

GEOMETRIA DOS PEQUENOS AÇUDES

François Molle



Série Hidrologia / 29

RECIFE - 1994

GOVERNO DO BRASIL

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO REGIONAL

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE

Ministro Chefe

Aluizio Alves

Superintendente

Gen. Nilton Moreira Rodrigues

Superintendente Adjunto

Leonides Alves da Silva Filho

Diretoria de Planejamento

Telúrio Homem de Siqueira Cavalcanti (Diretor)

Departamento de Recursos Naturais

Geraldo de Azevedo Gusmão (Coordenador)

Divisão de Hidrometeorologia

Aldemar de Araujo Santos (Chefe)

Benedito José Zelaquett Seraphim (Coordenador do Projeto)

Diretoria de Programas e Projetos Estratégicos

Paulo Fernando Lapa (Diretor)

Departamento de Supervisão do Programa de Apoio ao Pequeno Produtor Rural

Gisnaldo José Zelaquett (Coordenador)

Coordenadoria de Cooperação Internacional

Isabel Favero (Coordenadora)

Apoio Administrativo:

Diretoria de Administração

José Luiz de Oliveira Azevedo Júnior (Diretor)

Participação nos Trabalhos

Edilton Mendes das Mercês (Desenhista - SUDENE)

José Barros de Lima (Técnico em Recursos Hídricos - SUDENE)

Sebastião Adolfo de Oliveira Júnior (Engenheiro Agrônomo - Convênio SUDENE / IICA)

Rosana Alves Soares (Digitação)

Urany Dantas de Carvalho (Mestre Gráfico - SUDENE)

Ministério da Integração Regional

**Superintendência do Desenvolvimento
do Nordeste**

**Diretoria de Planejamento
Departamento de Recursos Naturais
Divisão de Hidrometeorologia**

**Diretoria de Programas e Projetos
Estratégicos
Departamento de Supervisão do
Programa de Apoio ao Pequeno
Produtor Rural**

**Coordenadoria de Cooperação
Internacional**

Ministère des Affaires Étrangères

Cooperação Técnica Francesa

**Projeto Tecnologias Apropriadas
à Pequena Irrigação (TAPI)**

**L'Institut Français de Recherche
Scientifique Pour le Développement en
Coopération**

Missão ORSTOM do Recife

GEOMETRIA DOS PEQUENOS AÇUDES

François Molle

Recife, 1994

Série: Brasil SUDENE. Hidrologia Nº. 29
Publicação elaborada no âmbito do convênio SUDENE/ORSTOM/TAPI - França

Molle, François

Geometria dos Pequenos Açudes/ François Molle.
Recife: SUDENE, DPG. PRN. HME, 1994.
126 p. (Hidrologia, 29)

Convênio SUDENE/ORSTOM/TAPI

1. AÇUDES - GEOMETRIA - NORDESTE. I.Série.
II. SUDENE, ed. III. Título.

CDU 556.55(812/813)

Endereço para correspondência:
SUDENE-DPG-PRN-HME
Edf. SUDENE, s/529, Fone: (081) 416-2508
Praça Ministro João Gonçalves de Souza, s/n
Cidade Universitária- Recife, Pernambuco - Brasil
CEP: 50670-900

