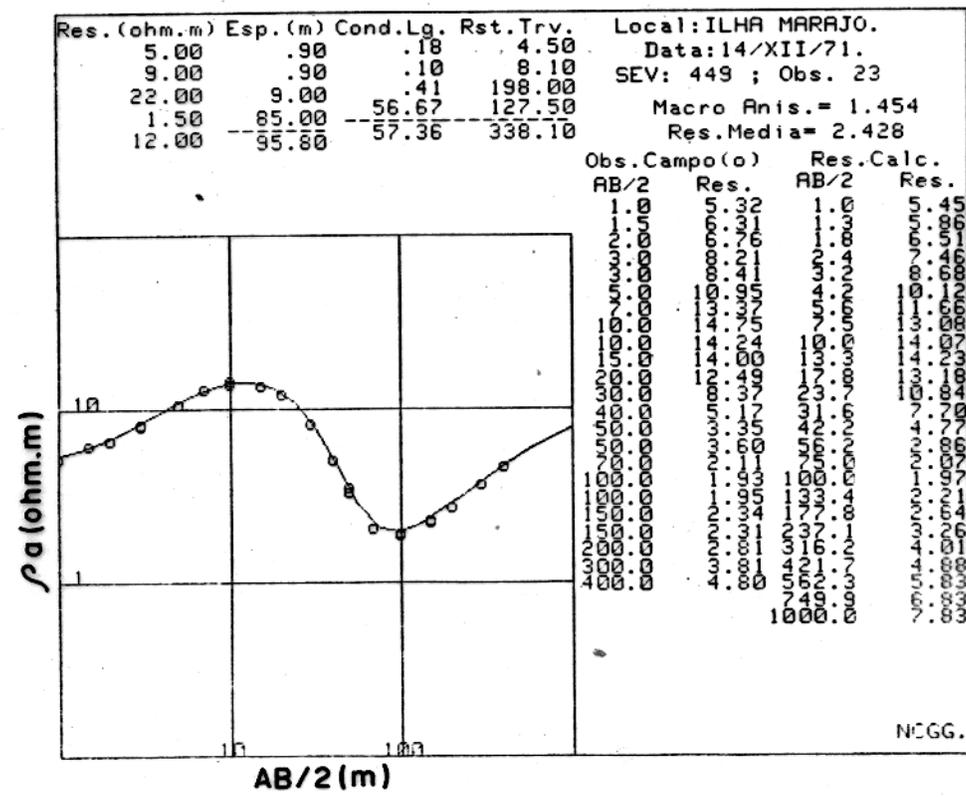
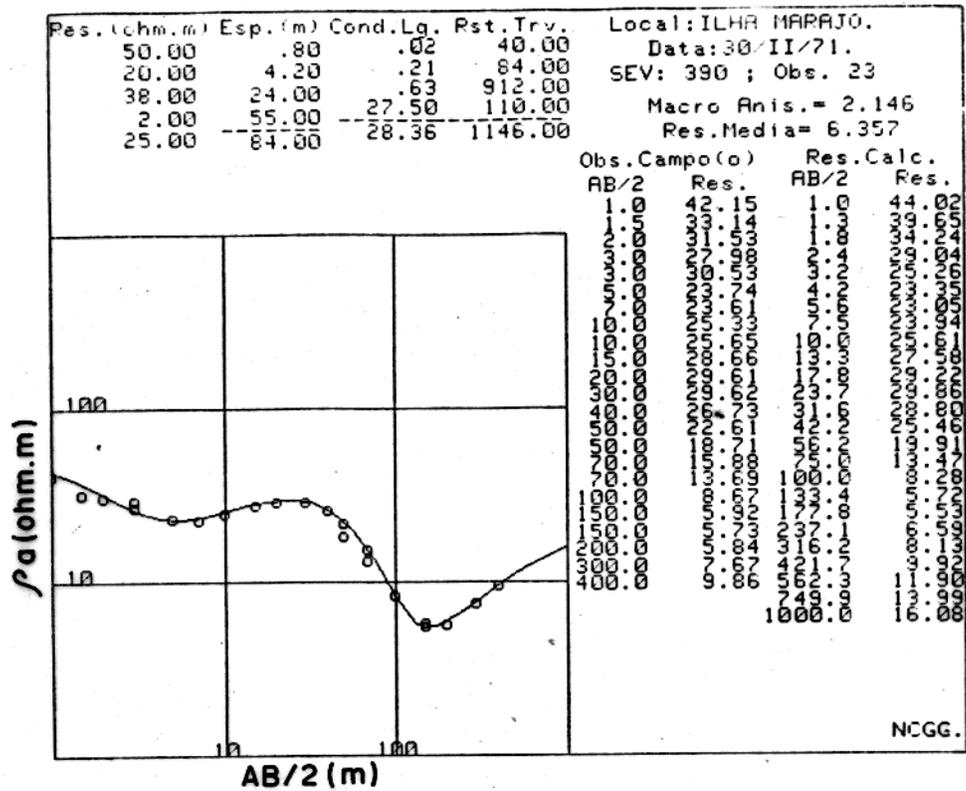


FIG. 27 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 390 E 449.

podendo estar saturada com água salgada (esta camada não existe no tipo C4).

3. Segue um terceiro horizonte, também com resistividades e espessuras variáveis. As resistividades variam entre 10 e 800 ohm.m e as espessuras, entre 10 e 40m. Até 40m este horizonte constitui, geralmente, um bom aquífero, o que foi verificado através de poços (Cavalcante, 1979), já a profundidades maiores que 60m, a potencialidade hidrogeológica dos terrenos diminui, pois eles podem estar saturados com água salgada ou mesmo existir predominância de argila. Este horizonte é interpretado como sendo uma camada predominantemente arenosa, saturada com água doce.
4. Abaixo, encontra-se um horizonte condutivo com valores de resistividade baixos, variando entre 1 e 10 ohm.m. Provavelmente, trata-se de uma camada argilosa ou arenosa com água salgada.
5. Finalmente, vem um horizonte resistivo profundo, que possui as mesmas características daquele mencionado nas curvas dos grupos A e B.

Segundo os trabalhos de Porsani (1982), Kobayashi e Rijo (1980) e Cavalcante (1979), verificou-se que este grupo de curvas sempre está associado a SEVs executadas sobre paleocanais ou paleopraias. Curvas deste tipo sugerem que se trata de estruturas onde muito provavelmente existe água subterrânea de boa qualidade associada a material predominantemente arenoso, situado a pequena profundidade. Verificou-se que este tipo de SEV não é só característica de estruturas do tipo paleocanal e paleopraias, mas também de ambientes geológicos situados nos vales dos atuais cursos de água (rios, igarapés, etc.) e na costa.

As diferenças existentes quanto à resistividade das diferentes camadas que compõem os diversos tipos desta família de SEVs, são encontradas sempre na camada superficial e na primeira camada condutiva. Na camada

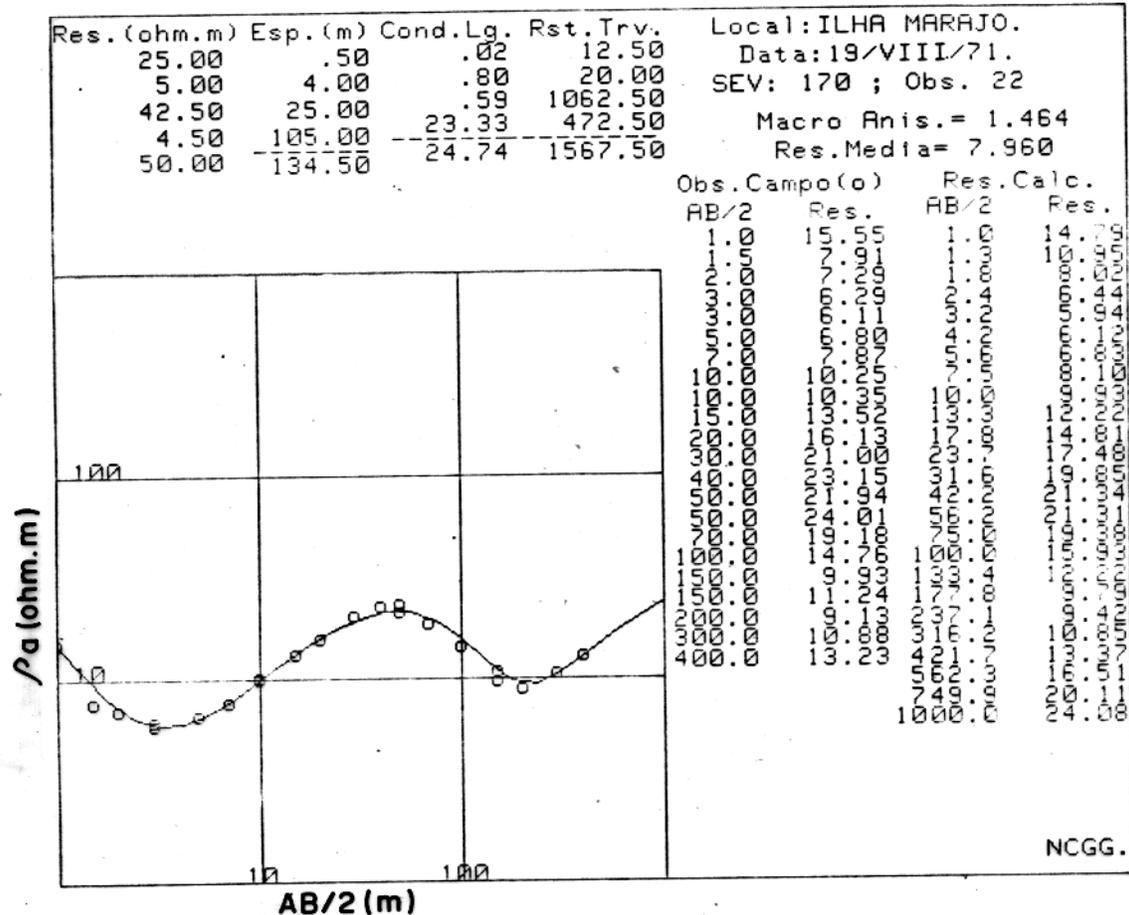


FIG. 28 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 170.

superficial deve-se à presença de solos mais ou menos secos. Na primeira camada condutiva podem ser explicadas pela presença de terrenos mais ou menos argilosos, mais ou menos úmidos, mais ou menos salgados. As diferenças quanto à espessura surgem quando, essa camada superficial consegue cobrir parcial ou completamente o corpo resistivo, ou simplesmente, não aparece. A maiores profundidades, abaixo das camadas superficiais, (cujas espessuras mudam de um tipo para outro) estas SEVs apresentam um padrão geológico bastante semelhante, indicando provavelmente, a mesma seqüência de sedimentos.

A presença de outra camada condutiva sob o corpo resistivo indica claramente que este corpo resistivo se encontra imerso num meio condutor predominantemente argiloso, com água salobra. Isto sugere que, a princípio, é possível que se tivesse apenas esse espesso pacote argiloso que está presente em toda a área, e que ele provavelmente foi escavado por antigas drenagens. Estas foram posteriormente preenchidas com sedimentos predominantemente arenosos, que constituem atualmente os paleocanais, paleopraias e estruturas similares. Algumas delas foram posteriormente cobertas por argila (e não apresentam expressão geomorfológica) e as outras são facilmente distinguíveis nas imagens de radar e fotografias aéreas.

Na perfuração N° 1, de 32m de profundidade, feita por Porsani (1982) sobre um paleocanal, a qual serviu de aferimento a SEV N° 1,2, foram encontradas as seguintes seções geológicas:

1. Argila com detrito vegetal, com 0,1m de espessura.
2. Argila cor cinza e amarelada, com 4,9m de espessura.
3. Argila e areia fina com matéria orgânica carbonosa, com espessura de 2,0m.
4. Areia fina a silte cor marron-esverdeada, com finas intercalações argilosas, com espessura de 10,0m.

5. Areia fina a média com intercalações centimétricas argilosas, com espessura de 8,0m.
6. Argila bastante plástica, cor marrom acizentada, com espessura de 4,0m.
7. Areia média cor amarelada e branca, com espessura de 3,0m.

A correlação entre as camadas litológicas e as camadas geoeletricas para esta SEV, admitindo-se novamente a existência de algumas camadas, sobretudo as mais profundas, é, segundo Porsani (1982):

1. A primeira camada, com resistividade de 31,0 ohm.m e 2,0m de espessura, equivale ao solo e à parte do corpo arenoso (paleocanal).
2. A segunda, de resistividade 9,5 ohm.m e espessura de 3,4m, equivale à argila siltosa que se encontra dentro do paleocanal.
3. A terceira, de resistividade 39,0 ohm.m e espessura de 20,0m, é equivalente ao corpo arenoso propriamente dito (paleocanal).
4. A quarta, com uma resistividade de 0,8 ohm.m e espessura de 4,5m, equivale à argila.
5. A quinta, com resistividade de 4,1 ohm.m a espessura de 11,0, equivale a areia média salinizada.
6. A sexta, com resistividade de 1,45 ohm.m e espessura de 29,0m, equivale a sedimentos argilosos.
7. A última camada, que é o ramo ascendente terminal da curva e com resistividade de 14,0 ohm.m, equivale à areia.

Na linha de praia (paleopraia), numa perfuração (Nº 5) de 42m de profundidade, perto da SEV 18,2. Porsani (1982) encontrou o seguinte:

1. Argila cor cinza com 0,9m de espessura.
2. Areia fina cor amarelada com 1,3m de espessura.
3. Argila cor cinza com 0,6m.

#### 4. Areia fina a silte cor cinza com 15,2m.

As interpretações das SEVs 1,2 e 18,2 de Porsani , aparecem na figura 29. A correlação entre as camadas litológicas e as geoeletricas para esta SEV (de novo admitindo a presença de algumas camadas, especialmente as mais profundas), é segundo Porsani (1982):

1. As duas primeiras camadas, de resistividades 12,0 e 1700,0 ohm.m, e espessura 0,12 e 0,35m, equivalem ao solo.
2. A terceira camada, com resistividade de 65,0 ohm.m e espessura de 11,00m, equivale à areia fina.
3. A quarta, de resistividade 0,8 ohm.m e espessura de 21,00m, equivale a intercalações de areia fina e argila, com água salgada.
4. A quinta, que é o ramo terminal ascendente da SEV e tem resistividades de 18,0 ohm.m, equivale à areia média com intercalações de argila.

Segundo seções geológicas feitas por Bemerguy (1982), os paleocanais são constituídos por areias texturalmente maduras de granulação média a fina, bem selecionadas, apresentando diversas colorações. Em algumas seções é comum a presença de matéria orgânica vegetal disseminada. Intercalando as areias ocorrem sedimentos argilosos de coloração amarronzada, avermelhada, arroxeada, esverdeada e esbranquiçada.

### 3.2 Interpretação dos Mapas e Perfis Constituídos

Foram confeccionados mapas de condutância longitudinal total e da resistividade média de todo o pacote de camadas, e ainda, da espessura da camada que contém o aquífero de pequena e média profundidade, e da profundidade do aquífero profundo.

Rassalta-se que estes mapas foram constituídos com base nos modelos geofísicos obtidos de interpretação dos dados das SEVs executadas na região dos campos da Ilha de Marajó, já que se tem poucas perfurações de aferimento na área, sendo muito rasas as existentes.

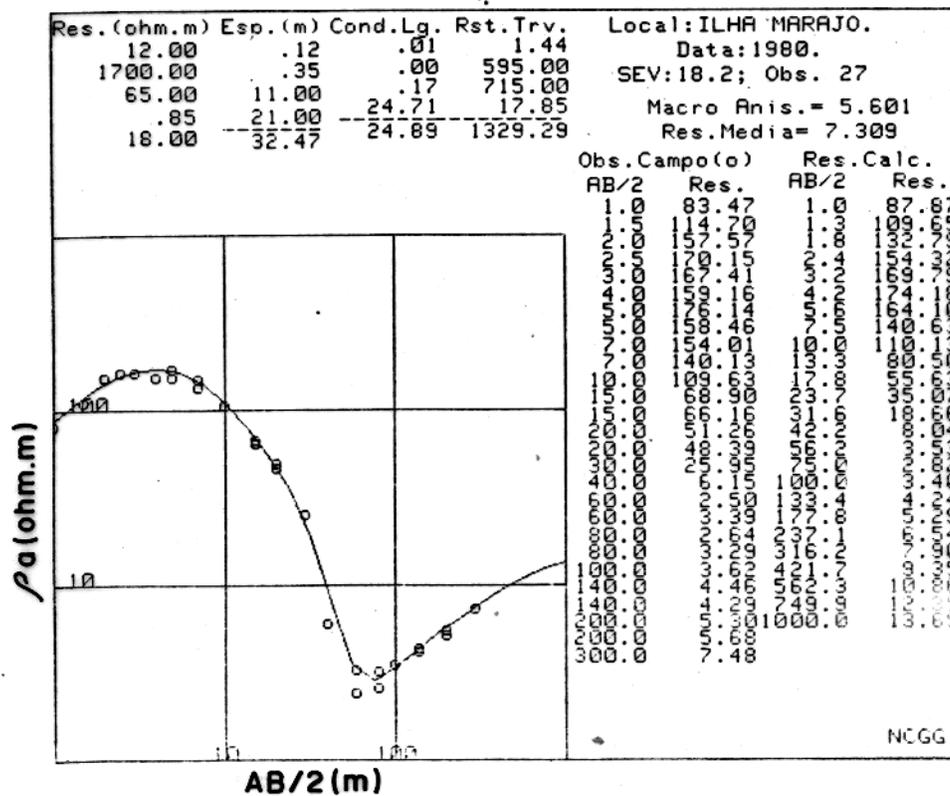
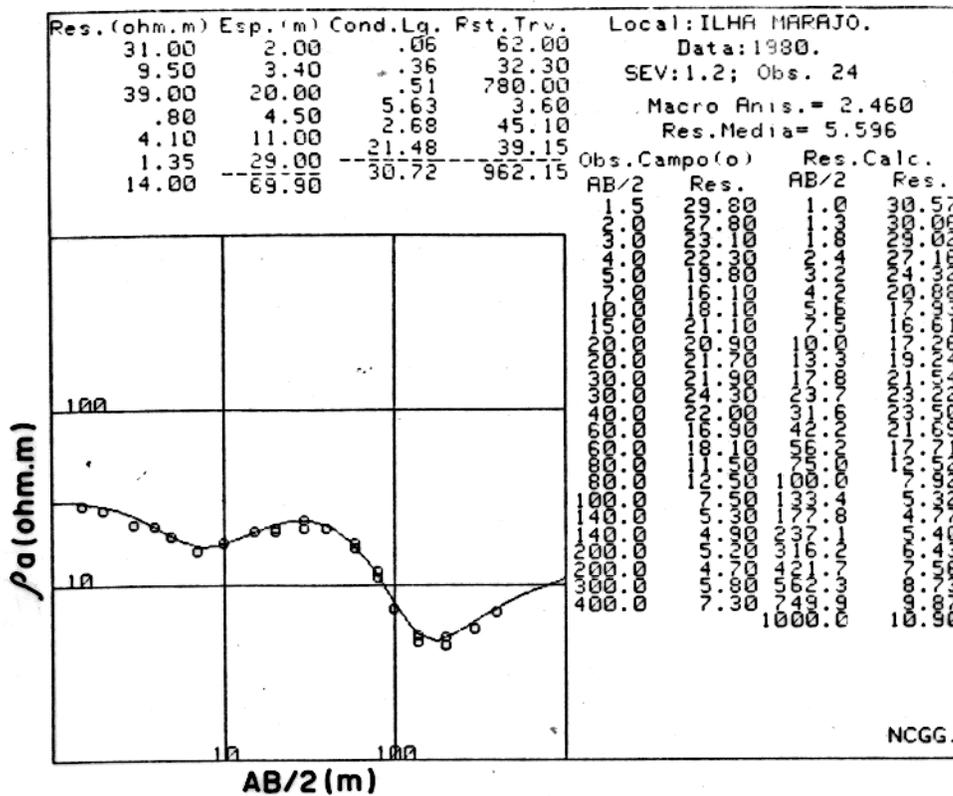


FIG. 29 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 1,2 E 18,2 DE PORSANI, (1982).

### 3.1.1 Mapa de Localização das SEVs com Base em sua Classificação

Com base na classificação das SEVs segundo critérios anteriormente discutidos, confeccionou-se um mapa contendo a localização das SEVs identificando-as por famílias e sub-famílias através de uma simbologia diferente para cada uma, com a finalidade de facilitar a visão da relação existente entre elas e os diferentes terrenos (anexo 3).

Analisando o mapa, percebe-se a seguinte distribuição das SEVs.

1. As SEVs do grupo A encontram-se localizadas na parte sul e sudeste da região dos campos naturais da Ilha . No caso do tipo A2, elas encontram-se localizadas mais ao sul, enquanto que a A1 e A3 localizam-se tanto no sul como no sudeste. A localização dessas SEVs é coincidente com terrenos altamente resistivos (devido à presença de arenitos ferruginosos), onde a possibilidade de existir água subterrânea de boa qualidade restringe-se aos aquíferos em forma de camadas e lentes arenosas de pequena e média profundidade (entre 10 e 50m, segundo Kobayashi e Rijo, 1980), e/ou nos aquíferos profundos a mais de 50m de profundidade.
2. As SEVs do grupo B encontram-se localizados por todo o centro, norte, noroeste e nordeste da região dos campos naturais da Ilha de Marajó. Elas estão relacionadas com o espesso pacote de camadas condutoras (espessura de 100m aproximadamente), constituídos de sedimentos argilosos impermeáveis com águas ricas em sais minerais. Devido a natureza destes terrenos, é consideravelmente limitada a possibilidade de captar água subterrânea a pequena e média profundidade em quase toda esta região. Assim, resta a possibilidade de se encontrar água no horizonte resistivo profundo, o qual poderia constituir-se como a única fonte possível de água subterrânea, e para onde devem ser orientadas futuras pesquisas.
3. As SEVs do grupo C encontram-se distribuídas aleatoria

mente em toda a parte leste da Ilha. Porsani (1982) , demonstrou, baseando-se nos trabalhos de Kobayashi e Rijo (1980), Cavalcante (1979) e IDESP (1974), que as SEVs deste grupo estão diretamente relacionadas com corpos arenosos, os quais possuem expressão geomorfológica que se evidencia nas imagens de radar e através dos padrões de vegetação nas fotografias aéreas, tendo sido confirmados nos diferentes trabalhos de campo . Tais corpos são conhecidos como paleocanais e paleopraias. Descobriu-se, no presente trabalho, que esse tipo de SEV, não só está associado a essas estruturas , como também aparece localizado na costa e nas margens dos cursos de água atuais, como por exemplo, as SEVs localizadas ao longo dos Rios Arari, Paracauari e Câmara, cujas estruturas devem ter uma formação arenosa similar à dos paleocanais ou paleopraias.

Existem dois casos onde as SEVs de grupo C apresentam características geelétricas que não correspondem aos terrenos onde se encontram localizadas:

1. O caso de SEVs localizadas geograficamente em cima daqueles corpos arenosos encontrados por Porsani (1982) nas imagens de radar, que, contrariamente ao esperado, apresentam características de SEVs do grupo B, o que se pode dever ao fato da estrutura apresentar água salobra em forma localizada, ou porções de argila dentro dela (figuras 30, 31 e 32).
2. Porsani (1982), Kobayashi e Rijo (1980) e Cavalcante (1979), analisaram a possibilidade de se ter corpos de areia não aflorante e, por isso mesmo, impossíveis de serem registrados nas imagens de radar ou fotografias aéreas. Do mesmo modo, como estes autores, percebeu-se neste estudo, que existem SEMs que apresentam comportamento semelhante ao daquelas obtidas sobre os paleocanais ou estruturas similares (SEVs do grupo C), mas que se encontram localizadas fora dessas estruturas, as quais, podem ser facilmente vistas no mapa (anexo 3) . Estas SEVs podem servir como indicadores para futuros trabalhos de captação de água subterrânea rasa de tra-



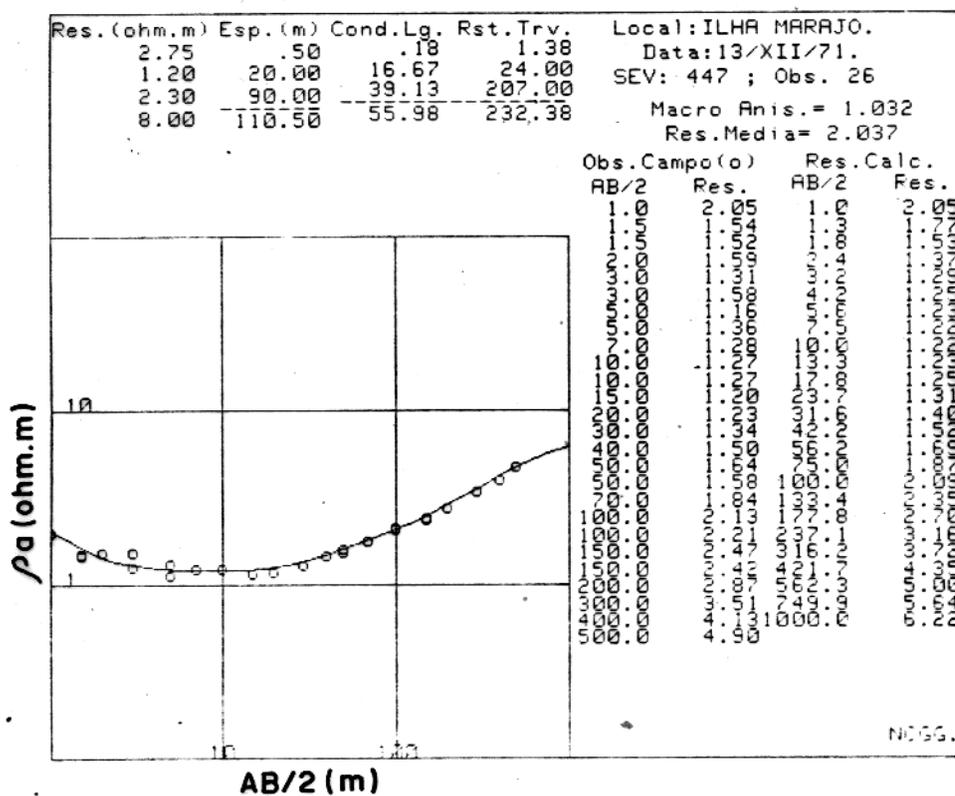
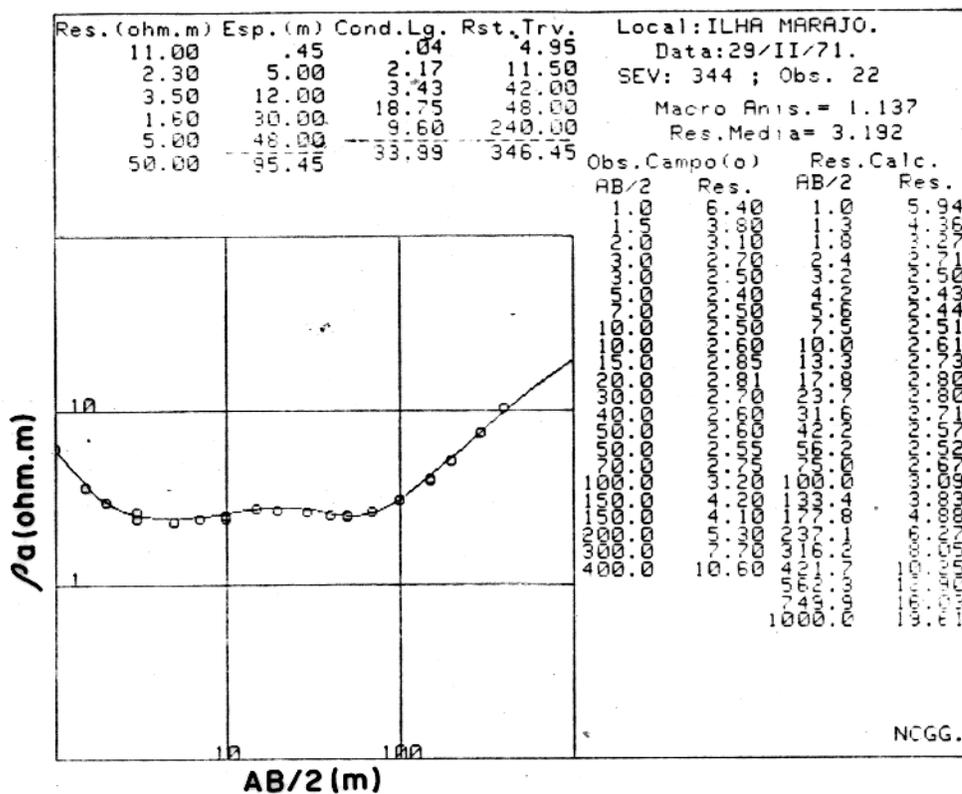


FIG. 31 - INTERPRETAÇÃO DAS SEVs 344 E 447.



zoável qualidade ou para a localização, através de métodos geofísicos, de paleocanais não aflorantes. Como foi demonstrado pelos mesmos autores, as águas encontradas nestas estruturas arenosas são de qualidade aceitável para uso humano (salvo os paleocanais que apresentam baixa topografia, Kobayashi e Rijo (1980), além de que, por razões econômicas, estas estruturas se convertem numa excelente possibilidade, sobretudo, para os habitantes das regiões central e norte da região dos campos da Ilha de Marajó.

### 3.1.2 Mapa da Profundidade do Aquífero Profundo

Como já foi mencionado, existe um horizonte resistivo profundo situado a profundidades maiores que 50 metros em toda a parte leste da Ilha, que se deve provavelmente aos sedimentos arenosos da Formação Marajó ou às intercalações de areia grossa ou calcário das camadas mais profundas do Grupo Pará.

Na parte norte e central da região dos campos da Ilha de Marajó, existem, sobre este horizonte, uma sequência de terrenos argilosos espessos, cuja natureza limita consideravelmente as possibilidades de armazenamento de água de boa qualidade a pequena e média profundidade. Em virtude desse fato, os recursos de água subterrânea contidos no horizonte resistivo profundo tornam-se importantes para sua utilização, já que eles podem ser de melhor qualidade do que os encontrados nos aquíferos rasos dos paleocanais e estruturas similares, presentes também na área.

Na área sul e sudeste da região dos campos da Ilha, apesar de existirem outros aquíferos a pequena e média profundidade com qualidade de água fora dos padrões oficiais, este aquífero constitui-se numa possível alternativa para a extração de água subterrânea.

Embora não se conheça a qualidade da água deste possível aquífero, e se tenha dificuldades de caráter econômico que pasalisam qualquer tentativa de captação de água nestas profundidades, sugere-se que pesquisas orientadas para estas profundidades devem ser executadas, ante a futura possibilidade de

aproveitar esses recursos, sobretudo na região norte e central desta parte da Ilha, que é a mais atingida pelo problema da falta de água.

Considerando estes fatos, foi confeccionado um mapa de contorno, onde é apresentada a profundidade deste horizonte resistivo.

Este mapa cobre toda a parte leste da Ilha, no qual foram aproveitadas todas as SEVs que apresentam o ramo terminal ascendente próprio de litologias altamente resistivas (anexo 4). Neste ponto, é preciso esclarecer que este ramo terminal ascendente pode coincidir com diferentes níveis estratigráficos. Deste modo, o topo do nível geoeletrico mapeado não possui um significado realmente geológico, devido principalmente a que ele foi construído com base em modelos geofísicos com pouca verificação geológica.

Na distribuição das profundidades, observa-se neste mapa que elas variam num intervalo entre 30 e 280m, de forma heterogênea em toda a área estudada.

A partir deste mapa foram feitos três perfis (figura 33) assim orientadas:

1. O primeiro (A - A'), desde a cidade de Salvaterra até a cidade de Chaves.
2. O segundo (B - B'), desde a cidade de Ponta de Pedras, passando pela cidade de Santa Cruz do Arari e chegando até a margem do rio Amazonas.
3. Um terceiro (C - C'), partindo desde Salvaterra na direção NW, passando por Santa Cruz do Arari.

Dentre esses perfis destacam-se alguns fatos interessantes, a saber:

1. No perfil Ponta de Pedras - Rio Amazonas, os dados referentes aos 23 primeiros kms, não estão representados no perfil, devido principalmente:
  1. A pouca densidade das SEVs feitas na área.
  2. A não existência de perfurações de aferimento que

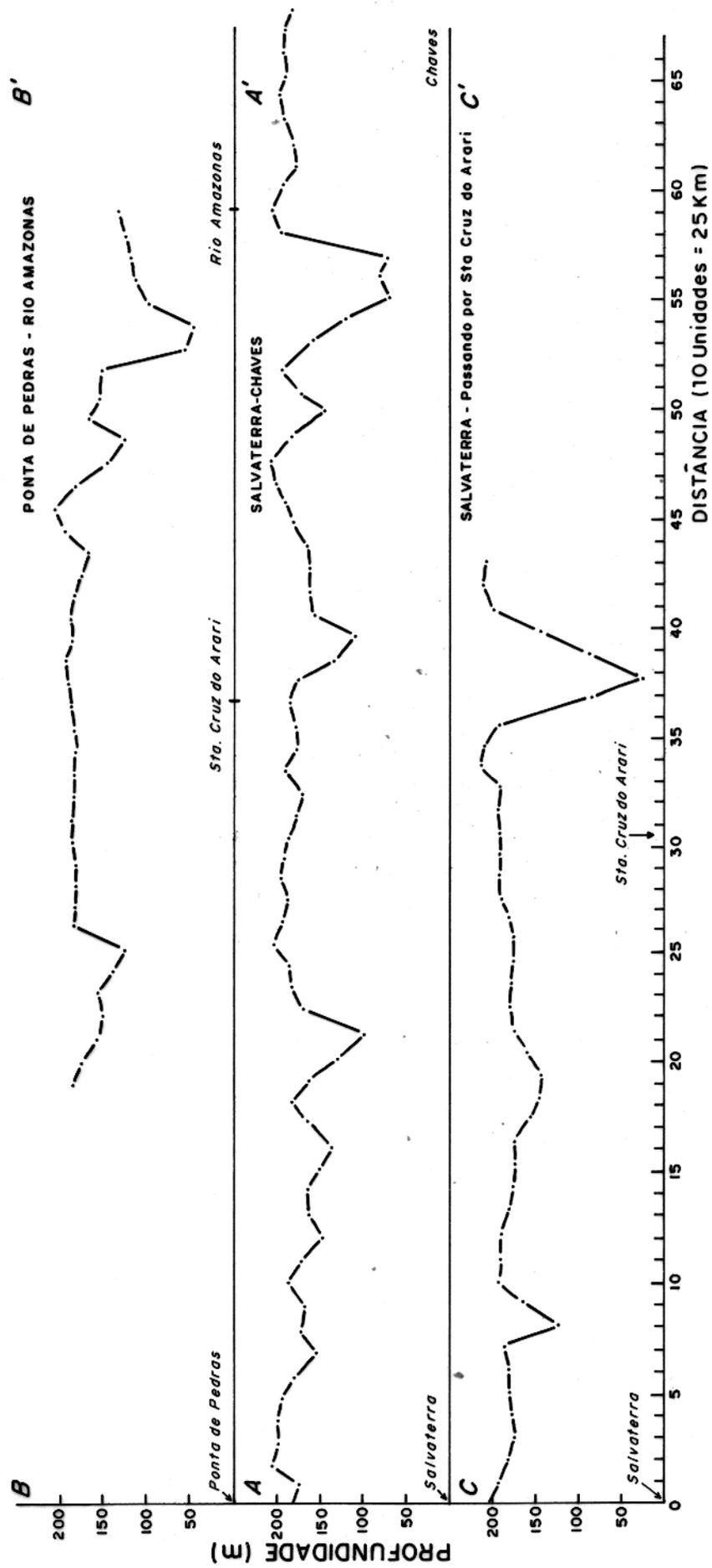


FIG. 33 - PERFIS DA PROFUNDIDADE DO AQUIFERO PROFUNDO.

poderiam esclarecer melhor a subsuperfície.

3. A que as SEVs feitas na área por Kobayashi (1979), que poderiam servir de complementação, foram feitas com abertura de eletrodos de corrente de até  $AB/2 = 250m$ , as quais não registram o horizonte resistivo profundo.
4. A presença de dados estranhos nas SEVs do IDESP, o que se deve provavelmente à existência de uma zona de contato entre a região central e sul que provoca bruscas variações laterais na geologia da área e sua conseqüente influência nos dados das SEVs.

Continuando no mesmo perfil, aparece o horizonte resistivo profundo que se torna bastante constante à altura da cidade de Santa Cruz do Arari (desde 28km antes a 8km depois da cidade), indicando profundidades aproximadas de 70m, podendo estar relacionado com o horizonte de calcário encontrado nesta última cidade na profundidade de 80m..

Depois disso, observa-se uma tendência deste horizonte a aprofundar-se, às proximidades do Rio Amazonas (profundidade de aproximadamente 200m), o que pode estar associado ao aquífero das camadas superiores da Formação Marajó, visto que (segundo Schaller et alii, 1974; figura 13), o Grupo Pará tem nesses locais espessuras aproximadas de 200m.

2. No perfil Salvaterra - Chaves, perto da cidade de Salvaterra, as profundidades variam suavemente entre 50 e 150m. Em trabalhos geofísicos realizados em áreas próximas às cidades de Salvaterra e Soure (Kobayashi e Rijo (1980), Bezerra (1979) e Cavalcante (1979), precisamente por onde passa esse perfil, o ramo escendente das SEVs indica profundidades de ordem de 100 a 150m, e algumas vezes de até 200m.

À altura do km 24 até o km 37, encontra-se o horizonte resistivo profundo a uma profundidade relativamente constante, em média de aproximadamente 60m. Novamente pode-se tratar do horizonte resistivo em Santa

Cruz do Arari, situado a apenas 16km da área que se está analisando. Logo após, a profundidade do horizonte resistivo profundo muda atingindo limites de 50 e 150m, para em seguida, em áreas próximas das margens do Rio Amazonas, alcançar profundidades de até 200m, podendo estar associado, como já foi colocado, ao aquífero das camadas superiores da Formação Marajó. Depois de atingir estas profundidades, o horizonte resistivo profundo sobe a profundidades de aproximadamente 50m nas cercanias da cidade de Chaves.

3. O terceiro perfil tem muita semelhança com o segundo, ou seja, suas profundidades nas vizinhanças da cidade de Salvaterra mudam entre limites de 50 e aproximadamente 150m encontrando uma profundidades bastante constante (aproximadamente a 70m) nas cercanias da cidade de Santa Cruz do Arari (que pode ser calcário, como já foi mencionado). Este perfil passa precisamente em cima da área onde trabalhou Porsani (1982) nas vizinhanças no Lago Arari. Nesse perfil vê-se que as profundidades do horizonte resistivo profundo, na área em questão, localizam-se entre aproximadamente 65 a 85m. Esses resultados coincidem com os obtidos por Porsani, nos quais o nível ascendente da curva que denota este horizonte resistivo profundo se encontra quase sempre a profundidades menores que 100m.

Depois de Santa Cruz do Arari (a aproximadamente 20kms da cidade), o horizonte resistivo aprofunda-se mais, atingindo profundidades acima dos duzentos metros (onde pode estar associado às camadas superficiais da Formação Marajó, ver figura 13), para depois subir a 50m, em terrenos que podem ter semelhança aos encontrados nas cercanias da cidade de Chaves, os quais apresentam características similares aos do sul e sudeste da Ilha.

### 3.1.3 Mapa da Resistividade Média

Devido aos valores contrastantes, quanto à resistividade média, presentes nas diferentes SEVs, foram escolhidas

algumas delas, como representativas dos diferentes terrenos presentes na região, para assim apresentar a distribuição da resistividade média na forma de mapa de contornos.

Nesse mapa (anexo 5), é possível observar uma clara separação entre os valores localizados no sul e sudeste da região, com aqueles que se localizam no centro e norte da mesma. Na parte sul e sudeste da região encontram-se os terrenos que apresentam arenitos ferruginosos entre suas diferentes frações, os quais dificultam a passagem da corrente e vão ter, portanto, altos valores de resistividade média (de até 1.500 ohm.m). Já na região central e norte os baixos valores de  $\rho_m$  (menores que 10 ohm.m) estão relacionados com aqueles extensos terrenos argilosos embebidos de água salobra. É bom esclarecer aqui que o contraste de  $\rho_m$  entre os paleocanais e a matriz argilosa é pequeno, logo não é possível fazer uma localização dos mesmos através desta ma pa, dentro da enorme matriz argilosa.

Na parte noroeste da área, encontra-se outra região com altos valores de resistividade média (de até 150 ohm.m), mas, menores que os encontrados ao sul e sudeste.

Nos perfis feitos (figura 34, orientados nas mesmas direções que os de profundidade) foram encontrados altos valores de  $\rho_m$  localizados perto das cidades de Salvaterra e Ponta de Pedras (de até 1.500 ohm.m) e baixos valores localizados logo após, nas cercanias de Santa Cruz do Arari (menores que 10 ohm.m), que se localiza no centro da Ilha.

Para os lados da cidade de Chaves (noroeste da região), encontrou-se no perfil novamente altos valores de resistividade média (de até 50 ohm.m), mas menores que os encontrados no começo do perfil.

O IDESP (1974), fez perfis de resistividade aparente para linhas de envio de corrente de 2,40, 100, 200, 300 e 400 m, orientados da Baía de Marajó até o Rio Amazonas, e da Baía de Marajó até o Lago Arari. Eles encontraram no primeiro perfil, faixas altamente resistentes nas regiões de Muaná - Ponta de Pedras (sul da Ilha); depois, uma queda brusca nos valores de resistividade aparente nas proximidades do Lago Arari (centro da Ilha), que marca a vasta zona argilosa desse setor; e um ligeiro aumento na margem do Rio Amazonas (norte da Ilha), que evidencia

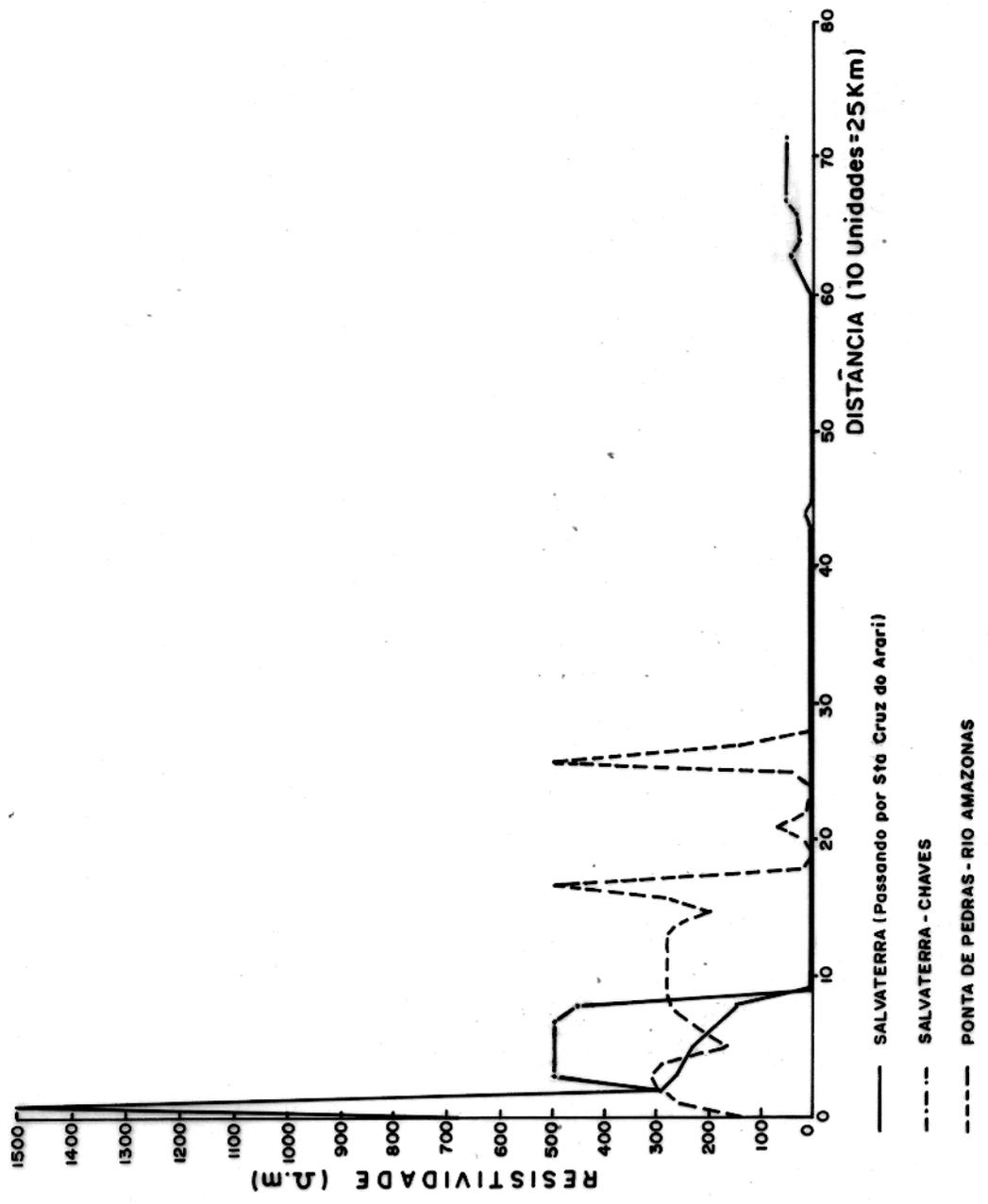


FIG.34- PERFIS DE RESISTIVIDADE MÉDIA.

uma fração arenosa. No segundo perfil, apresentam-se altos valores na região de Salvaterra (sudeste da Ilha) e resistividades muito baixas para todos os comprimentos da linha de envió de corrente, na região do Lago Arari (centro da Ilha).