SUMÁRIO

	pag.
APRESENTAÇÃO.....	6
RESUMO.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. ELEMENTOS DE GEOMETRIA.....	10
3. OS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS.....	16
3.1 - SIGNIFICADO DOS COEFICIENTES (α) e (K).....	16
3.2 - OS CONES EQUIVALENTES.....	16
3.3 - DETERMINAÇÃO DE (α , K) POR REGRESSÃO LINEAR SIMPLES.....	16
3.3.1 - Método para determinação de (α) e (K).....	20
3.3.2 - Erros comuns.....	20
3.3.3 - Fatores que influenciam o resultado.....	21
3.3.4 - Influência do erro induzido pela determinação do ponto mais profundo.....	21
3.4 - DETERMINAÇÃO POR REGRESSÃO PONDERADA.....	31
3.5 - OUTRAS REGRESSÕES S(H), V(S).....	32
4. DESCRIÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA.....	35
4.1 - PARÂMETROS DA BASE DE DADOS.....	35
4.1.1 - Origem dos dados.....	36
4.1.2 - Repartição geográfica.....	36
4.1.3 - Qualidade dos dados.....	37
4.1.4 - Tipo de projeto.....	40
4.1.5 - Tamanho das represas.....	40
4.1.6 - Características da parede.....	44
4.1.7 - Características do sangradouro.....	46
4.1.8 - Rede hidrográfica.....	47
4.1.9 - Bacia hidrográfica.....	48
4.1.10 - Indicador de geometria.....	50
4.1.11 - Perfil do boqueirão.....	51
4.1.12 - Outras variáveis.....	51
4.2 - VARIÁVEIS CALCULADAS.....	52
4.2.1 - Variáveis geométricas.....	52
4.2.2 - Variáveis calculadas a partir dos dados básicos.....	53

5. VARIACÕES E CORRELAES DOS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS.....	56
5.1 - COMPARAO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA TIPO DE REGRESSÃO.....	56
5.2 - VALORES MÉDIOS E FREQUNCIAIS DE (α) e (K).....	59
5.3 - CORRELAES ENTRE OS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS.....	64
5.3.1 - Primeira correlao entre (α) e (K).....	64
5.3.2 - Segunda correlao entre (α) e (K).....	67
5.3.3 - Terceira correlao entre (α) e (K).....	68
5.4 - CORRELAO ENTRE (K), (α) E OUTROS PARÂMETROS.....	68
6. LOCAO E TAMANHO DA BARRAGEM.....	74
6.1 - LOCAO DA BARRAGEM.....	74
6.2 - ESTIMATIVA DO VOLUME DO ATERRO.....	74
6.3 - ESTIMATIVA DO VOLUME DA TRINCHEIRA.....	78
6.4 - ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL ATERRO + CUTOFF.....	79
6.5 - RELAO VOLUME D'ÁGUA/VOLUME DE TERRA.....	80
6.6 - CÁLCULO ECONMICO DA CONSTRUO.....	83
7. AVALIAO DO VOLUME A PARTIR DE FOTOS AÉREAS.....	87
7.1 - ESTIMATIVA DO VOLUME A PARTIR DA SUPERFÍCIE.....	87
7.2 - IMPORTÂNCIA DA DATA DE OBSERVAO.....	91
8. BACIA HIDROGRÁFICA E DIMENSIONAMENTO.....	95
8.1 - DIMENSIONAMENTO DO AÇUDE.....	95
8.2 - RELAO ENTRE AS BACIAS HIDROGRÁFICAS E HIDRÁULICAS	95
8.3 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO.....	98
9. PROPOSTAS PARA DETERMINAO DO VOLUME SIMPLIFICADA DOS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS E DO VOLUME ARMazenado.....	101
9.1 - AVALIAO SUMÁRIA.....	101
9.2 - METODOLOGIA SIMPLIFICADA.....	102
9.3 - ESTIMATIVA DOS ERROS.....	105
9.4 - INTERVALO DE CONFIANÇA.....	108
9.5 - LEVANTAMENTO COMPLETO.....	108
10. CONCLUSÃO.....	110
11. ANEXOS.....	114
11.1 - O PROGRAMA GEOPAC.....	115
11.1.1 - Fig. 56 Fluxograma do GEOPAC.....	116

11.2 - CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS.....	117
11.2.1 - Fig. 57 Correspondências geométricas para uma açude de Lei Cota/ Volume $V = KH^{\alpha}$	118
11.3 - GRÁFICOS COMPLEMENTARES.....	120
11.3.1 - Fig. 58 LOG(VOLMAX) x LOG(ABER15).....	121
11.3.2 - Fig. 59 ALFA15 x LOG(SUPMAX).....	122
11.3.3 - Fig. 60 ALFA15 x LOG(VOLMAX).....	123
11.3.4 - Fig. 61 LOG(VOLMAX) x LOG(ABER15).....	124
11.3.5 - Fig. 62 TETA2 x LOGK15*ALFA15.....	125
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	126
LISTA DE TABELAS.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

APRESENTAÇÃO

Este trabalho vem complementar os já publicados sobre as características dos pequenos açudes do Nordeste Brasileiro, especificadamente: "Perdas por Evaporação e Infiltração em Pequenos Açudes" e "Estudo e Previsão da Qualidade da Água dos Açudes do Nordeste Semi-Árido Brasileiro", correspondentes à série Hidrologia N^os 25 e 26, editada pela SUDENE, através de seu GT de Hidrometeorologia, vinculado ao Departamento de Planejamento de Recursos Naturais da Diretoria de Planejamento Global.

Foi executado no bojo do convênio de Cooperação Técnica Internacional entre os Governos Brasileiro e Francês, este último representado pelo Projeto TAPI e pelo INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION (ORSTOM), que, há mais de uma década, desenvolvem junto a esta Autarquia, estudos e pesquisas no âmbito da Irrigação e da Hidrologia Aplicada, com repercussões da mais alta valia para a Região Nordeste, além de propiciar a formação e capacitação de recursos humanos, nesse ramo da ciência, ainda carente de maior apoio dos setores públicos.

A maior apropriação de conhecimentos sobre os parâmetros geométricos dos pequenos reservatórios - elementos básicos de suporte hídrico às populações rurais e à pecuária - servirá de lastro técnico-científico ao desenvolvimento de métodos de avaliação e de determinação dos coeficientes geométricos, a serem apresentados no Manual de Manejo dos Pequenos Açudes - ora em fase final de elaboração pela SUDENE, em colaboração com o ORSTOM/TAPI.

Com efeito, destaque-se por oportuno e por importância, a grande colaboração prestada pela Diretoria do Programa de Apoio ao Pequeno Produtor Rural-PAPP, da SUDENE, através de sua Coordenadoria de Recursos Hídricos, na elaboração conjunta dos estudos, objeto do presente trabalho, e sem a qual, os esforços talvez não tivessem o êxito cogitado.

Assim, temos a grata satisfação de oferecer à comunidade hidrológica, e demais interessados este trabalho, esperando que os seus resultados e recomendações possam ter plena utilização e difusão.

Geraldo de Azevedo Gusmão

Departamento de Planejamento de
Recursos Naturais
Coordenador

RESUMO

A geometria dos pequenos açudes do Nordeste brasileiro apresenta uma grande variabilidade. A caracterização da geometria de um determinado açude mediante dois coeficientes geométricos simples permite a resolução de vários problemas ligados aos açudes. O mais importante entre eles é a determinação do volume armazenado, devendo-se estudar os vários métodos possíveis para tal fim, bem como as suas respectivas margens de erro. O estudo de uma amostra de 420 pequenos açudes nos permitiu estabelecer várias correlações estatísticas entre os parâmetros físicos e geométricos mais relevantes. Apresenta-se, em particular, uma correlação entre o volume de terra do dique e o volume d'água armazenado bem como outra entre a superfície e o volume do açude, visando-se estimar os volumes estocados a partir de fotos aéreas. O estudo dedica-se a pequenos açudes (da ordem de 100.000 m^3) e aborda-se a possibilidade de estudos mais aprofundados levando em conta aspectos geomorfológicos.

1. INTRODUÇÃO

Os numerosos açudes Nordestinos apresentam, para qualquer observador atento, características bastante variáveis, em particular no que diz respeito a sua geometria. Por geometria, entende-se a forma geral da aguada e do vale barrado pela represa.