#### 3.1.4 Mapa de Condutância Longitudinal Total

Para fazer este mapa, foi escolhida uma SEV em cada  $2\text{cm}^2$  do mapa (o que representa uma por cada  $5\text{km}^2$  na escala real).

No mapa (anexo 6), podem-se ver regiões com baixa condutância longitudinal total (valores iguais ou menores que 10 ohm.m) nas regiões sul, sudeste e noroeste da região dos campos da Ilha, o que se deve à presença de terrenos altamente resistentes (geralmente com arenitos ferruginosos), os quais dificultam o passo da corrente na forma paralela (longitudinal) e por isso mesmo apresentam estes baixos valores.

No mesmo mapa é possível ver-se altos valores (maiores que 10 e até 140 ohm.m) presentes nas regiões central e norte desta parte da Ilha. Isto se deve à facilidade que apresenta ao passo da corrente em qualquer direção (longitudinal ao acamamento, neste caso) aquela matriz argilosa embebida de água salobra.

Nos perfis feitos (figura 35), os mesmos que nos casos anteriores) nota-se a presença de baixos valores de condutância longitudinal (iguais ou menores que 10) nas cercanias de Ponta de Pedras (sul), Salvaterra (sudeste) e Chaves (noroeste da região). No centro dos perfis (que coincide com o centro da região dos campos) encontram-se os altos valores (maiores que 10), os quais sobem ainda mais às proximidades do Rio Amazonas. Encontram-se também baixos valores (em torno de 20 ohm.m) no perfil Salvaterra - Santa Cruz do Arari, logo que se ultrapassa esta última cidade.

#### 3.1.5 Mapa de Espessura da Camada que Contém o Aquífero Raso e de Média Profundidade

Kobayashi e Rijo (1980), afirmam que no sul e su-

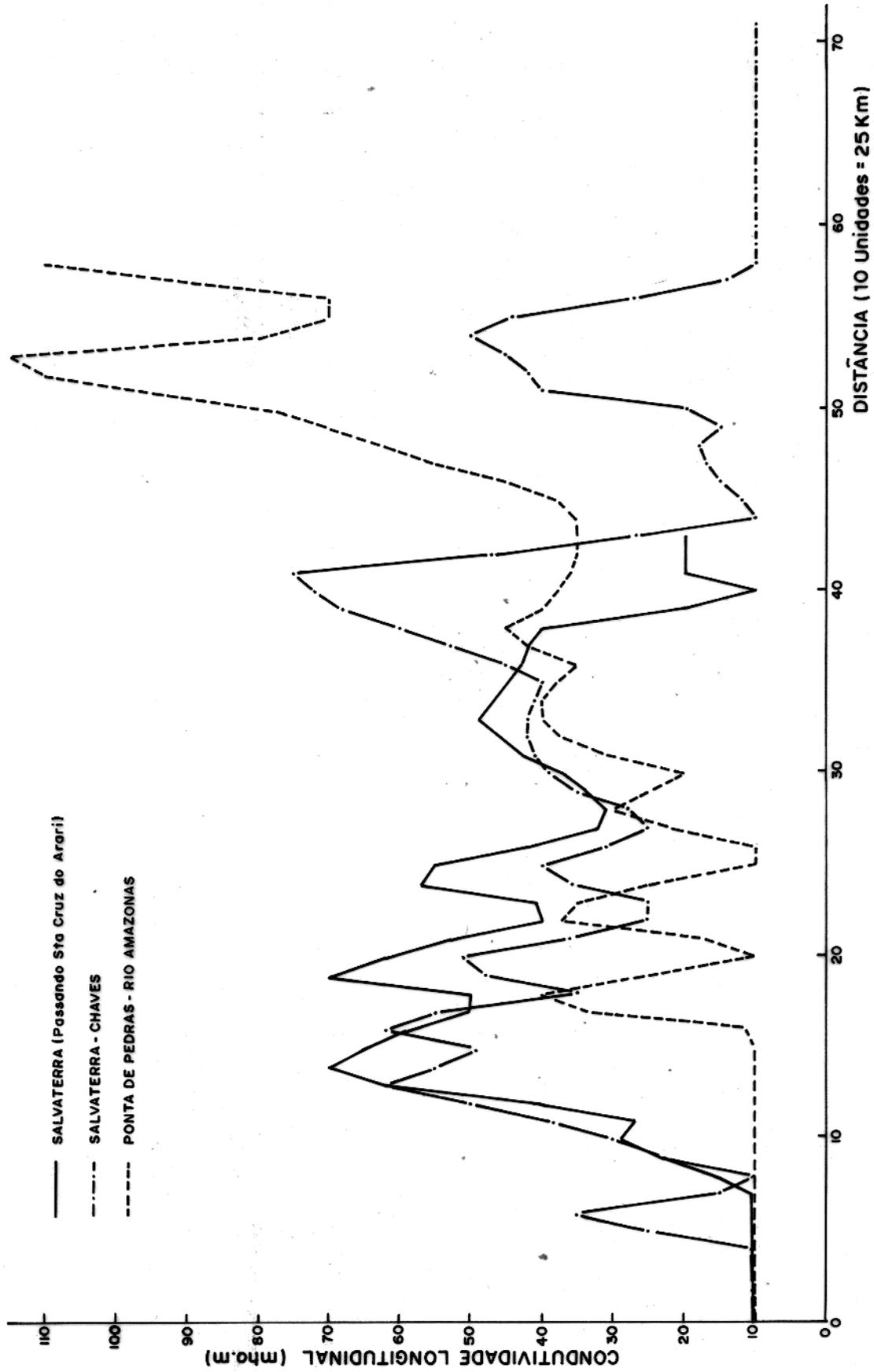


FIG. 35- PERFIS DE CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL TOTAL.

deste da região dos campos da Ilha de Marajó, existem condições para a exploração de água subterrânea de qualidade aceitável, a profundidades que variam entre 10 e 50m.

Nas SEVs características dessa área (SEVs do grupo A) são encontrados horizontes altamente resistivos (geralmente maiores que 1.000 ohm.m) na segunda e/ou terceira camada. Trata-se, segundo o IDESP (1974) e Kobayashi e Rijo (1980), de terrenos de média profundidade atingidos pela corrente, os quais correspondem aparentemente ao aquífero superficial anteriormente referido e que podem ser interpretados como camadas predominantemente arenosas.

Levando em conta estas conclusões, estudaram-se as SEVs do grupo A com o fim de mapear a espessura da camada que contém este aquífero (anexo 7). É bom esclarecer que as espessuras plotadas contêm aquela primeira pequena camada intemperizada altamente resistiva, que se sobrepõe à camada que contém este aquífero, já que ela apresenta uma espessura insignificante (geralmente  $\leq 1$ m).

A figura 36 mostra as interpretações das SEVs 90 e 15, onde o referido aquífero pode ser localizado na segunda camada no caso da SEV 90, e na segunda e terceira camadas no caso da SEV 15 (que coincidem com as camadas mais resistivas de cada curva), apresentando-se com espessuras de 24 e 30m, respectivamente. Para o restante das SEVs, foi utilizado o mesmo critério para determinar a espessura do aquífero, e plotar assim as suas isópacas.

Vale ressaltar que estas espessuras foram escolhidas com base no modelo geofísico, já que os testemunhos de perfurações que poderiam fornecer maiores esclarecimentos só são encontrados, em forma localizada, em Ponta de Pedras (sul da área; Kobayashi, 1979), Salvaterra (sudeste da área; Bezerra, 1979) e Soure (sudeste da área; Kobayashi e Rijo, 1980).



TERCEIRA PARTE

## 4 ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA E DOS RESULTADOS ALCANÇADOS NA PRIMEIRA PARTE

### 4.1 Inversão e Estatística dos Dados

#### 4.1.1 Generalidades

Existem, segundo Gol'tsman (1977), duas formas de abordagem no desenvolvimento da teoria de interpretação das observações geofísicas: uma abordagem analítico-funcional (determinística) que é mais antiga; e uma outra, estatístico-informacional que é mais recente.

Foram usados os dois tipos de abordagem neste trabalho; na primeira parte utilizou-se a forma determinística (problema direto) para interpretar as 694 SEVs do IDESP, aproveitando-se os resultados para a construção dos diferentes mapas. Nesta segunda parte será utilizada a abordagem estatística através do método da inversão, com a técnica de Ridge Regression, para interpretar 3 SEVs escolhidas, e analisar a qualidade dessas interpretações.

O principal resultado da teoria estatística consiste em criar um esquema de interpretação mais geral e logicamente consistente, em analisar profundamente seus principais elementos, em estabelecer os problemas inversos, em construir os procedimentos de decisão e em determinar a qualidade da solução. Alada ao desenvolvimento dos computadores, esta teoria permite uma distribuição mais racional e econômica dos esforços e meios de interpretação dos dados geofísicos (Gol'tsman, 1977).

O uso do estimador de Ridge Regression como uma técnica de inverter dados começou em 1960 (Hoerl e Kennard, 1960, in Beck e Arnold, 1977), quando se desenvolveu um procedimento chamado "Ridge analysis" que consiste de um método gráfico para representar as características das funções de regressão da segunda ordem que tem muitas variáveis independentes.

O desenvolvimento teórico da técnica de Ridge Regression pode ser encontrado em Marquart (1970) e Hoerl e Kennard (1970a, 1970b). O desenvolvimento histórico do uso dos métodos de inversão em sondagens elétricas pode ser encontrado em Ho-

versten et alii (1982). A utilização desta técnica em problemas práticos pode ser encontrada nas publicações de Inman (1975), Rijo et alii (1977), Pelton et alii (1978) e Petrick et alii (1977). Outras técnicas de inversão usadas na interpretação de dados eletroresistivos podem ser vistas em Johansen (1977), Chyba (1983), Inman et alii (1973) e Ward et alii (1976).

Utilizou-se o algoritmo de inversão desenvolvido por Rijo et alii (1977), que se baseia na técnica de Ridge Regression similar à usada por Inman (1975). Ele fez uso de uma abordagem mais compatível com a geologia conhecida, provendo desta forma informação estatística na resolução dos parâmetros das camadas. As desvantagens que o método apresenta são: requer um modelo como tentativa inicial e os custos de computador são altos. Essas duas desvantagens, os autores tentaram reduzi-las fazendo:

1. Parametrização logarítmica do problema e cuidadosa seleção da variável do Ridge Regression; assim, a tentativa inicial pode ser extremamente pobre, mas mesmo assim convergir.
2. Implementação dum filtro digital linear para o problema direto baseado nos trabalhos de Ghosh (1971) e Anderson (1973, in Rijo et alii, 1977).

#### 4.1.2 Razões para o Uso da Técnica de Ridge Regression na Inversão de Dados Eletroresistivos

Diversas publicações (Inman (1975), Rijo et alii (1977) e Petrick et alii (1977)) tem demonstrado a simplicidade, a estabilidade e a flexibilidade do algoritmo de Ridge Regression na inversão de dados eletroresistivos unidimensionais. Segundo Inman (1975), a técnica de Ridge Regression funciona melhor e é mais estável que a técnica do Inverso Generalizado Linear (Inman et alii, 1973) com dados eletroresistivos, quando o problema está perto de ser singular. O estimador de Ridge Regression tem as propriedades do método do Gradiente quando o estimador está longe do mínimo (com o método do Gradiente é sempre possível convergir a um mínimo na soma residual dos quadrados, mas, sua convergência é lenta perto do mínimo) e do método de Newton-Raphson quando o estimador está perto do mínimo (o método de

Newton-Raphson converge rapidamente se o estimador está perto do mínimo, mas pode divergir se está longe dele); pode, portanto, ser considerado como um ótimo estimador.

Inman (1975), também verificou que o estimador de Ridge Regression é um poderoso método para interpretar SEVs feitas sobre terrenos horizontalmente estratificados. Usando este método, é possível encontrar um modelo que ajuste bem os dados, indicando a precisão do ajuste do ruído nos dados, e predizendo a precisão com a qual cada parâmetro é estimado. Isto é certamente uma melhoria sobre a maioria dos outros métodos, porque eles raramente estão disponíveis para indicar o intervalo de modelos que ajustariam os dados com um dado grau de confiança. É importante notar que o método não é uma panacéia. Necessita-se de mais controle para completar os dados eletroresistivos, se se quer predizer exatamente a seção geoeétrica dum local. O método de Ridge Regression faz uso completo dos dados, mas a interpretação de dados embora considerados perfeitos, requer um mínimo de controle geológico. Seu uso diminui o tempo e os custos de interpretação, se comparado a outros métodos, e, ajusta numa melhor forma os modelos aos dados.

Segundo Marquardt (1970), os estimadores de Ridge Regression e Inverso Generalizado apresentam muitas propriedades. Os dois são superiores à técnica dos Mínimos Quadrados Simples para problemas mal condicionados. A solução de Inverso Generalizado é especialmente relevante para autovalores iguais a zero no sistema matricial e, a solução Ridge Regression é computacionalmente mais simples e parece ser mais apropriada para enfrentar autovalores muito pequenos, mas que não sejam zero. A maioria dos problemas práticos de eletroresistividade, devido aos muitos parâmetros altamente correlacionados que podem resultar, envolvem pequenos mas não zero autovalores.

Hoversten et alii (1982), ao comparar cinco técnicas de inversão de dados eletroresistivos (o método Simplex, o método de Bremermann, o método de Peckham, Ridge Regression e o algoritmo Spiral), observaram que dos cinco algoritmos estudados, o algoritmo de Ridge Regression requer menor número de avaliações do problema direto (iterações) para alcançar o mínimo desejado do que o resto dos métodos, mantendo-se esta relação inde

pendentemente do modelo considerado.

Pelton et alii (1978), verificaram que algumas das vantagens derivadas do uso do algoritmo de inversão de Ridge Regression são:

1. Estabilidade na presença de ruído
2. Convergência para modelos iniciais extremamente pobres
3. Estatística dos parâmetros.

#### 4.1.4 Comentário dos Resultados

Para ajudar a fazer esta parte, foram consultados os trabalhos de Inman (1975), Rijo et alii (1977), Glenn e Ward (1976), Sandberg (1979) e Hoversten et alii (1982).

É evidente que a interpretação de SEVs feitas num ambiente geológico complexo, onde se tem muitas variações laterais, como Marajó, pode prover informação quantitativa ambígua quanto às espessuras e resistividades do modelo. Isto significa que os parâmetros das camadas dos modelos aparecem na forma de produto resistividade-espessura (T, resistência transversal) ou na razão resistividade-espessura (S, condutância longitudinal). Para eliminar essa ambigüidade, pode-se recorrer a uma reparametrização em termos desses parâmetros de Dar Zarrouk (Kunetz, 1966). Pode-se também utilizar informações geológicas para determinar alguns dos parâmetros altamente correlacionados, fixando-se um deles e deixando o outro ser invertido. Não se dispõe, entretanto, desse tipo de informações.

##### 4.1.3.1 SEV Tipo C (Nº 34)

A figura 37 mostra a SEV 34 depois de ser interpretada através do método de inversão, tratada com um modelo de 4 camadas, a saber:

$\rho_1 = 115,00 \Omega m$	$h_1 = 2,09 m$
$\rho_2 = 43,70 \Omega m$	$h_2 = 9,95 m$
$\rho_3 = 3,44 \Omega m$	$h_3 = 29,80 m$
$\rho_4 = 7,17 \Omega m$	



(h é a espessura e  $\rho$  é a resistividade).

O modelo inicial para esta SEV foi (figura 38):

$\rho_1 = 115,00 \Omega\text{m}$	$h_1 = 1,80\text{m}$
$\rho_2 = 50,00 \Omega\text{m}$	$h_2 = 9,40\text{m}$
$\rho_3 = 40,00 \Omega\text{m}$	$h_3 = 58,00\text{m}$
$\rho_4 = 10,50 \Omega\text{m}$	

alcançando o mínimo com 4 iterações (convergiu com 4 iterações), tendo uma função chi-quadrado reduzida ( $\chi$ ), que é um indicador de qualidade do ajuste, com o valor de  $6,4559\text{E}-04$ , que dá um percentual de erro no ajuste dos dados de  $6,02\%$  ( $\epsilon = \log_{10}^{-1} [(\chi)1/2-1] \times 100$ ), o qual pode ser considerado muito bom, desde que de bons dados de campo são usualmente obtidos com uma precisão de  $5\%$ , sendo que, percentagens de erro menores que  $2\%$  resultam no modelamento de ruído nos dados (Rijo, comunicação oral, 1983).

Os coeficientes de correlação linear entre os parâmetros do modelo derivados da inversão dos dados geofísicos, serão considerados altos quando apresentarem valores iguais ou maiores que  $0,71$  (Glenn e Ward, 1976). Quando dois parâmetros estão fortemente correlacionados, usualmente não é possível resolvê-los independentemente, e é preciso recorrer-se à reparametrização ou à apresentação das suas regiões de confiança, para dar uma estimativa exata do intervalo de possíveis modelos que ajustem os dados. Quando a correlação é altamente positiva ( $\approx +1$ ) é possível tentar a reparametrização em termos de  $T = \rho \cdot h$  e só  $T$  é conhecida com certeza. No caso da correlação ser altamente negativa ( $\approx -1$ ) a reparametrização pode ser feita em função de  $S = h/\rho$  e só  $S$  é conhecida com certeza (Ward et alii, 1976). Camadas condutivas finas geralmente apresentam correlações perto de  $+1$ .

A matriz correlação desta SEV (figura 37) indica as seguintes altas correlações:

Correlações positivas	Correlações negativas
$\rho_3 - h_3$ (96%)	$\rho_2 - h_2$ (-85%)
	$\rho_2 - h_2$ (-76%)
	$\rho_3 - h_2$ (-92%)
	$\rho_3 - h_2$ (-84%)

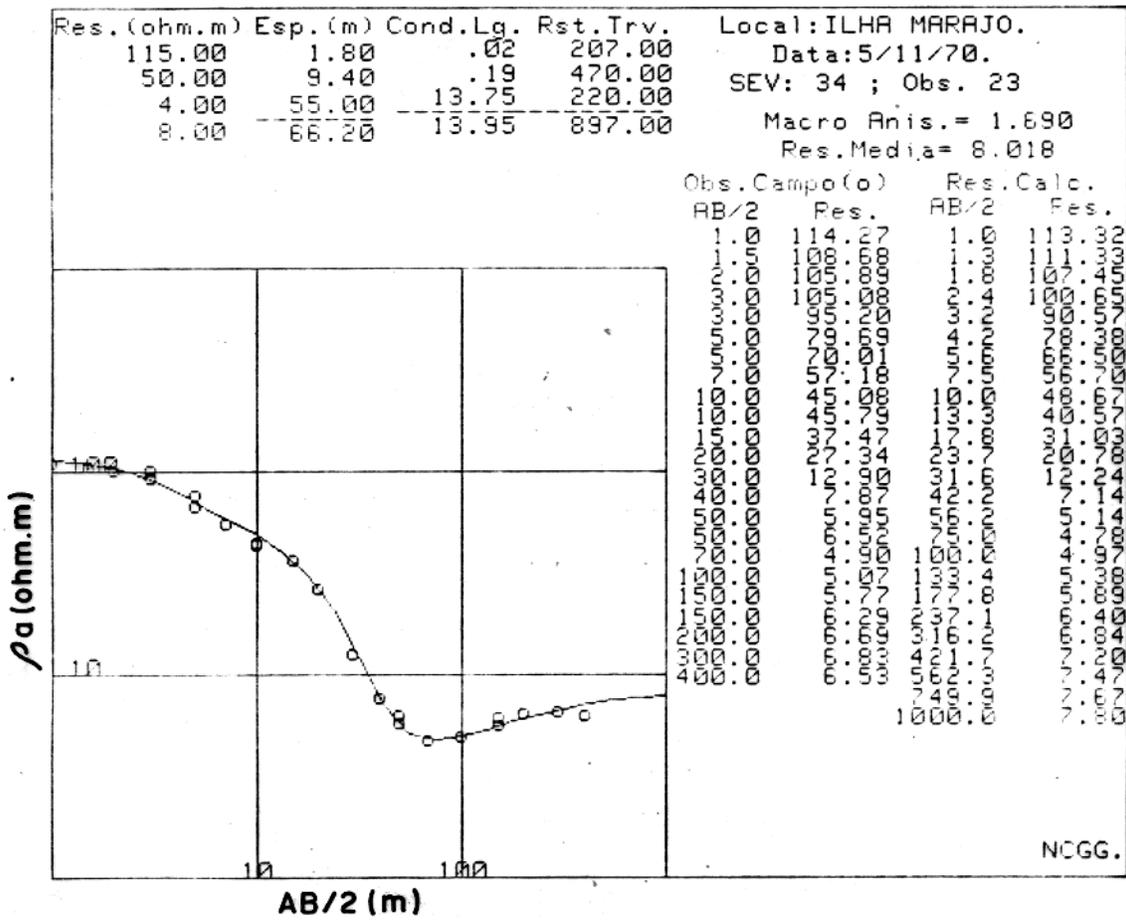


FIG.38 - MODELO INICIAL DA SEV 34.

onde pode-se fazer uma reparametrização em termos de  $T3=p.h3$  (onde só  $T3$  é conhecida com certeza),  $S2=h2/p2$ ,  $S12=h1/p2$ ,  $S23=h2/p3$  (onde só  $S2, S12$  e  $S23$  são conhecidas com certeza), com o fim de diminuir as altas correlações existentes entre os parâmetros.

Parâmetros com altos desvios-padrões usualmente têm altos coeficientes de correlação. Os parâmetros com altos coeficientes de correlação têm desvios-padrões maiores que suas incertezas calculadas, por isso, alguns deles (os altamente correlacionados), não se apresentam com seus desvios-padrões (figura 37).

A matriz densidade de informação reflete a importância e interdependência das derivadas que são elementos da matriz sensibilidade (Glenn e Ward, 1976). Seu estudo pode revelar quais dados geram a informação mais independente. Os dados da matriz densidade de informação para a SEV 34, estão contornados com intervalo de 0,1 na figura 39; onde a informação mais independente está concentrada entre os  $AB/2$  de 10 a 70m, como é indicado nos maiores elementos da diagonal e no dimínio diagonal. No começo e final desta SEV, nos pontos  $AB/2$  de 1 a 1,5m e de 300 a 400 m, tem-se também informação bastante independente (Glenn e Ward, 1976).

A matriz resolução (figura 37), para que os resultados sejam satisfatórios, tem que se parecer à matriz identidade. Vê-se nos resultados que é exatamente isso o que acontece, ou seja, tem-se uma boa resolução em todos os parâmetros devido principalmente a que se trabalhou com posto completo, contando-se assim com o máximo de informação.

A análise feita anteriormente é baseada na saída estatística do programa INVSEM.FOR, valendo dizer que é feita considerando um posto completo e com os parâmetros em forma logarítmica (a qual elimina a colocação de pesos em cada ponto de observação e exclui completamente soluções negativas quanto a resistividade e espessuras do modelo; Rijo et alii, 1977). A outra parte desse programa encontra a derivada das observações com respeito aos parâmetros não logarítmicos calculados ao atingir o mínimo, e faz a decomposição da matriz A (matriz sensibilidade) em seus valores singulares com o fim de estudar sua condição, através da análise dos valores singulares para escolher o melhor posto, e assim, proceder a um novo estudo estatístico, agora com

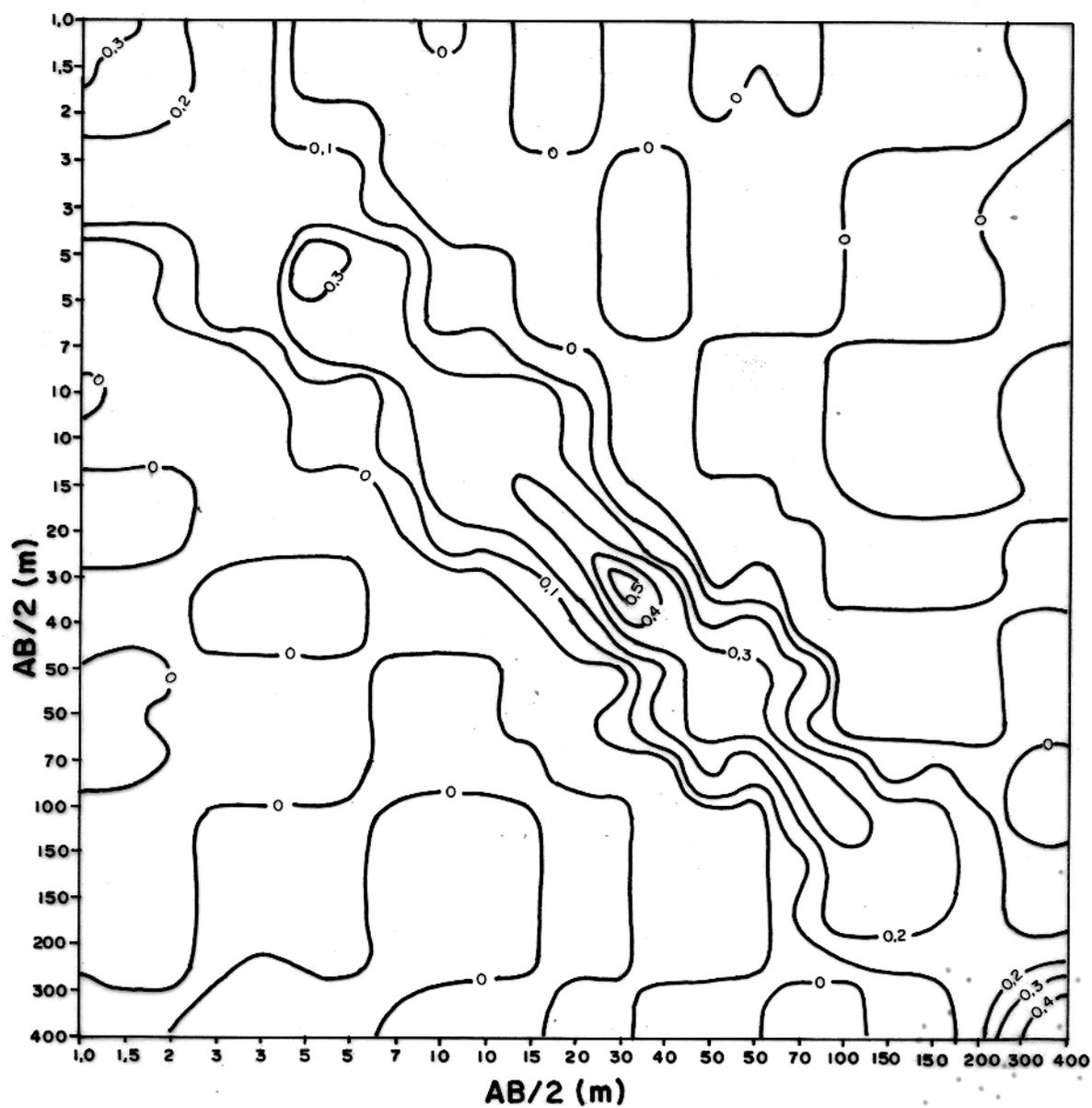


FIG.39 - MATRIZ DENSIDADE DE INFORMAÇÃO PARA A SEV-34.

os parâmetros em sua forma normal

Para a escolha do posto, foi plotada (figura 40) a razão entre dois valores singulares consecutivos versus o posto, tendo o melhor posto para o problema estudado onde resultar a maior amplitude do gráfico (João Batista da Silva, comunicação oral, 1983).

Para a SEV 34, o posto escolhido será neste caso de 2, o que significa que se vai jogar fora muita informação, ou seja, eliminam-se 5 valores singulares para ficar com dois, o que revela que o problema está muito mal colocado. Isto é produto da forte correlação existente entre os parâmetros, o que pode ser visto tanto na matriz correlação logarítmica como na não logarítmica (ambas com posto completo), o que leva o sistema a perto de ser singular. Neste caso, não existem condições para se fazer, com o posto escolhido, o estudo das regiões de confiança e as matrizes correlação, resolução, densidade de informação e covariância para os parâmetros em sua forma normal, precisando-se de uma reparametrização para fazê-lo.

Um fato que deve ser considerado neste caso, é a validade de assumir o modelo de camadas horizontais isotrópicas e homogêneas. Os dados obtidos na região dos campos naturais da Ilha de Marajó foram tomados em estruturas tridimensionais de geologia muito complexa, com fortes variações laterais em suas propriedades físicas, sendo que, foram interpretados com modelos unidimensionais. O ruído, neste caso, pode ser chamado de tridimensional ou ruído do modelo errado. Se estes dados tridimensionais são ajustados exatamente com um modelo unidimensional (sem restrições quanto à geologia), então pode-se acreditar que a interpretação tem pouco valor, obtendo-se os resultados já vistos no modelamento com inversão.

Pode-se assim ver que, apesar de se conseguir um modelo que matematicamente converge e ajusta os dados de campo (segundo procedimento seguido por Rijo et alii, 1977), os parâmetros desse modelamento se encontram altamente comprometidos e a solução não é única, devido, possivelmente a que está-se modelando com um modelo que não corresponde à realidade geológica desta parte da Ilha de Marajó ou a que se trata de um problema clássico de equivalência. Os estudos geológicos desta parte de Marajó,

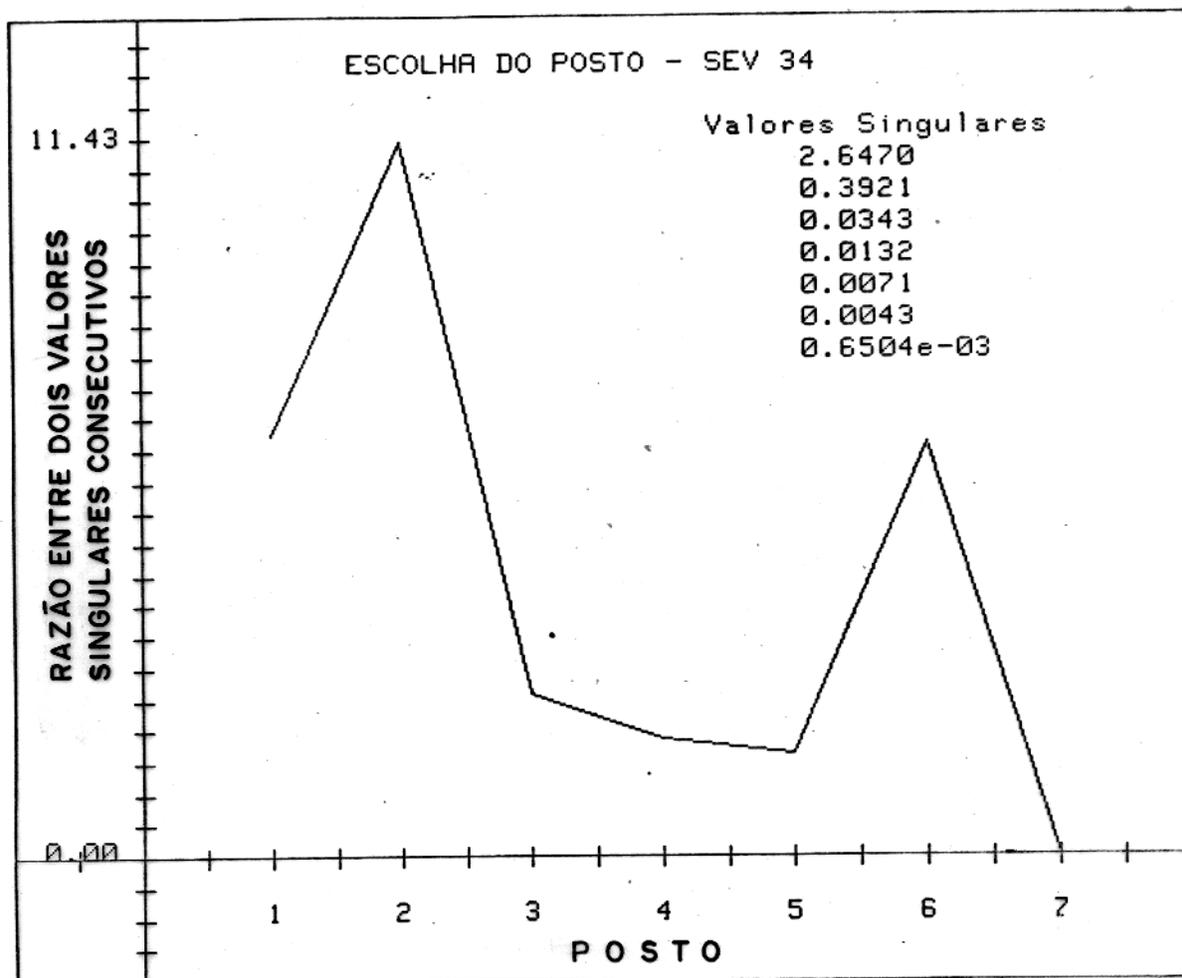


FIG. 40- ESCOLHA DO POSTO NA INVERSÃO DA SEV 34.

sem embargo, levam a acreditar mais na primeira possibilidade. Como consequência disto, uma grande quantidade de modelos geofísicos servem para ajustar os dados experimentais.

#### 4.1.3.2 SEV do Grupo B (Nº 570)

A interpretação desta SEV através do método da inversão, aparece na figura 41, com o seguinte modelo:

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 3,92 \quad \Omega\text{m} & h_1 = 0,60 \text{ m} \\ \rho_2 = 1,21 \quad \Omega\text{m} & h_2 = 32,50 \text{ m} \\ \rho_3 = 19,70 \quad \Omega\text{m} & \end{array}$$

onde  $h$  é a espessura e  $\rho$  é a resistividade da respectiva camada.

O modelo inicial foi (figura 42):

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 4,20 \quad \Omega\text{m} & h_1 = 0,62 \text{ m} \\ \rho_2 = 1,20 \quad \Omega\text{m} & h_2 = 33,00 \text{ m} \\ \rho_3 = 20,00 \quad \Omega\text{m} & \end{array}$$

convergindo para o mínimo apenas com uma iteração, tendo uma função chi-quadrada de  $1,62111 \cdot E-04$ , o que dá um percentual de erro no ajuste entre o modelo e os dados de 2,98%.

Da matriz correlação da figura 41, pode ser visto que existem as seguintes altas correlações:

Correlações Positivas

Correlações Negativas

$$\rho_3 \cdot h_2 \quad (85\%)$$

$$\rho_1 - h_1 \quad (85\%)$$

podendo-se tentar uma reparametrização em termos de  $S1 = h1/\rho1$  e  $T32 = \rho3 \cdot h2$ , onde só  $S1$  e  $T32$  são conhecidos com certeza.

O parâmetro 2 é o único que não está correlacionado com nenhum outro parâmetro, portanto, é o único que pode ser apresentado com suas incertezas na figura 41.

A matriz resolução (figura 41) novamente se apresenta com boa resolução para todos os parâmetros, devido a que (como já foi dito) foi obtida com posto completo, ou seja, o máximo de informação.

Na matriz densidade de informação desta SEV (figu-

**MATRIZ CORRELAÇÃO**

	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$h_1$	$h_2$
$\rho_1$	1,00	0,30	0,08	-0,85	0,20
$\rho_2$	0,30	1,00	0,33	-0,51	0,65
$\rho_3$	0,08	0,33	1,00	-0,13	0,85
$h_1$	-0,85	-0,51	-0,13	1,00	-0,32
$h_2$	0,20	0,65	0,85	-0,32	1,00

**MATRIZ RESOLUÇÃO**

	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$h_1$	$h_2$
$\rho_1$	1,000	0,000	0,000	-0,000	0,000
$\rho_2$	0,000	1,000	-0,000	0,000	-0,000
$\rho_3$	0,000	-0,000	1,000	0,000	-0,000
$h_1$	-0,000	0,000	0,000	1,000	-0,000
$h_2$	0,000	-0,000	-0,000	-0,000	1,000

$X_v^2 = 1,62111 \times 10^4$  (2,98%)

$\bar{\rho}$ (ohm.m)			$\bar{h}$ (m)		
BAIXO	MELHOR	ALTO	BAIXO	MELHOR	ALTO
*	3,92	*	*	0,60	*
1,19	1,21 ± 1,32	1,22	*	32,20	*
*	19,70	*			

$\bar{\rho}$  e  $\bar{h}$  são as estimativas

\* as incertezas são maiores que as calculadas

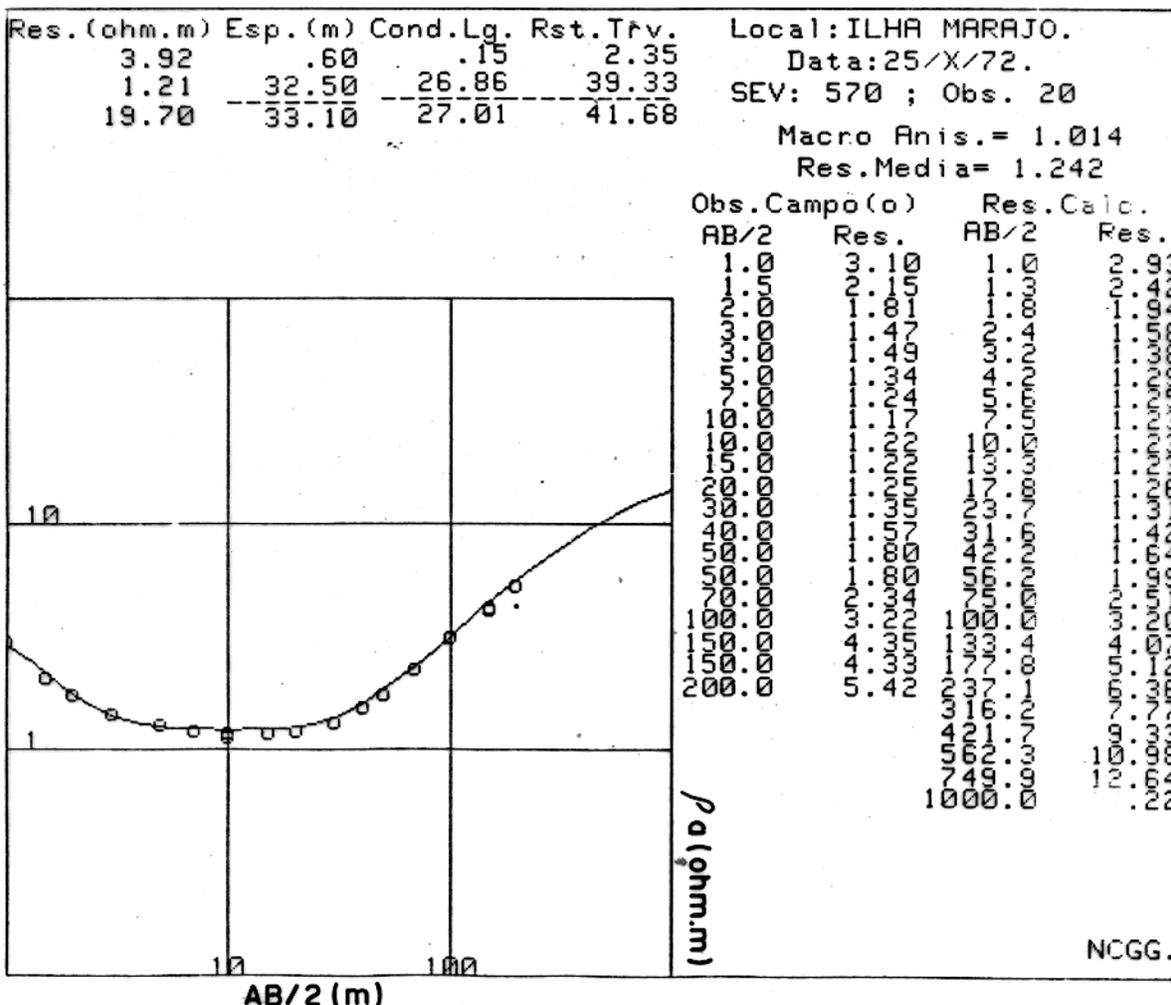


FIG. 41 - INTERPRETAÇÃO DA SEV 570 ATRAVÉS DO MÉTODO DE INVERSÃO.

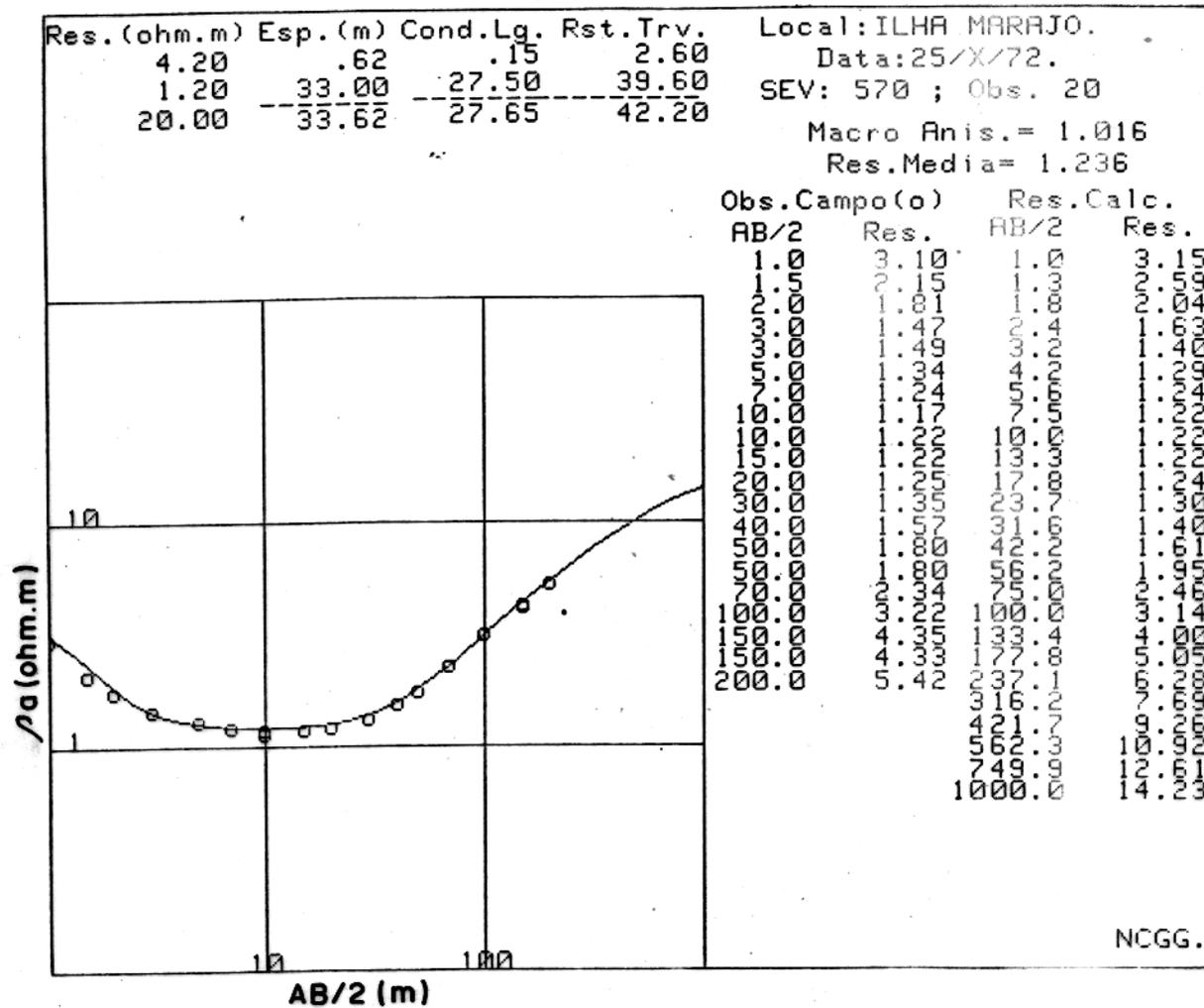


FIG. 42 - MODELO INICIAL DA SEV 570.

ra 43), pode-se observar que os dados de resistividade correspondentes as separações de eletrodos entre AB/2 de 1 a 2m, e entre 150 a 200m apresentam mais independência quanto à informação.