Observamos, por exemplo, que, para uma mesma profundidade, a superfície do espelho d'água e o volume armazenado podem variar numa razão de 1 a 100, isso porque existem represas encaixadas, geralmente situadas em vales estreitos, e outras rasas e planas; volumes iguais armazenados podem corresponder a diques de tamanho (e custo) totalmente diferentes. A forma da aguada é sujeita, também, a grande variação, principalmente em função do relevo e do número de riachos que desembocam na bacia hidráulica do açude.

Os três parâmetros mais simples, que caracterizam a forma de um açude são: a sua profundidade (H), a sua superfície (S) e seu volume (V). Esses parâmetros, como será comprovado mais adiante, não são equivalentes, a importância de cada um deles depende, principalmente, do uso previsto da represa. Assim:

- Para o uso destinado ao **abastecimento** (humano ou animal), o fator principal é a **profundidade da represa** da qual depende, principalmente, a duração da disponibilidade em água. Com efeito, a profundidade é o melhor indicador simples do tempo que a represa poderá resistir à evaporação e à infiltração.
- Para o uso voltado para a **irrigação**, importa, em primeiro lugar, o **volume disponível** do qual dependerá a superfície irrigada, devendo-se, de preferência, ter um **espelho d'água limitado**, de maneira a reduzir as perdas por evaporação.
- Pelo contrário, para o uso de **cultivos de vazante e/ou piscicultura**, é o **tamanho do espelho d'água** que importa. No primeiro caso, é favorável uma situação em que este diminui rapidamente (maior superfície plantada) enquanto, no segundo caso, é preferível um espelho d'água grande e pouco variável (o número de peixes é proporcional à superfície livre).

Essa variedade de situações basta para demonstrar a importância da geometria do reservatório no tocante ao uso escolhido. As configurações geométricas que ligam (H), (S) e (V) são das mais variadas, sendo, portanto, de relevante interesse estudar estatisticamente, na base de uma amostra significativa, as relações que existem entre esses três parâmetros. Além disso, é mister introduzir também variáveis mais elaboradas, como as que descrevem a forma do espelho d'água. Cabe assim, evidenciar parâmetros descritivos dos açudes que permitam chegar rapidamente a uma caracterização e, eventualmente, a uma tipologia.

O presente trabalho apresenta, após considerações geométricas gerais, aprofundada reflexão sobre dois coeficientes geométricos representativos e característicos de um determinado açude:

Um acervo de informações sobre 420 represas, detalhadamente apresentado a seguir, serviu de base a vários estudos entre os quais pode-se destacar, de antemão:

- Determinação, variação e crítica dos coeficientes geométricos representativos.
- Avaliação simplificada do volume de terra da barragem e o volume d'água armazenado.
- Avaliação do volume armazenado a partir de fotos de satélite.
- Relação entre o volume de terra do maciço e o volume da fundação.
- Correlações entre os coeficientes geométricos.
- Proposta para uma determinação simplificada do volume armazenado e dos coeficientes geométricos.

O capítulo 3 apresenta uma discussão detalhada sobre a variabilidade dos coeficientes geométricos: essas considerações poderão ser dispensadas pelo leitor apressado sem prejudicar muito a compreensão do resto do texto.

Enfim, vale frisar que o presente trabalho é voltado para pequenos açudes. Muita confusão originando-se da imprecisão do que é um pequeno ou um grande açude, especificamos, desde já, que os açudes estudados têm volume mediano de 100.000 m³.