A escolha do posto para esta SEV (figura 44) nos leva a escolher o posto 1, o que significa que está-se eliminando 4 valores singulares, ou seja, está-se eliminando muita informação. Não é de interesse, portanto, fazer aquele estudo estatístico com os parâmetros em forma normal.

Na SEV 570, encontra-se o mesmo tipo de problema que na SEV 34, ou seja, o modelo é insatisfatório devido à alta dependência existente entre os parâmetros, o que leva o sistema matricial a ser perto de singular. Somente dados de resistividade de estruturas muito simples não apresentam este problema, os quais, com a presença de camadas muito finas e pouco representativas nos dados, podem-se ver afetadas e destruir a ortogonalidade do problema (Inman, 1975).

#### 4.1.3.3 SEV do Grupo A (Nº 517)

O modelo que convergiu através da inversão para esta SEV aparece na figura 45, sendo o seguinte:

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 14300,00 \Omega\text{m} & h_1 = 0,86 \text{ m} \\ \rho_2 = 19,00 \Omega\text{m} & h_2 = 12,80 \text{ m} \\ \rho_3 = 60,80 \Omega\text{m} & h_3 = 57,20 \text{ m} \\ \rho_4 = 106,00 \Omega\text{m} & \end{array}$$

onde h é a espessura e  $\rho$  a resistividade de cada camada do modelo.

O modelo usado como tentativa inicial foi (figura 46):

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 13000,00 \Omega\text{m} & h_1 = 1,00\text{m} \\ \rho_2 = 1800,00 \Omega\text{m} & h_2 = 14,00\text{m} \\ \rho_3 = 60,00 \Omega\text{m} & h_3 = 50,00\text{m} \\ \rho_4 = 110,00 \Omega\text{m} & \end{array}$$

precisando-se de 18 iterações para atingir o mínimo. O valor da

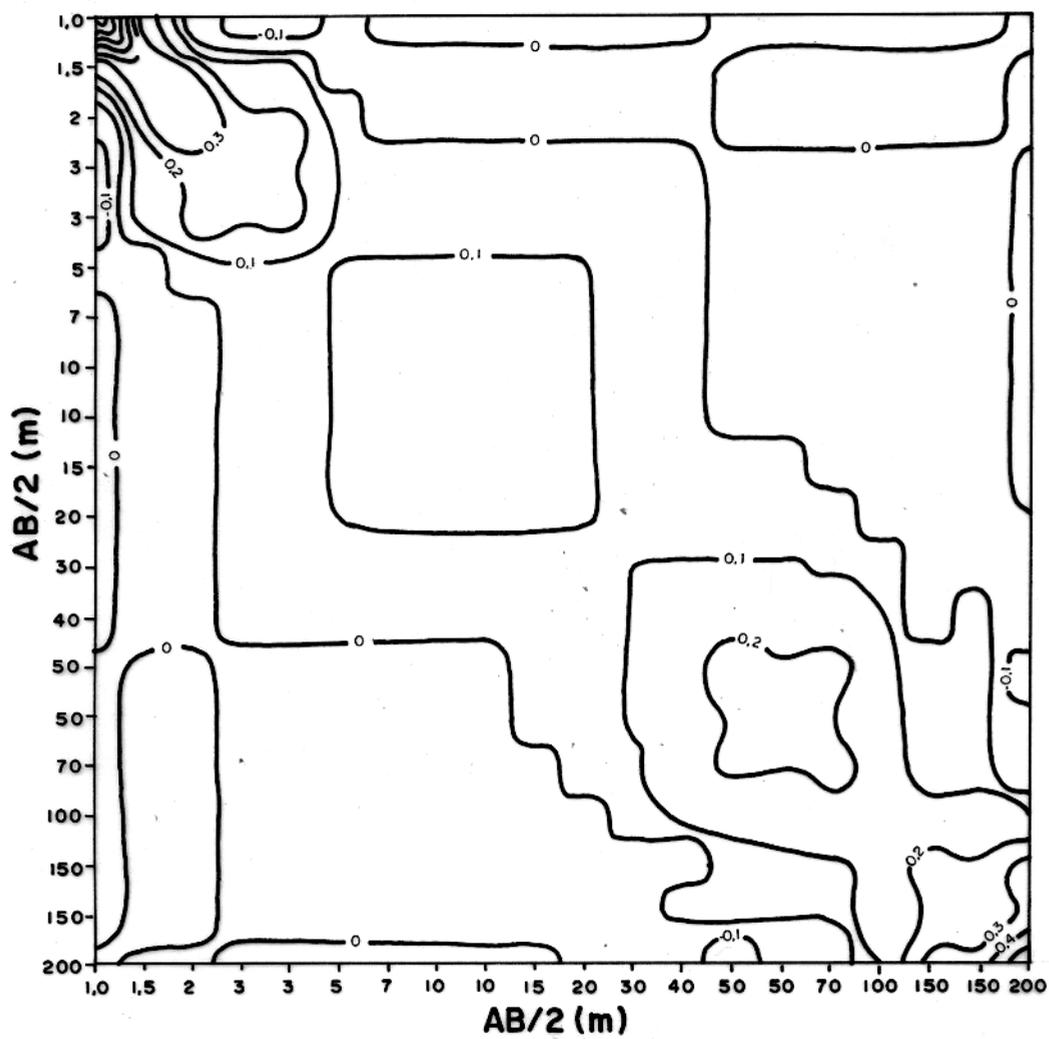


FIG. 43 - MATRIZ DENSIDADE DE INFORMAÇÃO PARA A SEV-570.

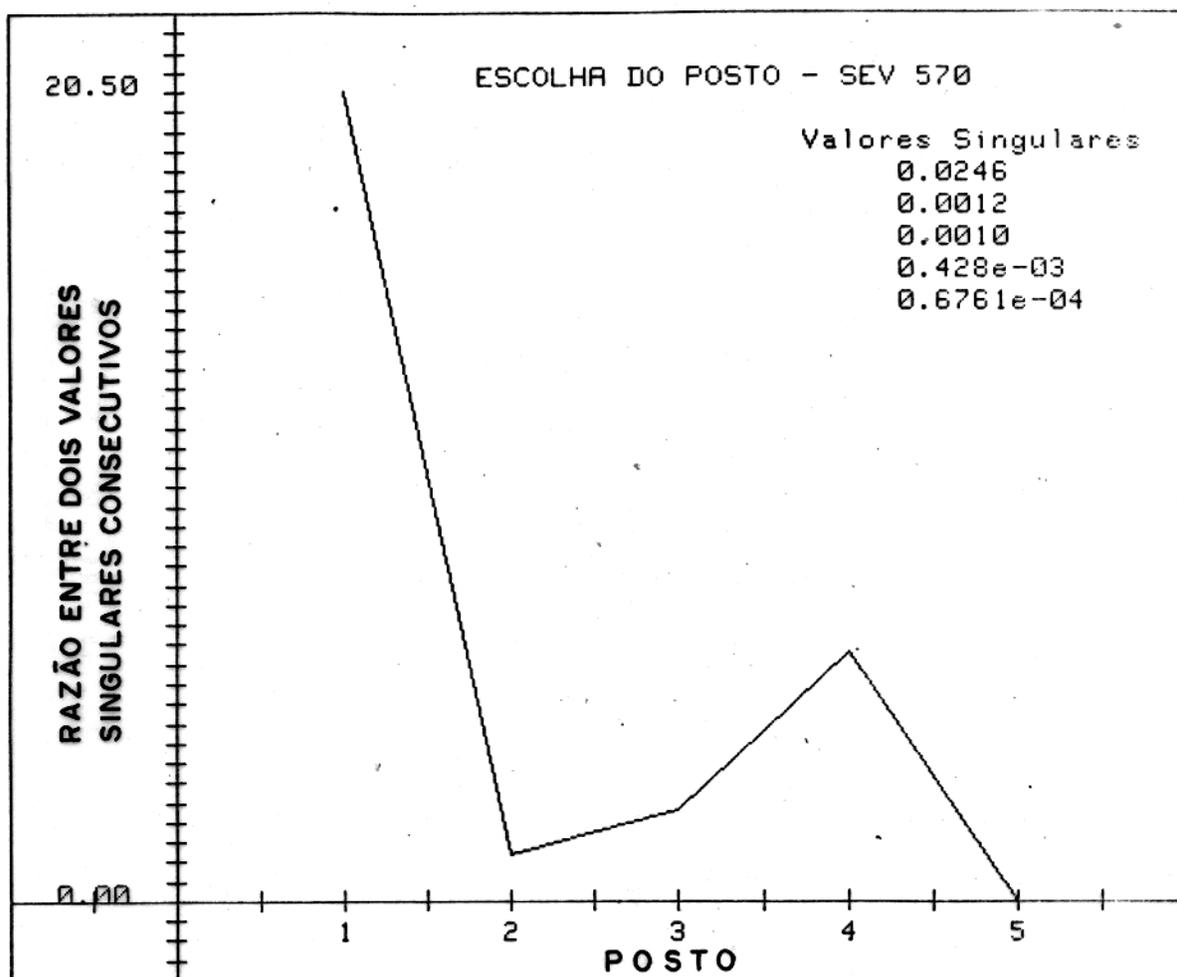


FIG. 44 - ESCOLHA DO POSTO NA INVERSÃO DA SEV 570.





função chi-quadrado reduzida é de  $7,969E-04$ , tendo um percentual de erro de 6,72%.

Na figura 45, deve-se ver que existem as seguintes altas correlações entre os parâmetros:

Correlações Positivas	Correlações Negativas
$\rho_3 - h_3$ (92%)	$\rho_3 - h_2$ (-80%)
$\rho_4 - h_3$ (78%)	$\rho_1 - h_1$ (-81%)

sendo possível tentar reparametrizações em termos de:  $S1=h1/\rho1$ ,  $S23=h2/\rho3$ ,  $T3=\rho3.h3$  e  $T43=\rho4.h3$ , onde só  $S1$ ,  $S23$ ,  $T3$  e  $T43$  são conhecidos com certeza.

O parâmetro 2 é o único que não está correlacionado com os outros parâmetros, por conseguinte, é o único que se pode apresentar com suas incertezas na figura 45.

Todos os parâmetros se apresentam com boa resolução, como pode ser visto na figura 45, sendo que ela foi calculada para posto completo, contando, portanto, com o máximo de informação.

Na figura 47 apresenta os isovalores de matriz densidade de informação para esta SEV, observando-se que se tem maior independência quanto à informação nas observações compreendidas entre as aberturas de eletrodos de corrente AB/2 de 70 a 400m.

O critério para a escolha do posto (figura 48), deu um posto de 2, ou seja, está-se de novo jogando fora os outros 5 autovalores, o que significa que muita informação é perdida. Não é de interesse, neste caso também, fazer o estudo estatístico com os parâmetros em sua forma normal.

Os problemas encontrados nas SEVs anteriores, novamente são encontrados nesta, chegando-se à conclusão de que, provavelmente, estes dados de Marajó apresentam complexidades que não podem ser facilmente modeladas com modelos geofísicos simples, como esse de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas.

#### 4.2 Efeito das Variações Laterais de Resistividade

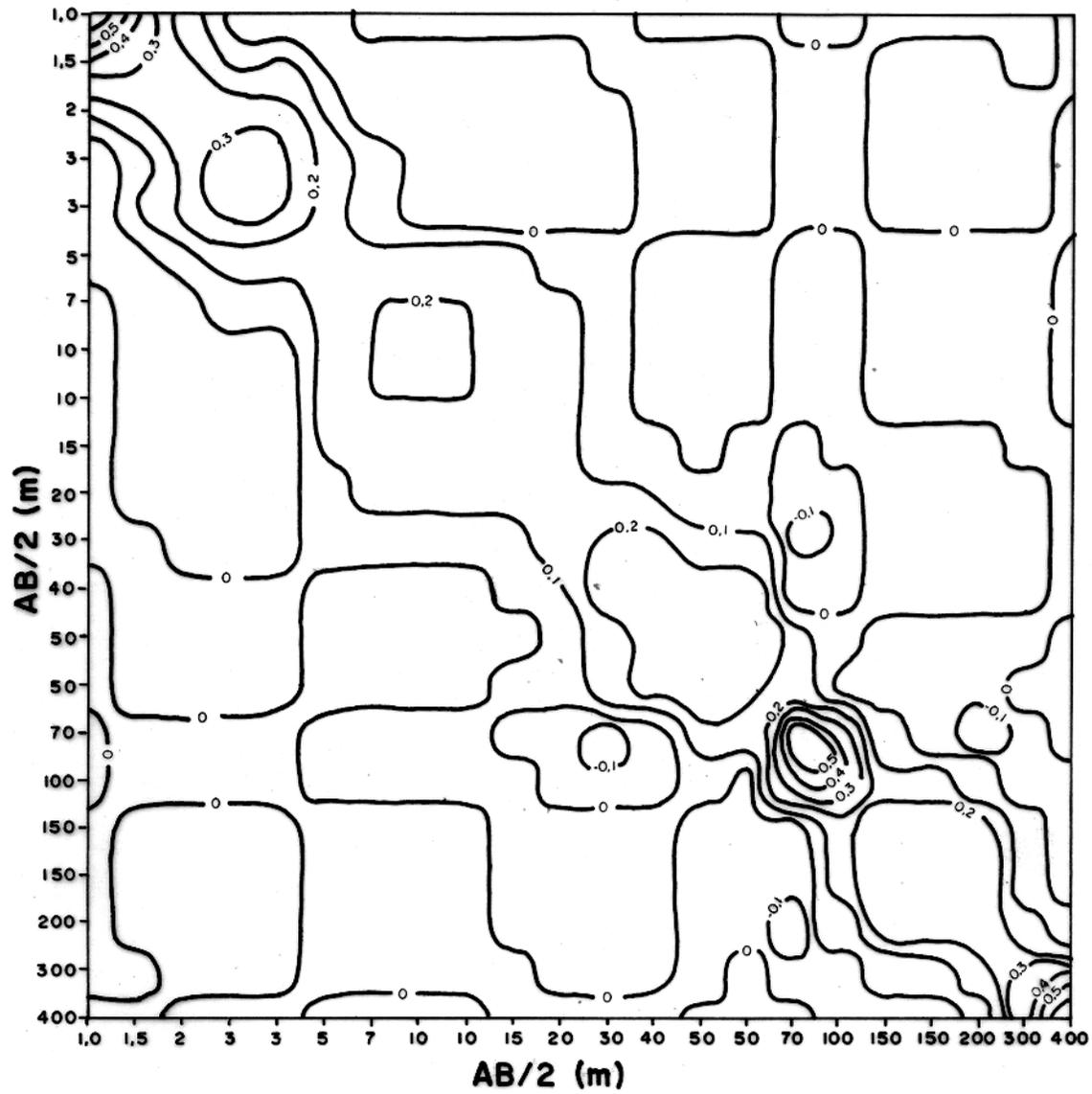


FIG. 47 - MATRIZ DENSIDADE DE INFORMAÇÃO PARA SEV-517.

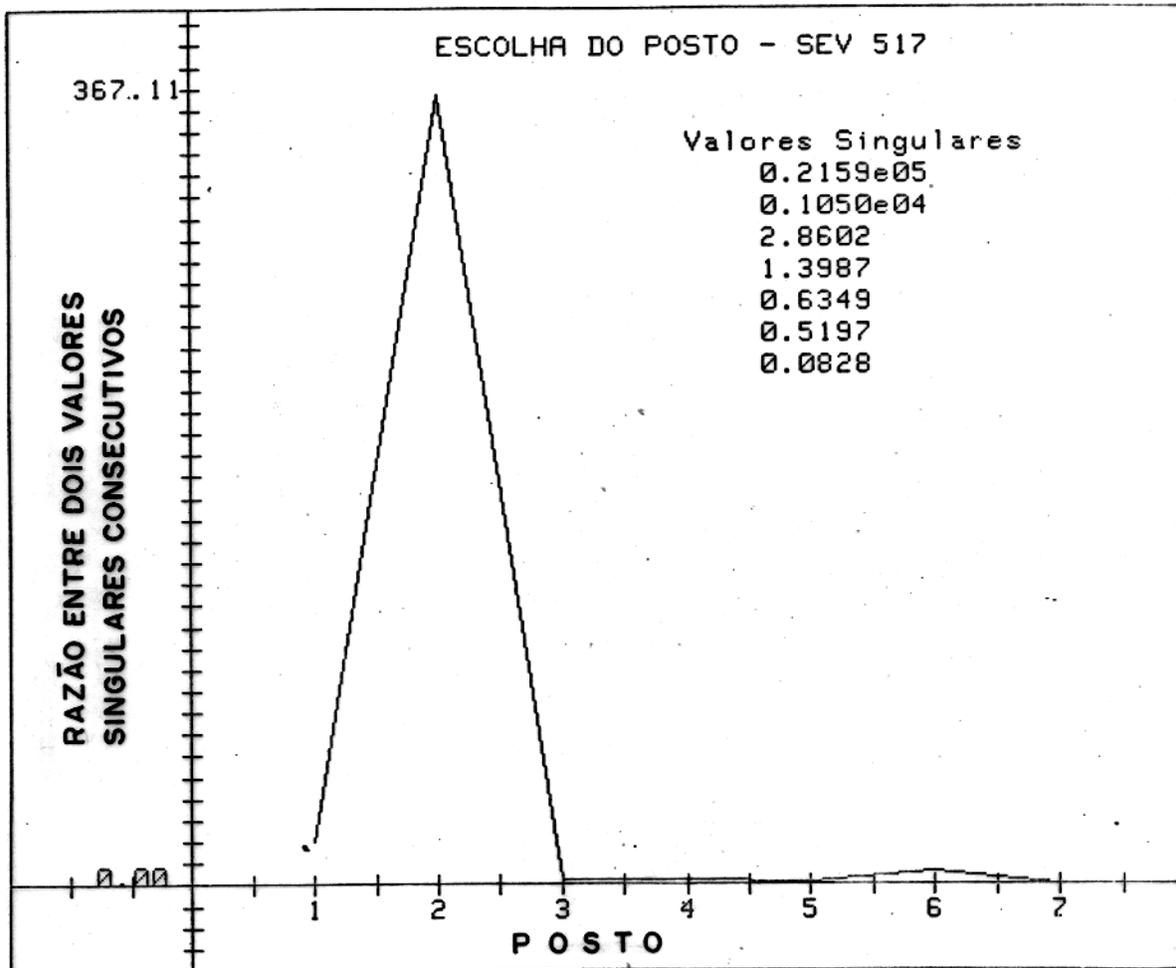


FIG. 48 - ESCOLHA DO POSTO NA INVERSÃO DA SEV 517.

Como foi visto no item anterior, a inversão das três SEVs com o fim de conhecer as incertezas dos parâmetros do modelo ajustado, demonstrou que a alta correlação existente entre eles é produto da escolha de um modelo errado, já que, foi usado um modelo unidimensional de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas para interpretar dados obtidos em estruturas tridimensionais de geologia complexa, com fortes variações laterais em suas propriedades físicas.

Com o fim de apresentar uma alternativa para a interpretação dos dados de Marajó que apresentam estes problemas, usou-se a técnica dos elementos finitos, distribuindo as propriedades físicas (neste caso a resistividade aparente) em uma forma bidimensional, tentando ver a influência que esses contatos laterais têm nos dados das SEVs.

#### 4.2.1 Generalidades do Método de Elementos Finitos

Que é o método dos elementos finitos? O método dos Elementos Finitos é uma técnica de análise numérica para obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas. Embora originalmente tivesse sido desenvolvida para estudar as tensões em estruturas complexas de engenharia, seu uso tem sido estendido e aplicado num amplo campo da mecânica do contínuo. Devido a sua diversidade e flexibilidade como uma ferramenta de análise, tem recebido muita atenção ultimamente, sobretudo, pela disponibilidade de computadores digitais em grande escala, que facilitam as tentativas de encontrar uma solução numérica aproximada dos problemas apresentados, os quais podem apresentar-se com as mais complexas geometrias. A premissa básica deste método é que a região de solução pode ser analiticamente modelada ou aproximada substituindo-se o problema geofísico por um conjunto de elementos discretos. De vez que, estes elementos podem compor juntos uma variedade de formas, eles podem ser usados para representar muitas formas geométricas complexas (Huebner, 1975).

Segundo Rijo (1977a), a formulação da técnica dos elementos finitos é constituída da seguinte forma:

1. A região é dividida em um número finito de subdomínios selecionados como elementos triangulares. Estes ele

mentos estão ligados em pontos nodais comuns e coletivamente aproximados à forma da região.

2. A função contínua desconhecida é aproximada sobre cada elemento por polinômios, selecionados como polinômios lineares, que são definidos usando-se os valores nodais da função contínua. O valor da função contínua em cada ponto nodal é denotada como uma variável a qual é determinada.
3. As equações para o comportamento dos campos potenciais sobre cada elemento são derivadas da equação de Helmholtz usando-se os polinômios lineares definidos e o critério de Galerkin.
4. As regiões de aplicabilidade de Newmann e as condições de contorno são estabelecidas.
5. As equações dos elementos são convertidas em equações matriciais dos elementos.
6. As equações matriciais dos elementos são armadas para formar a equação matricial global. Também o vetor da fonte é construído.
7. A condição de fronteira de Dirichlet é introduzida.
8. O sistema de equações lineares é resolvido.

A teoria dos elementos finitos para a equação de Helmholtz está bem documentada em Zienkiewicz (1977). Uma breve história do método pode ser vista em Huebner (1975). Aplicações práticas do método podem ser encontradas em Coggon (1971), Rodi (1975), Silvester e Haslemi (1972), Snyder (1976) e Swift (1971).

#### 4.2.1.1 Construção da Malha

Um aspecto importante do método dos elementos finitos (segundo Rijo, 1977a) é a construção do modelo discretizado, ou seja, a construção da malha para os elementos finitos.

O primeiro passo na construção da malha é decidir a extensão do modelo finito escolhido para representar a região contínua infinita. O objetivo é selecionar uma região o suficientemente grande para que os valores calculados ao longo da bor-

da externa concordem com aquelas vistas em Rijo, 1977a).

Seguindo a sugestão de Rijo (comunicação oral, 1983), usou-se uma malha de  $225 \times 20$  para o caso da sondagem Schlumberger.

#### 4.2.2 Resultados

##### 4.2.2.1 Comparação dos Modelos

Os resultados do algoritmo RES2.FOR (os quais aparecem calculados só até  $AB/2 = 70m$ , já que, para este estudo, somente corpos rasos apresentam interesse), foram amplamente comparados com diferentes modelos geofísicos de camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas calculados pelo programa SEV2, que como já se sabe, faz cálculos para modelos deste tipo.

Aqui será apresentado apenas um modelo dos tantos que foram comparados, sendo mostrados os resultados para ambos os algoritmos.

O modelo testado aparece na figura 49.

As resistividades aparentes que o programa SEV2 calcula para esse modelo aparecem na figura 50.

As resistividades aparentes, para o mesmo modelo, que o programa RES2.FOR calcula, aparecem na figura 51, onde é feita uma comparação com o modelo calculado pelo programa SEV2.

Vê-se que existe pouca diferença entre os dois resultados (a pequena diferença existente no fim dos pontos calculados pelo programa RES2.FOR é devida aos efeitos de borda da malha utilizada), o que demonstra que os dois programas têm respostas similares para o mesmo modelo geofísico, servindo também como uma confirmação do bom funcionamento do programa RES2.FOR.

##### 4.2.2.2 Teste com um Modelo Bidimensional

Ao introduzir alterações laterais no modelo da figura 49, tal como aparecem na figura 52, pode-se ver a resposta dos diferentes modelos para o programa RES2.FOR nas figuras 53 e 54. Se ambas forem comparadas com a figura 51, ver-se-á claramente a influência que estas variações laterais trazem aos dados da

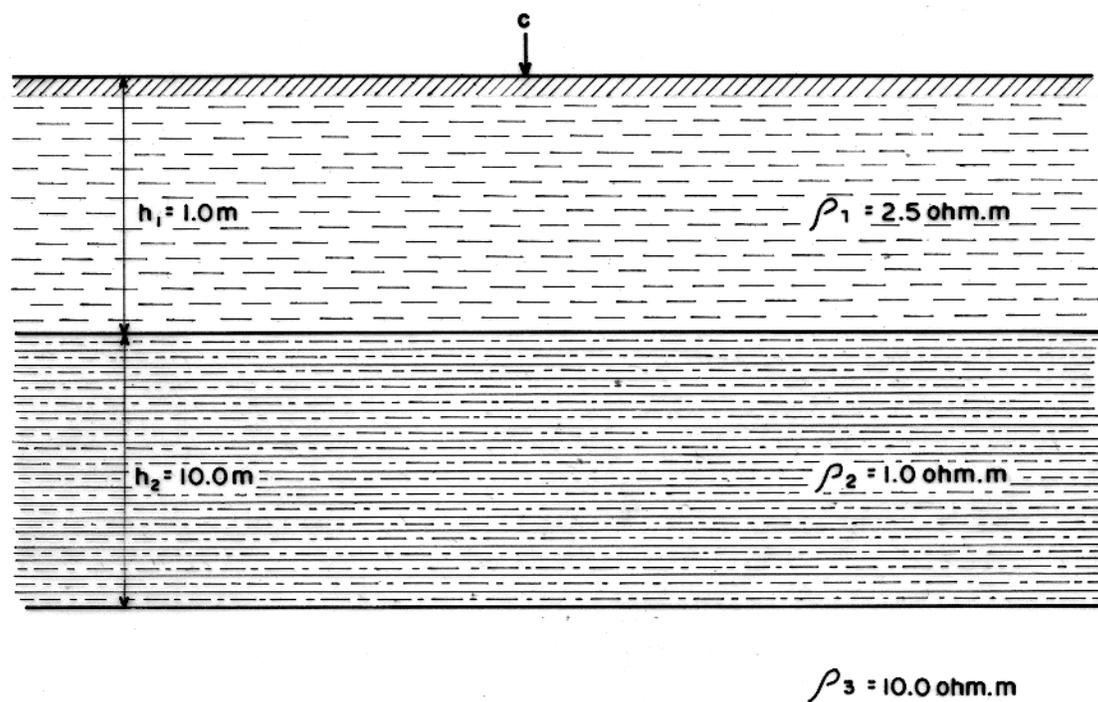


FIG.49- MODELO DE CAMADAS HORIZONTAIS, ISOTRÓPICAS E HOMOGÊNEAS.

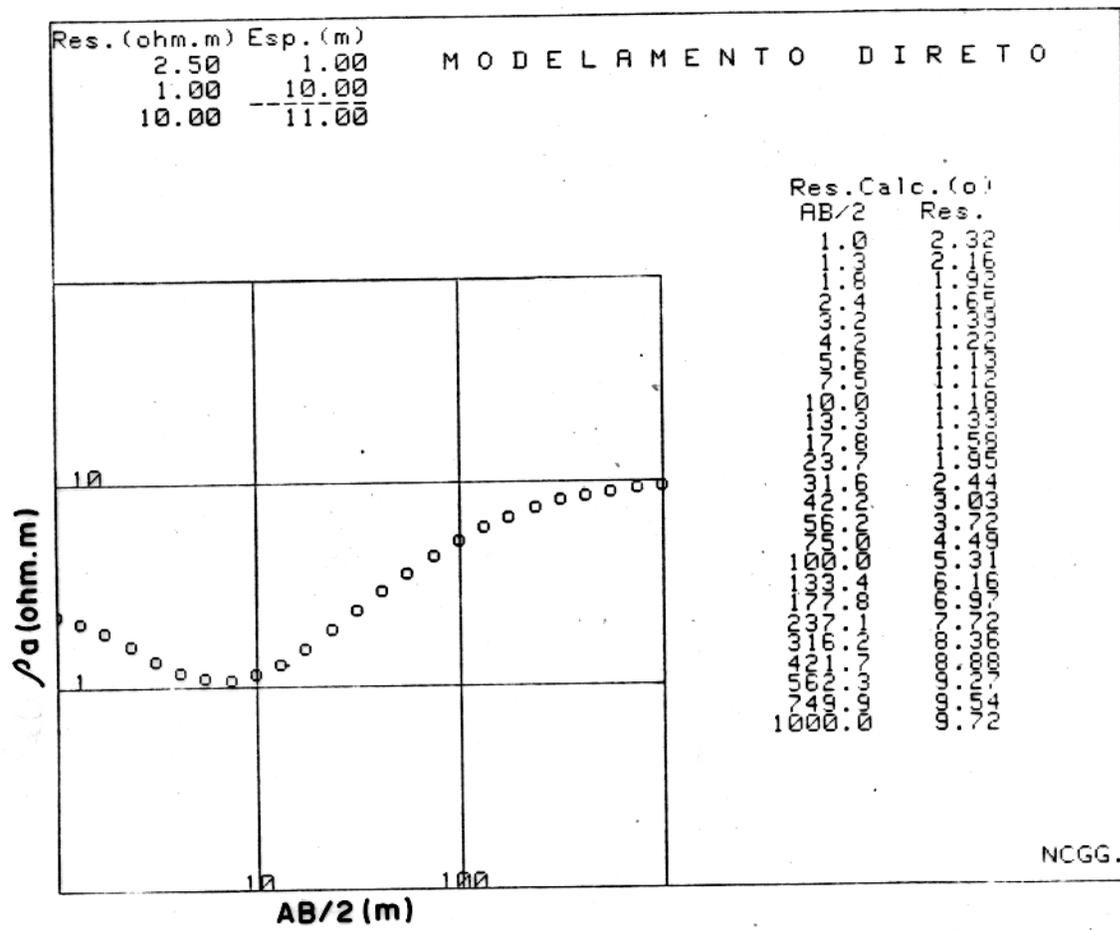


FIG. 50- MODELAMENTO DO TCHIH PELO PROGRAMA SEV2.



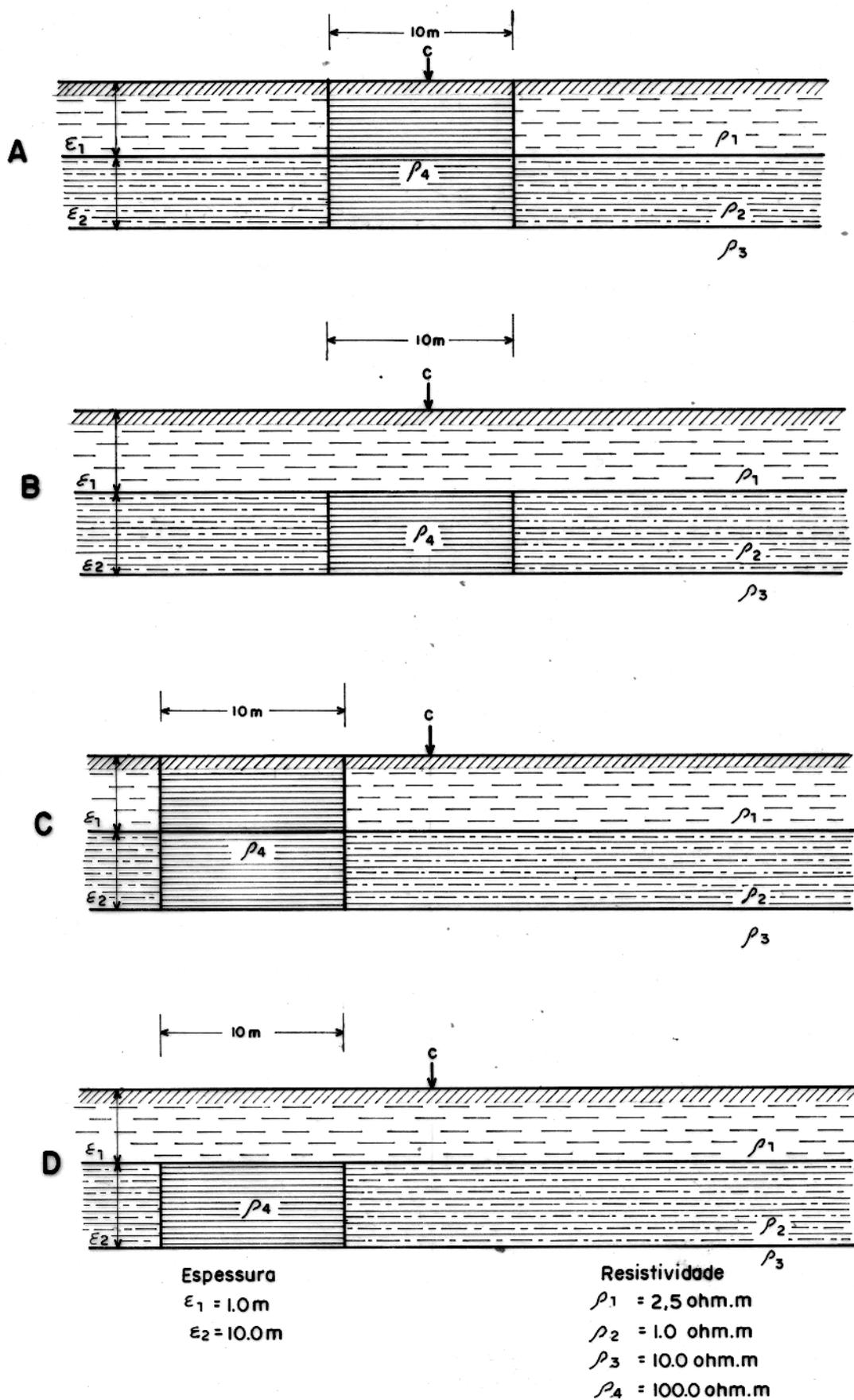


FIG.52 - ALTERAÇÃO DO MODELO DA FIG.49, INTRODUZINDO VARIACÕES LATERAIS.

SEV. Na figura 54 pode-se observar que o ramo terminal das curvas sobe com um ângulo superior  $45^{\circ}$ , descartando-se, deste modo, a possibilidade de que estes dados sejam produtos de modelos de camadas horizontais, com a última camada possuindo resistividades com elevados valores.

Ao interpretar os dados de uma destas SEVs com o programa SEV2 (figura 53, Malha SC2, modelo da figura 52b) vê-se o resultado que aparece na figura 55, onde se constatou uma grande dificuldade de ajustar um modelo.

Ao inverter esta mesma SEV (usando como modelo inicial o da figura 55), depois de 20 iterações encontrou-se um mínimo com erro no ajuste de 12%, que deve ser considerado muito alto. Isto reflete a presença, nos dados, de informações que não estão previstas para serem modeladas com um modelo de camadas estratificadas (uso do modelo errado), apresentando também um modelo que poderia considerar-se fora da realidade. Após estas 20 iterações, este modelo divergiu completamente. Esses resultados apresentam o mesmo tipo de problemas que se teve na inversão das SEVs, do IDESP, ou seja, parâmetros muito correlacionados que possivelmente refletem o uso de modelos geofísicos errados na interpretação dos dados (figura 56).

#### 4.2.2.3 Modelamento de um Paleocanal com Elementos Finitos

A figura 57 apresenta dois modelos bidimensionais para um paleocanal (aflorante e não aflorante), os quais, ao serem calculados através do programa RES2.FOR resultam nas SEVs que aparecem na figura 58, vendo-se neste caso que, quando o paleocanal é aflorante, a influência nos dados é mais evidente, sobretudo nos primeiros pontos. É interessante notar a semelhança existente entre o resultado do modelo do paleocanal aflorante e a SEV do tipo C4.

Resulta também importante observar que a geometria do corpo modelado quando é aflorante tem muita influência na forma da SEV, como pode ser visto nas figuras 53A e 58A, que correspondem aos modelos das figuras 52A e 57A, respectivamente. Quando o corpo é não aflorante, a geometria não tem muita influência na forma da SEV, tam como se vê nas figuras 53B e 58B, as quais

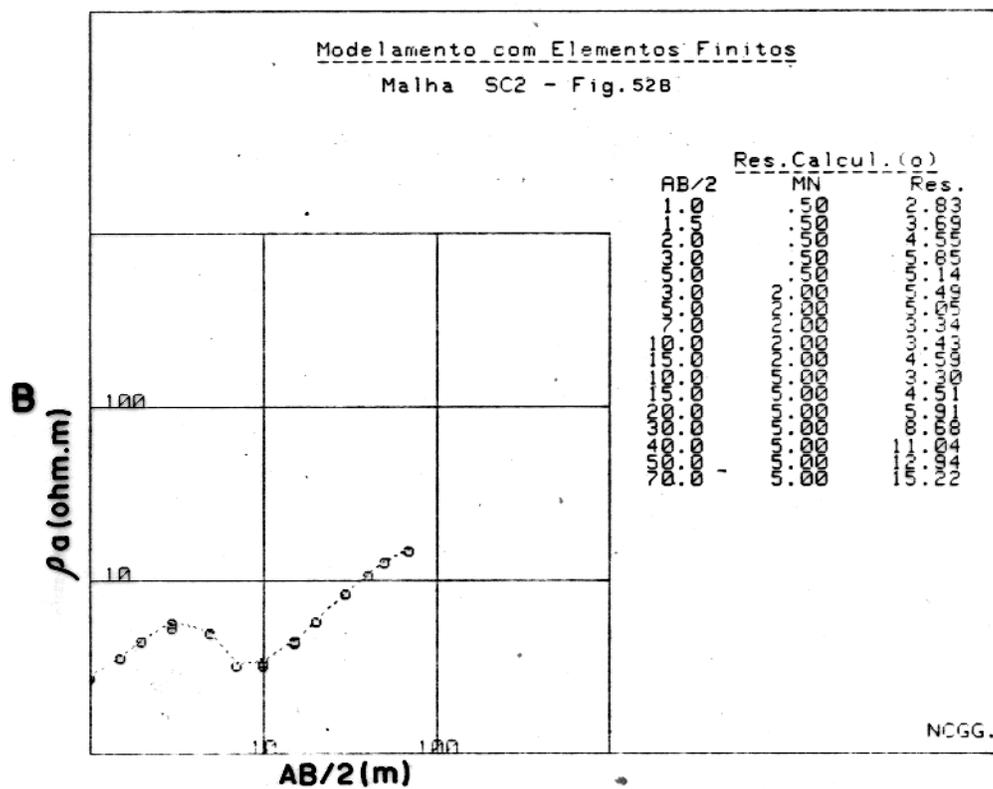
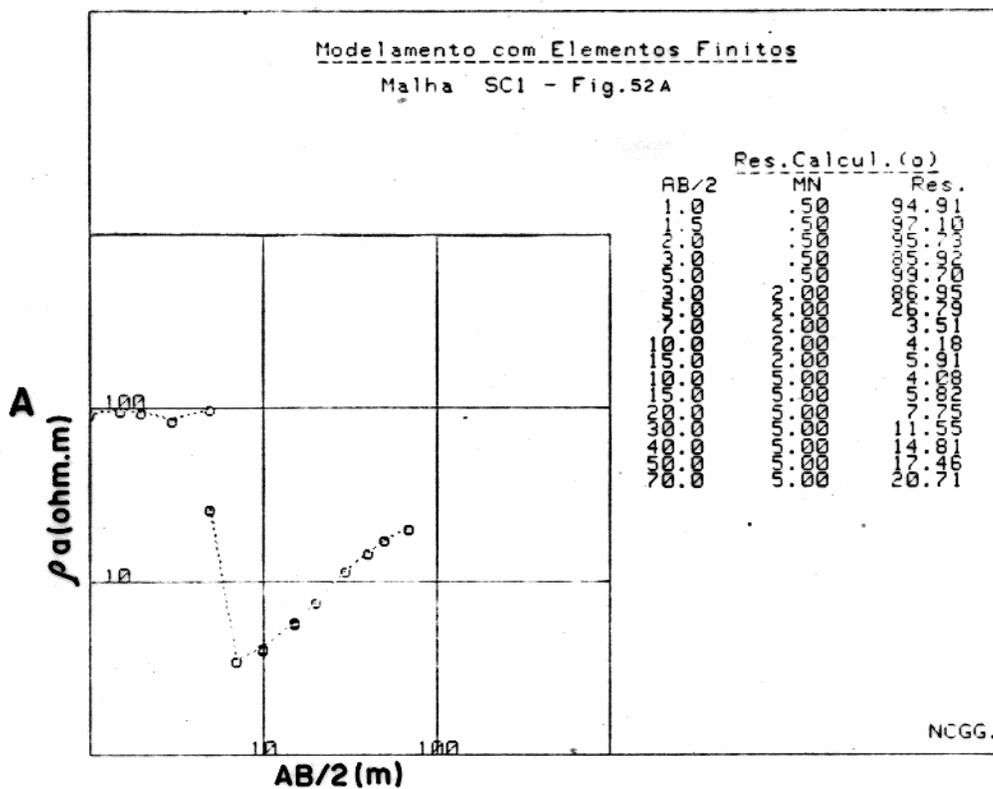


FIG. 53 - MODELAGEM DO ATCHIH (A e B) PELO PROGRAMA RES2.FOR.

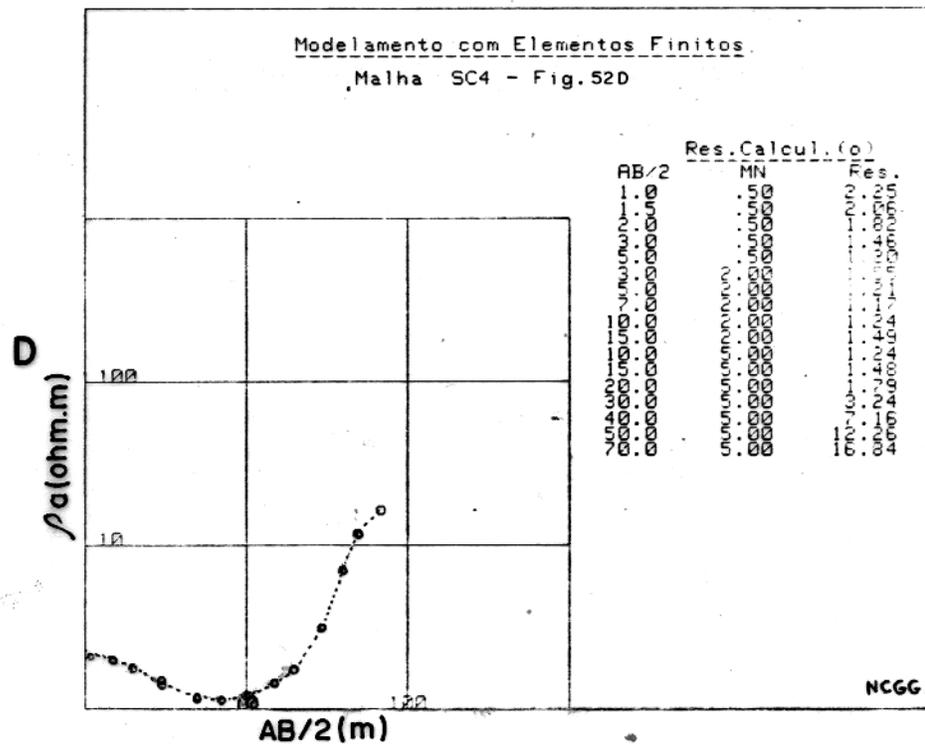
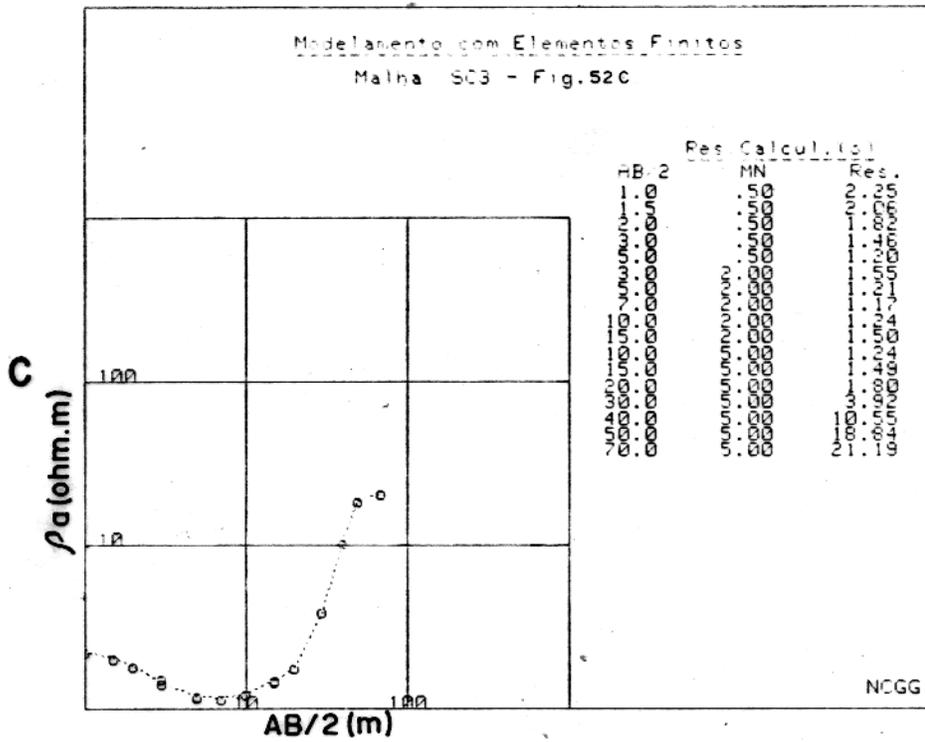


FIG. 54 - MODELAMENTO DO ATCHIH (C e D) PELO PROGRAMA RES2.FOR.