2 - ELEMENTOS DE GEOMETRIA

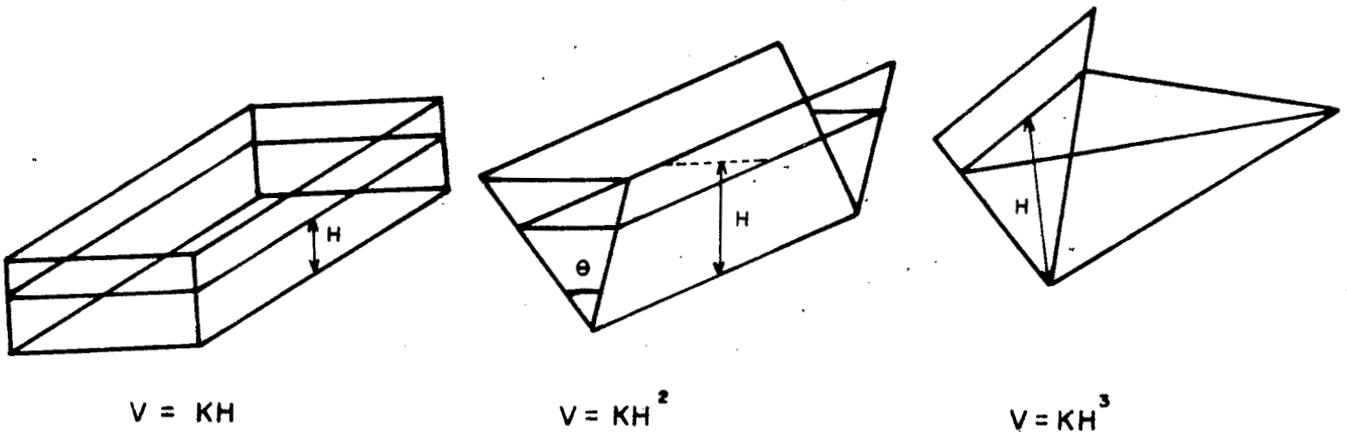
A variável mais fácil de ser determinada é a profundidade (H), ou seja, a altura d'água no ponto mais fundo do açude, geralmente situado nas proximidades do pé da parede.

Por isso, é de grande interesse tentar relacionar a superfície (S) e o volume (V), de determinação mais delicada, a este valor da profundidade (H), o qual varia entre 0 e um valor máximo H_x , correspondendo à cota do sangradouro. Os valores máximos de (S) e (V), correspondentes a H_x , serão a seguir notados S_x e V_x .

A Figura 1 apresenta três tipos de represas de geometria muito simples; o primeiro é um reservatório paralelepípedo (ou "açude piscina") para o qual o volume (V) é proporcional à profundidade, tendo-se $V = S_0.H$, onde S_0 representa a superfície da base.