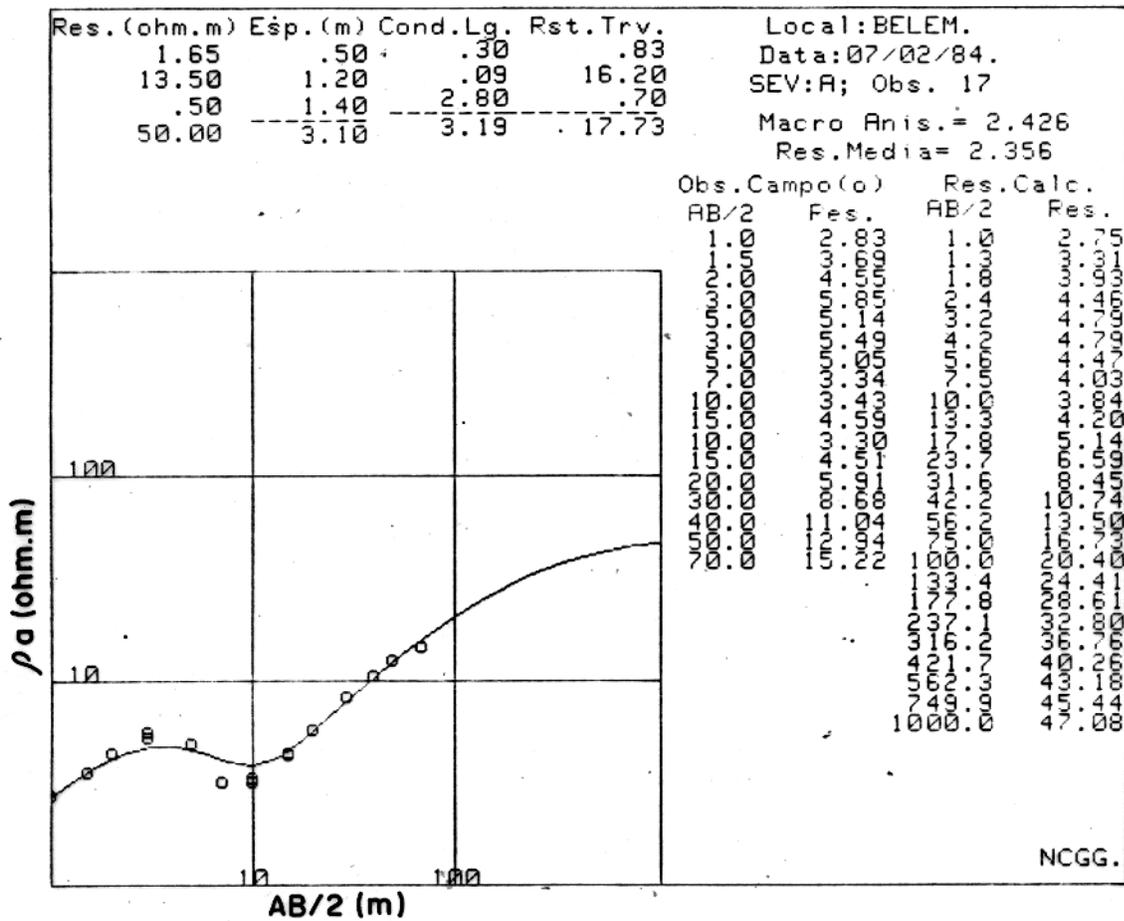


FIG. 55- INTERPRETAÇÃO DO ATCHIH-A COM O PROGRAMA SEV2.

MATRIZ CORRELAÇÃO

	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
$\rho_1$	1,00	0,67	0,72	-0,10	1,00	0,66	-0,71
$\rho_2$	0,67	1,00	0,40	0,18	0,68	1,00	-0,40
$\rho_3$	0,72	0,40	1,00	0,58	-0,71	0,40	1,00
$\rho_4$	-0,10	0,18	0,58	1,00	-0,09	0,18	0,58
$h_1$	1,00	0,69	-0,71	-0,09	1,00	0,69	-0,71
$h_2$	0,66	1,00	0,40	0,18	0,69	1,00	0,39
$h_3$	-0,71	-0,40	1,00	0,58	-0,71	0,39	1,00

$X^2 = 2,41511 \times 10^3 (11,98)$

	BAIXO	MELHOR	ALTO
$\rho_a$ (ohm.m)	*	0,31	*
	*	56,18	*
	*	0,31	*
	*	60,42	*
$h$ (m)	*	0,08	*
	*	0,28	*
	*	0,98	*

$\rho$  e  $h$  são as estimativas

\* As incertezas são maiores que as calculadas

MATRIZ RESOLUÇÃO

	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
$\rho_1$	1,011	0,028	0,026	0,000	-0,002	0,058	0,001
$\rho_2$	0,028	1,278	-0,023	0,000	0,036	-0,323	0,034
$\rho_3$	0,026	-0,023	0,890	0,000	0,029	-0,156	-0,148
$\rho_4$	0,000	0,000	0,000	1,000	0,018	-0,090	-0,158
$h_1$	-0,002	0,036	0,029	0,018	1,048	-0,079	-0,089
$h_2$	0,058	-0,323	-0,156	-0,090	0,079	1,417	0,045
$h_3$	0,001	0,034	-0,148	-0,158	-0,089	0,045	1,063

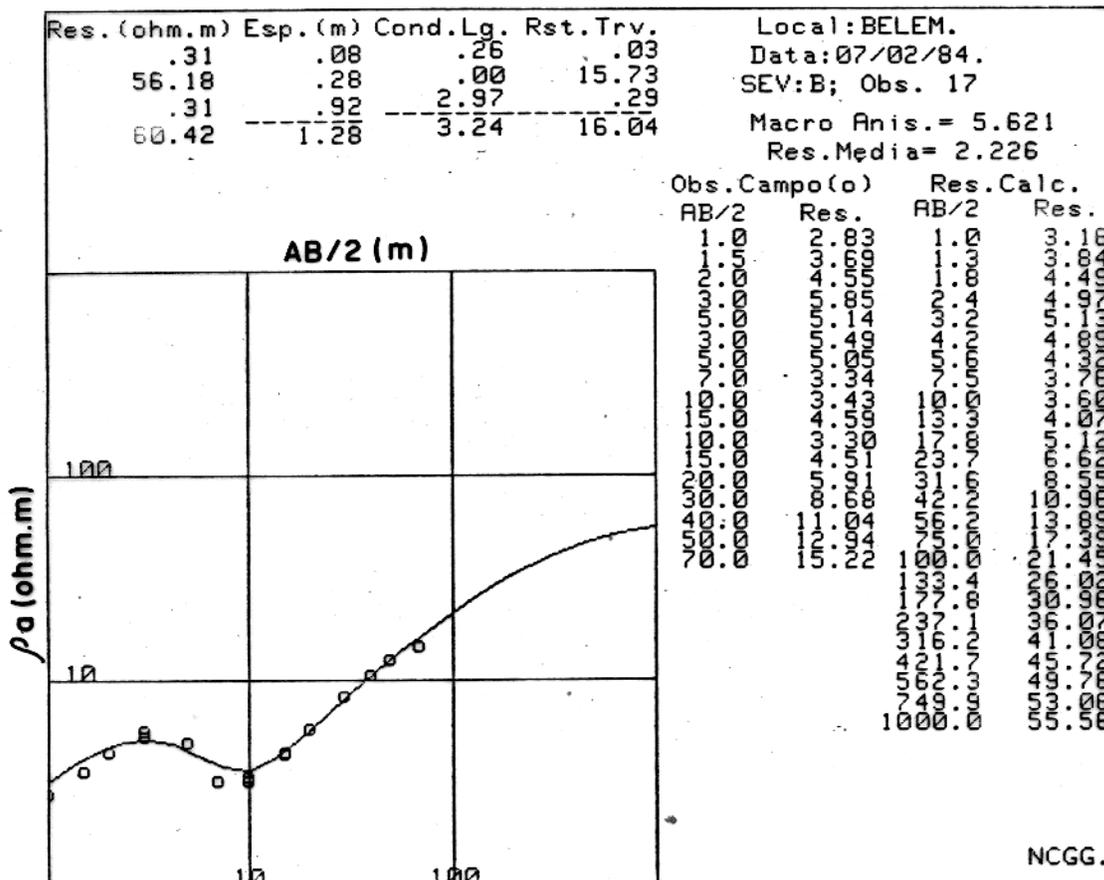


FIG. 56 - INVERSÃO DA ATCHIH - A.

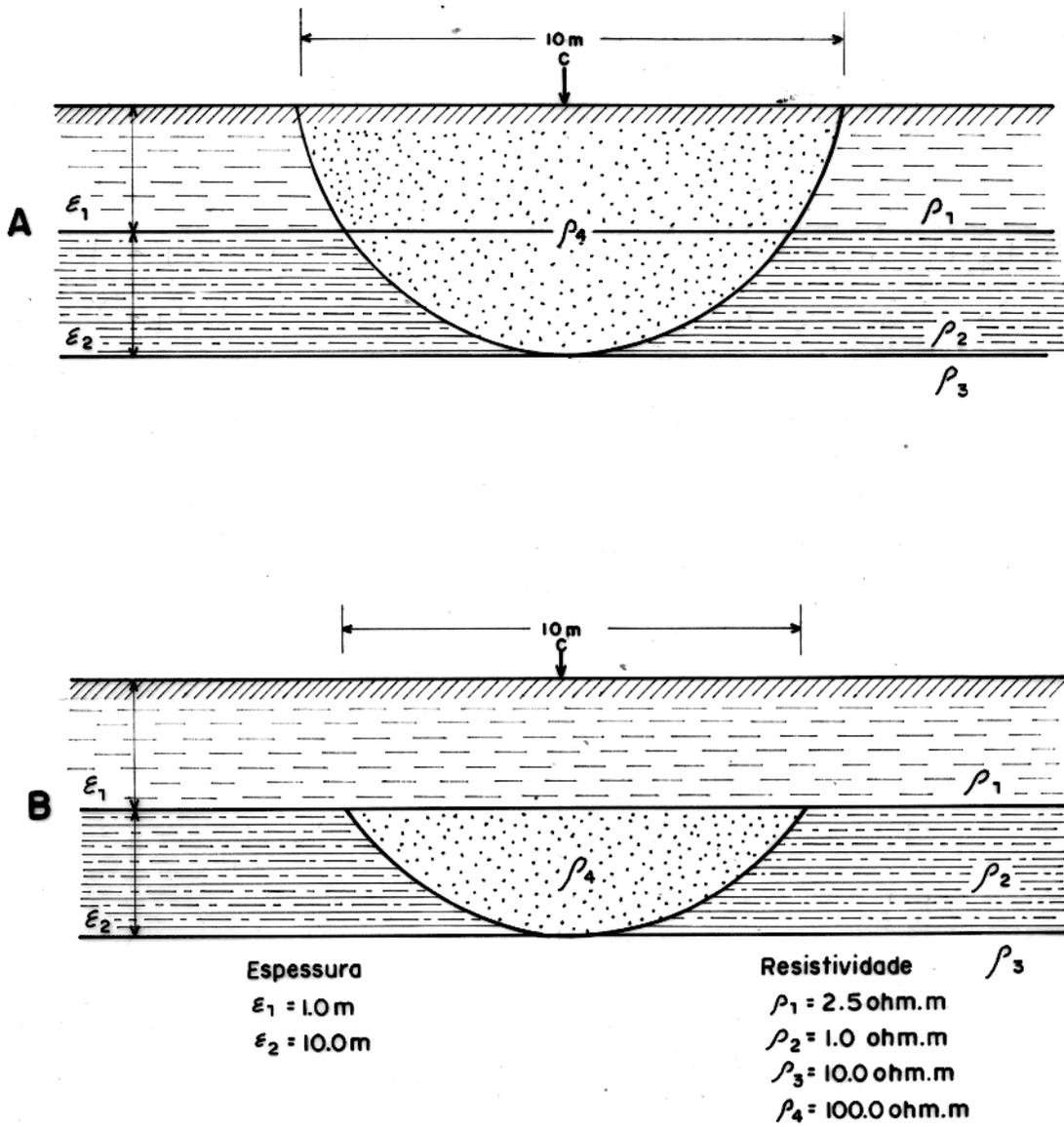


FIG.57 - PALEOCANAL AFLORANTE E NÃO AFLORANTE.



correspondem aos modelos das figuras 52B e 57B, respectivamente.

Também, quando a estrutura bidimensional não está centrada (figuras 52C e 52D), as respostas apresentadas tanto pelo corpo aflorante, como pelo não aflorante não diferem muito uma da outra (figuras 54C e 54D).

## 5 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões apresentadas nesta seção estão fundamentadas nas considerações e conclusões deste e dos demais trabalhos que aqui foram discutidos.

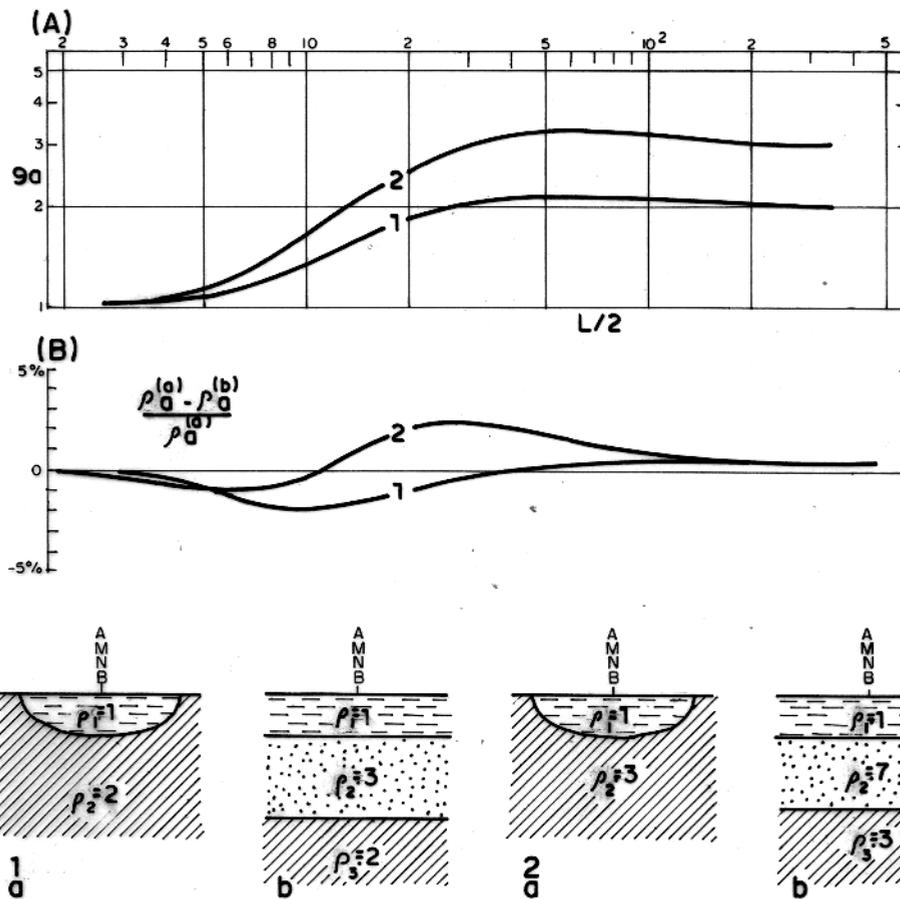
Foi muito bem apontada, por Porsani (1982) a inviabilidade de captar água subterrânea a grandes profundidades por razões técnicas e econômicas, embora seja possível que essa água apresente melhor qualidade. No mesmo trabalho ele mostra que os recursos hídricos dos paleocanais assim como os dos aquíferos rasos representam uma excelente opção para o problema e constituem a alternativa mais adequada às condições da região.

Tendo em vista estas considerações, sugere-se que nos trabalhos geofísicos de detalhe nos paleocanais, seja intensificada a utilização de técnicas que apenas foram testadas (eletromagnético e potencial espontâneo) ou nunca foram utilizadas (polarização induzida, magnetotelúrico, etc.), com o fim de localizar, delimitar e viabilizar o rápido uso desses recursos hídricos tão necessários para o Marajó.

Ao mesmo tempo, deve-se trabalhar no laboratório para o aperfeiçoamento das técnicas de interpretação, com o propósito de considerar geologicamente um paleocanal como ele é na realidade (uma estrutura com propriedades físicas diferentes do meio em que se encontra), abandonando-se o modelo geofísico utilizado até hoje.

A publicação de Mundry e Homilius (1972), dá uma idéia muito boa disso, pois pode-se ver claramente que, embora se obtenham respostas muito similares (figura 59) quando se considera o paleocanal como camadas horizontais ou quando é considerado como um vale de seção cruzada semi-elíptica, na realidade, não se está interpretando a natureza como ela é.

Seria, pois, importante considerar a possibilidade de se realizar um trabalho onde se combinaria uma campanha geofísica de campo (com eletroresistividade e outros métodos, fazendo SEVs em cima de paleocanais cuja geometria seria verificada através de perfurações), com a interpretação automática dos dados no computador, baseando-se em dois modelos interpretativos :



ADAPTADO DE MUNDY E HOMILIUS (1972)

FIG.59- COMPARAÇÃO DE CURVAS PADRÕES PARA UM VALE ELÍPTICO E PARA CAMADAS HORIZONTAIS. A) CURVAS DE SONDAGEM 1 E 2 PARA UM VALE ELÍPTICO (Modelo 1a e 2a). B) DESVIOS DAS CURVAS DE SONDAGEM 1 e 2, DAS CURVAS PADRÕES PARA CAMADAS HORIZONTAIS (Modelos 1b e 2b).

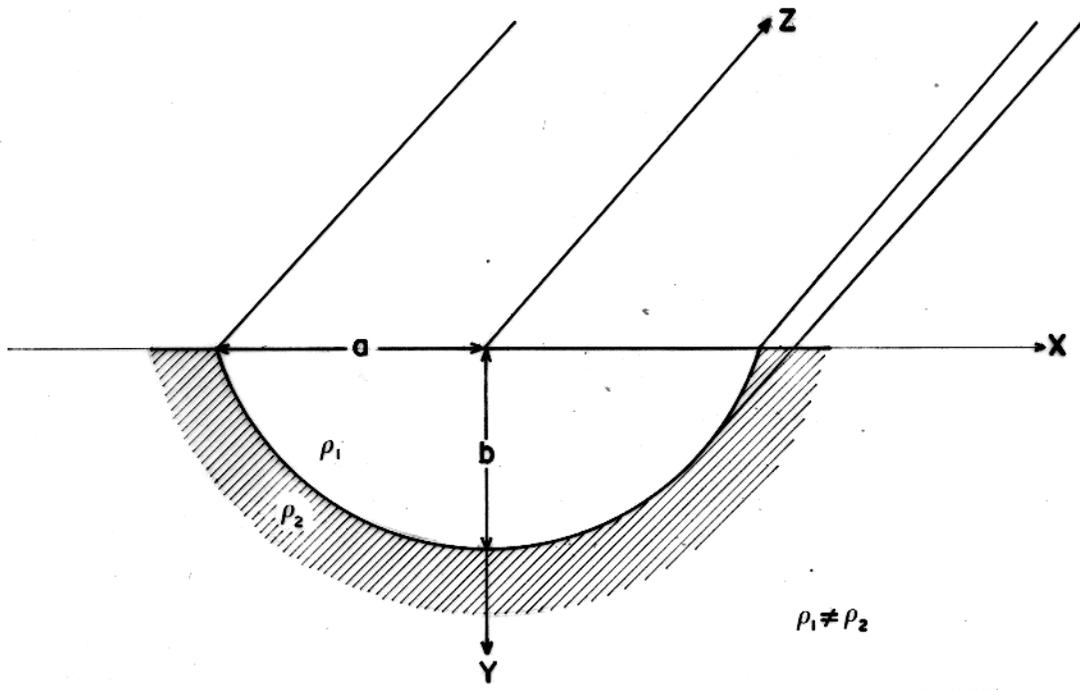
camadas horizontais e corpo em forma de vale com seção cruzada semi-elíptica, fazendo, no final, uma análise das duas interpretações.

Como o programa para a interpretação de camadas horizontais está feito, ficaria por fazer o programa para o outro modelo, o qual levaria à solução de uma integral do tipo:

$$\rho_a = \rho_1 I + 2\rho_1/\pi \left( \rho_2 - \rho_1 \right) \left( \frac{L}{2} \right)^2 \int_0^{\infty} \frac{\lambda \sin \lambda L/2}{\rho_1 \frac{I_0(\lambda a)}{K_0(\lambda a)} + \rho_2 \frac{I_1(\lambda a)}{K_1(\lambda a)}} d\lambda$$

que é a resposta do corpo da figura 60 a configuração Schlumberger do método eletroresistivo. Na expressão,  $\rho_a$  é a resistividade aparente,  $\rho_2$  é a resistividade do meio,  $\rho_1$  é a resistividade do corpo (paleocanal),  $L$  é a separação entre os eletrodos de corrente,  $\lambda$  é a variável de integração,  $I_0$  e  $K_0$  são as funções modificadas de Bessel de ordem 0, e,  $I_1$  e  $K_1$  são as funções modificadas de Bessel da ordem 1. A solução dessa integral pode ser encontrada através do uso de técnicas de filtragem.

A técnica de elementos finitos, como foi visto, pode resultar também de grande ajuda nos casos em que se quer modelar as variações bidimensionais das propriedades físicas de um meio. A desvantagem que ela apresenta é que requer uma grande quantidade de memória para funcionar, o que impede atualmente seu uso em interpretações diretas ou inversas. Por tal razão, sugere-se, nesta seção, a utilização de um modelo de vale elíptico para interpretação de dados geofísicos obtidos em cima de paleocanais.



ADAPTADO DE MUNDY E HOMILIUS (1972)

FIG.60 - SECCÃO CRUZADA DE UM VALE DE SEMI-EIXOS  $a$  E  $b$ , E RESISTIVIDADE  $\rho_1$

## 6 CONCLUSÕES

É importante lembrar que devido ao pouco conhecimento da geologia de subsuperfície da área, as conclusões apresentadas baseiam-se exclusivamente na interpretação geofísica com muito pouco controle geológico. O trabalho teria sido mais completo caso houvesse disponibilidade de melhor controle da geologia, seja através de poços ou de outro tipo de estudo.

Os mapas dos valores de resistividade média, condutância longitudinal total, assim como a análise das famílias de SEVs, mostram a separação da área prospectada em três regiões características:

1. Uma zona altamente condutiva no centro e norte da área, que coincide com terrenos argilosos saturados de água salobra, os quais são formados pela acumulação de sedimentos devido ao processo de erosão de terrenos circunvizinhos. Aqui se encontram localizadas formas meandrantes arenosas (paleocanais) um pouco mais resistivas que a matriz.
2. Uma zona altamente resistiva ao sul e sudeste, que coincide com a parte aflorante do Grupo Pará. Os altos valores de resistividade se devem às camadas arenosas e aos arenitos ferruginosos deste grupo.
3. Uma zona medianamente resistiva a noroeste da área, da qual se tem pouca informação.

Com a interpretação das SEVs foram definidas três sistemas de aquíferos:

1. O primeiro, denominado de aquífero profundo, situado a profundidades maiores que 50m, estendendo-se por toda a região prospectada e estando, provavelmente, associado às camadas superiores de Formação Marajó ou às litologias altamente resistivas das camadas inferiores do Grupo Pará.
2. O segundo, denominado de aquífero raso e de média profundidade, localizado na parte sul e sudeste da região, situado a profundidades compreendidas entre 10 e 50m. Este pode estar associado às camadas arenosas e/ou às

lentes arenosas do Grupo Pará.

3. O terceiro, é constituído por aqueles corpos arenosos (paleocanais, paleopraias e estruturas similares), que se encontram meandранtes e aleatoriamente distribuídos em toda a região dos campos da Ilha de Marajó.

A classificação das SEVs em famílias e a posterior localização destas no mapa, leva a crer que podem existir outras estruturas com características geolétricas idênticas às dos paleocanais, as quais não apresentam expressão geomorfológica nas fotografias aéreas nem nas imagens de radar. Também é importante observar que as SEVs realizadas às margens de atuais cursos de água e na costa de algumas partes de Marajó apresentam comportamento geolétrico igual ao das SEVs realizadas sobre paleocanais e paleopraias, confirmando-se, assim as hipóteses da origem geológica destas estruturas. Além disso, permitem outra possibilidade de explorar recursos de água de melhor qualidade.

O fato de a maioria das SEVs feitas no centro e norte da região dos campos (na matriz argilosa) apresentarem valores do coeficiente de macroanisotropia perto de um e valores de resistividade média baixos ( $\rho_m < 3$ ), leva à conclusão que esse pacote argiloso de cerca de 100m de espessura é bastante isotrópico e homogêneo, localizando-se imediatamente acima do substrato resistivo profundo.

Assim, embora a qualidade de água do aquífero raso e de média profundidade não seja excelente, e, devido ao fato de se desconhecer a qualidade de água do aquífero profundo e ainda, devido à inviabilidade da sua exploração na área, recomenda-se aos habitantes da região sul e sudeste da região dos campos de Marajó, fazer uso dos recursos hidrogeológicos do aquífero raso e de média profundidade. Por outro lado, os habitantes do interior da região dos campos (fazendas de gado), especialmente no centro e norte, tem razões ainda mais fortes para aproveitar os recursos hídricos provenientes dos paleocanais e paleopraias, ou das áreas encontradas com igual resposta geolétrica, visto terem pouco acesso ao aquífero profundo e a região não possuir outros aquíferos rasos a não ser os já mencionados.

É aconselhável os trabalhos futuros, estudar-se de

talhadamente o nível resistivo profundo que se encontra em toda a área estudada, pois representa, provavelmente, um bom aquífero, e poderia solucionar este sério problema da região, acelerando desta forma seu desenvolvimento sócio-econômico. Para isso será necessário um equipamento de levantamento elétrico mais potente do que os existentes atualmente no NCGG (AB/2 de 5km).

O controle químico da qualidade da água de cada um desses aquíferos, assim como a viabilidade do seu uso pela população e os rebanhos, são condições imprescindíveis em qualquer plano de desenvolvimento que se projete para a Ilha.

O uso do método de inversão para interpretar algumas SEVs padrões, junto ao modelamento de estruturas bidimensionais com a utilização dos elementos finitos, revela que nem sempre é recomendável usar um modelo geofísico simples (camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas) para interpretar SEVs realizadas em certos locais de Marajó. Assumir um modelo deste tipo, pode levar ao comprometimento dos parâmetros do mesmo, devido principalmente à impropriedades da escolha de um modelo que não corresponde à realidade geológica destes locais da Ilha de Marajó. Nas regiões de geologia recente (Quaternário), localizadas nos deltas dos grandes rios, os sedimentos são, em geral, bem heterogêneos, apresentando variações laterais bem acentuadas. Neste caso, admitir um modelo simplificado de camadas horizontais pode resultar em erros.

Finalmente, acredita-se que este trabalho contribua de alguma forma para diminuir os problemas do caboclo da Ilha de Marajó, que como se sabe, enfrenta tanto as calamidades ambientais próprias da Ilha, como também as conseqüências de pertencer a uma sociedade pouco desenvolvida e explorada pelos poderosos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, W.L. - 1975 - Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transform integrals. Springfield, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, U.S.A. 25p.
- ASTIER, J.L. - 1975 - Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Madrid, Paraninfo. 344p.
- BECK, J.V.; ARNOLD, K.L. - 1977 - Parameter Estimation in Engineering and Science. New York, John Wiley and Sons. 501p.
- BEMERGUY, R.L. - 1982 - Estudo Sedimentológico dos Paleocanais da Região do Rio Paracauari, Ilha de Marajó - Estado do Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 95p.
- BEZERRA, C.A.C.A. - 1979 - Eletroresistividade aplicada ao estudo de água subterrânea no município de Salvaterra - Marajó - Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 58p.
- BEZERRA, C.A.; SAUCK, W.A. - 1979 - Eletroresistividade aplicada ao estudo de água subterrânea, no município de Salvaterra, Marajó, Pará. In: Reunião Anual da SBPC, 31, Fortaleza, Seção F. p. 455.
- BHATTACHARYA, P.K.; PATRA, H.P. - 1968 - Direct Current Geoelectric Sounding; principles and interpretation. Amsterdam, Elsevier. 155p. (Methods in Geochemistry and Geophysics, 9).
- BRASIL, Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam - 1974 - Levantamento de Recursos Naturais, folha SA.22, Belém. Rio de Janeiro, V.5.
- CAVALCANTE, G.M.L. - 1979 - Geofísica aplicada à prospecção de água subterrânea na área do Rio Paracauari - Ilha de Marajó - Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 88p.
- CAVALCANTE, G.M.L.; SAUCK, W.A.; RIJO, L. - 1978 - Geofísica Aplicada à Prospecção de Água Subterrânea na Área do Rio Paracauari, Ilha de Marajó, Pará: In: Cong.Bras.Geol., 30, Recife, Bol. Nº 1, p.354.
- CAVERO, D. - 1977 - Diccionario Português - Espanhol, Espanhol - Português. Provenza, Ramon Sopena. 1856p.
- CHYBA, J. - 1983 - On the Interpretation of Resistivity Soundings by the Least - Squares Method. Geophysical Prospecting.31(5): 795-799.
- COGGON, J.H. - 1971 - Electromagnetic and Electrical Modelling

- by the Finit Element-Method. Geophysics. 30: 132-155.
- CUTRIM, E.M.C.; SAUCK, W.A. - 1978 - Condutividade das águas da parte Oriental da Ilha e da Baía do Marajó. In: Cong.Bras. Geol., 30, Recife, Bol. n° 1, p.354.
- ESTADOS UNIDOS. Organização dos Estados Americanos - 1974 - Marajó, Um estudo para o seu desenvolvimento. Washington. 124p.
- FENZL, N.; PIUCI, J. - 1977 - Estudio hidrogeológico de las aguas de pequena profundidade en el área-piloto Ponta de Pedras, Ilha de Marajó. In: Anais do Congresso Venezuelano de Geologia, Caracas. p. 83-85.
- FENZL, N.; PIUCI, J. - 1978 - Características Físico-químicas das águas subterrâneas rasas de Ponta de Pedras (Ilha de Marajó) e suas conseqüências para uso humano e agrícola. In: Cong. Bras.Geol., 30, Recife, Bol. n° 1, p. 353.
- FENZL, N.; PIUCI, J. - 1981 - Ensaio de Bombeamento e Métodos Granulométricos para a Determinação das Características Hidrodinâmicas do Aquífero Ponta de Pedras, Marajó. Revista Águas Subterrâneas (ABAS). 4:5-12.
- FENZL, N.; RIJO, L.; PIUCI, J. - 1978 - Tratamento de Dados Geohidrogeoquímicos através do Computador Digital. In: Cong.Bras. Geol., 30, Recife, Bol. n° 1, p. 145-146.
- FENZL, N.; RIJO, L.; PIUCI, J.; GUIMARÃES, P.B.M. - 1980 - Interpretação, classificação e apresentação de dados hidrogeológicos para uso humano e agrícola. In: Cong.Bras.de Águas Subterrâneas, Recife, p. 85.
- FERREIRA, A.B.H. - 1975 - Novo Dicionário da Língua Portuguesa. Rio de Janeiro, Nova Fronteira. 1516p.
- GALLO, G. - 1981 - Marajó, a ditadura da água. 2 ed. Santa Cruz do Arari, "O Nosso Museu". 314p.
- GEOMINERAÇÃO - 1971a - Definição de um programa para o estudo Hidrogeológico da região dos campos naturais da Ilha de Marajó-Relatório de atividades. Rio de Janeiro. 9p.
- GEOMINERAÇÃO - 1971b - Estudo hidrogeológico da Ilha de Marajó - Pará - Relatório de Atividades, N°1. Rio de Janeiro. 8p.
- GEOMINERAÇÃO - 1972 - Estudo Hidrogeológico por Prospecção Elétrica, Ilha de Marajó - Pará - Relatório Parcial do trabalho completado entre 20 de outubro e 30 de novembro. Rio de Janeiro. 8p.
- GEOMINERAÇÃO - 1973 - Estudo Hidrogeológico por Prospecção Elé-

- trica. Ilha de Marajó - Pará - Relatório Final. Belém, 24p.
- GHOSH, D.P. - 1971 - The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*. 19(2):192-217.
- GLENN, W.E.; WARD, S.H. - 1976 - Statistical Evaluation of Electrical Sounding Methods. Part I: Experimental Design, *Geophysics*. 41(6A):1207-1222.
- GOL'TSMAN, F.M. - 1977 - Problems of the Statistical Information Theory of the Interpretation of Geophysical Observations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 13(12):873-879.
- GRANT, F.S.; WEST, G.F. - 1965 - Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York, McGraw Hill. 584p.
- GUERRA, A.T. - 1956 - Terrasses e Pointes dans l'île de Marajó. In: Premier Report Congrès International de Géographie, 18. Rio de Janeiro, V.5, p.65-69.
- GUERRA, A.T. - 1980 - Dicionário Geológico - Geomorfológico. 6 Ed. Rio de Janeiro, IBGE. 446p.
- GUIMARÃES, P.B.M. - 1983 - O Efeito do "Strike" de estruturas Geológicas de duas Dimensões em Pseudo-Seções de IP-Resistividade. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 90p.
- GUIMARÃES, P.P.D. - 1983 - Métodos Sísmicos de Refração e Eletromagnético Aplicados ao Estudo de um Paleocanal da Ilha de Marajó, Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 87p.
- HOERL, A.E.; KENNARD, R.W. - 1970a - Ridge Regression. Biased estimation for Nonorthogonal Problems. *Technometrics*. 12:55-67.
- HOERL, A.E.; KENNARD, R.W. - 1970b - Ridge Regression: Applications to Nonorthogonal Problems. *Technometrics*. 12:69-82.
- HOVERSTEN, G.M.; DEY, A.; MORRISON, H.F. - 1982 - Comparison of Five Least - Squares Inversion Techniques in Resistivity Sounding. *Geophysical Prospecting*. 30: 688-715.
- HUEBNER, K. - 1975 - The Finite Elements Method for Engineers. New York, John Wiley and Sons. 500p.
- IBGE - 1979a - Culturas temporárias e permanentes; Pará. Rio de Janeiro. p. 93-116 (Produção Agrícola Municipal, 6).
- IBGE - 1979b - Culturas temporárias e permanentes; Pará. Rio de Janeiro. p. 117-136 (Produção Agrícola Municipal, 6).
- IBGE - 1980a - Região Norte-Pará. Rio de Janeiro. p. 39-59 (Produção da Pecuária Municipal, 8).
- IBGE - 1980b - Sinopse preliminar do censo demográfico. Rio de Ja-

- neiro. (Recenseamento Geral do Brasil, 9, V.1, Tom.1, N° 5) .  
45p.
- IBGE - 1982 - Sinopse preliminar do censo agropecuário. Rio de Janeiro. (Recenseamento Geral do Brasil, 9, V.2, Tom.1, N°3).  
146p.
- INMAN, J.R. - 1975 - Resistivity Inversion with ridge regression. *Geophysics*. 40:789-817.
- INMAN, J.R.; RYU, T.; WARD, S.H. - 1973 - Resistivity Inversion. *Geophysics*. 38:1088-1108.
- JOHANSEN, H.K. - 1977 - A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Soundings over a Horizontally Stratified Earth. *Geophysical Prospecting*. 25(4):667-691.
- KELLER, G.V.; FRISCHNECHT, F.C. - 1966 - Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Oxford, Pergamon Press, 517p.
- KOBAYASHI, C.N. - 1979 - Métodos geofísicos aplicados à Prospecção de água subterrânea no município de Ponta de Pedras. Ilha de Marajó - Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 143p.
- KOBAYASHI, C.N. - 1982 - Eletroresistividade e Sísmica de Refração no Estudo de Água Subterrânea em Marajó, Pará. *Revista Águas Subterrâneas*. 5:33-43.
- KOBAYASHI, C.N.; RIJO, L. - 1980 - Eletroresistividade Aplicada à Prospecção de Água Subterrânea Potável no Município de Soure. In: Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1, Recife, p. 71-84.
- KOBAYASHI, C.N.; SAUCK, W.A.; RIJO, L. - 1978 - Métodos Geofísicos Aplicados à Prospecção de Águas Subterrâneas no Município de Ponta de Pedras, Ilha de Marajó, Pará. In: Cong. Bras. Geol., 30, Recife, Bol. N° 1, p.352.
- KOEFOD, O. - 1979 - Geosounding Principles 1, Resistivity Sounding Measurements. Amsterdam, Elsevier. 276p.
- KOEFOD, O.; GHOSH, D.P.; POLMAN, G.L. - 1971 - Computation of Type curves for electromagnetic depth Sounding with a Horizontal Transmitting coil by means of Digital Linear Filter. *Geophysical Prospecting*. 20(2):406-420.
- KUNETZ, G. - 1966 - Principles of direct current resistivity Prospecting. Berlin, Gebrüger Borntraeger, 99p.
- MARQUARDT, D.W. - 1970 - Generalized Inverges, Ridge Regression, Biased Linear Estimation, and Nonlinear Estimation. *Technometrics*. 12:591-612.

- MUNDRY, E.; HOMILIUS, J. - 1972 - Resistivity Measurements in Valleys with Elliptic Cross - Section. Geophysical Prospecting. 20:341-362.
- ORELLANA, E. - 1972 - Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Madrid, Paraninfo. 523p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971a - Avaliação dos Recursos Hidrogeológicos da Ilha de Marajó, Estado do Pará - Relatório Parcial. Belém, 2p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971b - Avaliação dos Recursos Hidrogeológicos da Ilha de Marajó, Estado do Pará - Relatório referente a 8.500 km<sup>2</sup>. Belém. 4p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971c - Avaliação dos Recursos Hidrogeológicos da Ilha de Marajó - Estado do Pará - Relatório Parcial, N<sup>o</sup> 4. Belém. 11p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971d - Nota Concernente a realização dos trabalhos de Prospeção Geofísica na Ilha de Marajó. Belém. 3p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971e-SRN - G.E. de Hidrologia, Projeto Marajó, subprojeto: Levantamento Geofísico - Relatório de Atividades. Belém. 7p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1971/1972 - Levantamento Geofísico por Eletroresistividade na Ilha de Marajó. Belém. 26p.
- PARÁ. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP) - 1974 - Estudos Integrados da Ilha de Marajó. Belém. 333p.
- PELTON, W.H.; RIJO, L.; SWIFT Jr., C.M. - 1978 - Inversion of Two - Dimensional Resistivity and Induced - Polarization Data. Geophysics. 43:788-803.
- PETRICK, W.R.; PELTON, W.H.; WARD, S.H. - 1977 - Ridge Regression Inversion Applied to Crustal Resistivity Sounding Data from South Africa. Geophysics. 42:995-1006.
- PIUCI, J. - 1979 - Hidrogeologia da Área Piloto de Ponta de Pedras, Ilha de Marajó - Pará. Tese de Mestrado. Belém, UFPa - NCGG. 143p.

- PIUCI, J.; FENZL, N. - 1978 - Variação do quimismo das águas subterrâneas para o uso humano. In: Reunião Anual da SBPC, 30, São Paulo. p. 394-395.
- PIUCI, J.; FENZL, N. - 1981 - Ocorrência consequência e remoção do ferro nas Águas Subterrâneas. Revista Águas Subterrâneas (ABAS). 4:29-40.
- PORSANI, M.J. - 1978 - Relatório da disciplina Geofísica de Campo - Região do Rio Paracauari - Ilha de Marajó. Belém, Curso de Pós-graduação, UFPa-NCGG. 48p. (Inédito).
- PORSANI, M.J. - 1982 - Paleocanais, uma opção para a Prospecção de Águas Subterrâneas Rasa na Ilha de Marajó. Tese de Mestrado. Belém, UFPa-NCGG. 109p.
- PORSANI, M.J.; RIJO, L.; BISCHOFF, J.H.; FONSECA, N.R.M. - 1980 - Métodos Geofísicos Aplicados à Prospecção de Águas Subterrâneas, na Região do Lago Arari. In: Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1, Recife. p. 269-284.
- RIJO, L. - 1977a - Modelling of Electric and Electromagnetic Data. PhD Thesis. Salt Lake City, University of Utah. 242p.
- RIJO, L. - 1977b - Prospecção Geofísica nas Regiões de Ponta de Pedras e Soure na Ilha de Marajó, Pará. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, Paraíba. p. 58-59.
- RIJO, L. - 1981 - A Fast Finite Element (FFE) Algorithm for two and Three - Dimensional IP - Resistivity Data Interpretation. In: SIAM Conference on Mathematical and Computational Methods in the Exploration and Extraction of deep Mineral Resources, Tucson, SIAM Conference Abstracts. p. 16-19.
- RIJO, L. - 1982 - Mathematical Modelling of Applied Geoelectromagnetism. In: Proceedings of the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions. Belém, Brazil. Brazilian Geophysical Society. p. 430-471.
- RIJO, L.; PELTON, W.H.; FEITOSA, E.C.; WARD, S.H. - 1977 - Interpretation of Apparent Resistivity Data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brasil. Geophysics. 42:811-822.
- RIJO, L.; PORSANI, M.J.; CARRASQUILLA, A.A.; TANCREDI, A.C. - 1982 - Regional Resistivity Survey for Groundwater in Marajó Island - Brazil. In: International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions, Belém, Brazil. Resumo das Comunicações. p.8.
- RODI, W.L. - 1975 - A technique for improving the accuracy of fi

- nit element solutions for magnetotelluric data. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 25(2):128-150.
- SANDBERG, S. - 1979 - Documentation and Analysis of the Schlumberger Interactive 1-D Inversion Program, Slumb. Salt Lake City, University of Utah. 48p.
- SAUCK, W.A.; CAVALCANTE, G.M. - 1979 - Aplicação do Método Potencial Espontâneo na Pesquisa de Água Subterrânea, Ilha de Marajó, Pará. In: Reunião Anual da SBPC, 31, Fortaleza, Seção F. p.454.
- SCHALLER, H.; VASCONCELOS, D.; CASTRO, J. - 1974 - Estratigrafia Preliminar da Bacia Sedimentar da Foz do Rio Amazonas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo, Bol. N° 3 . p. 189.
- SILVERSTER, P.; HASLEMI, C.R.S. - 1972 - Magnetotelluric Modelling by the Finit Element Method. Geophysical Prospecting. 20: 872-871.
- SNYDER, D.D. - 1976 - A method for modelling the resistivity and IP response of two - dimensional bodies. Geophysics. 41(5) : 997-1015.
- SWIFT Jr., C.M. - 1971 - Theoretical magnetotelluric and Turam response from two - dimensional inhomogeneities. Geophysics . 36(1):38-52.
- TANCREDI, A.C. - 1972 - Application de la prospection électrique a l'étude hydrogéologique de L'île de Marajó - état du Pará , Brésil. Diplome Et. Sup. Strasbourg, Multig. 25p.
- WARD, S.H.; SMITH, B.D.; GLENN, W.E.; RIJO, L.; INMAN, J.R. - 1970 - Statistical Evaluation of Electrical Sounding Methods. Part II: Applied Electricomagnetic Depth Sounding. Geophysics. 41(6a):1222-1235.
- ZIENKIEWICZ, O.C. - 1977 - The Finit Element Method in Engineering Science. London, McGraw Hill. 787p.