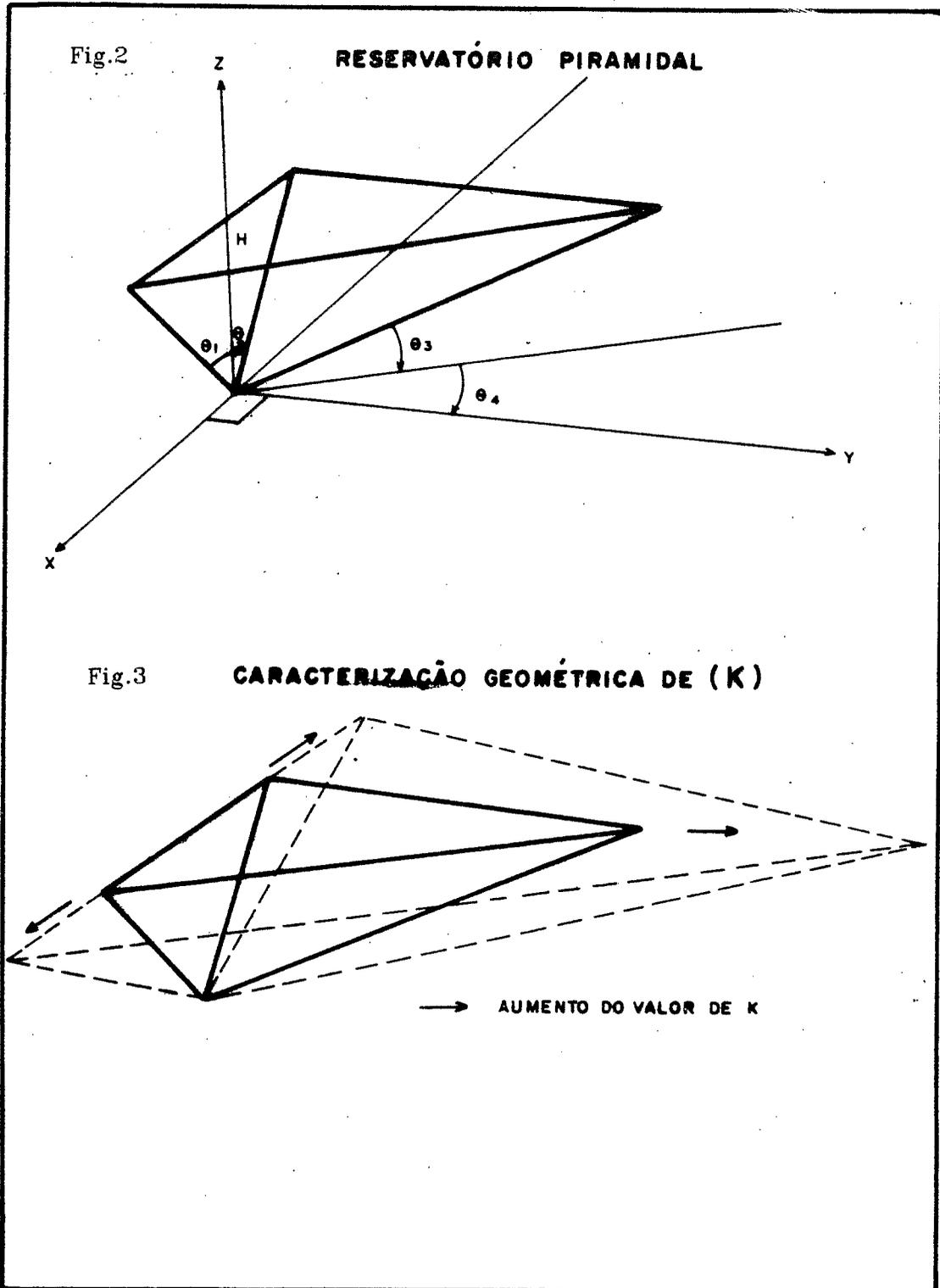
Fig.1

ALGUMAS GEOMETRIAS SIMPLES



O segundo é um açude prismático, cujo volume varia em função do quadrado da profundidade: $V = K.H^2$.

Enfim, o terceiro açude constitui uma pirâmide invertida cuja lei é cúbica, ou seja, do tipo $V = K.H^3$. Neste caso, um cálculo trigonométrico simples mostra que o valor de K é igual a $\text{Cotg}\theta_3 \cdot \text{Cos}\theta_4 \cdot [\text{tg}\theta_1 + \text{tg}\theta_2]$ (Figura 2). Constata-se que K cresce quando θ_1 e θ_2 aumentam e quando θ_3 tende a 0, ou seja, quando a pirâmide se abre, como mostrado em pontilhado no Figura 3.



A representação angulosa dada por uma pirâmide pode parecer bastante afastada de forma sinuosa da maioria dos açudes. Deve-se, entretanto, lembrar que a lei $V = K.H^3$ que estabelece uma proporcionalidade entre o volume e o cubo da profundidade, tem validade mais abrangente. É a lei de um cone, sendo este definido como o volume gerado pela rotação de uma reta passando por um ponto fixo (0) e apoiada em uma curva plana qualquer (C). Isso é ilustrado na Figura 4: o ponto 0 pode ser o fundo do açude e a curva (C) a sua margem (limite do espelho d'água), independentemente da sua forma.

A relação $V = K.H^3$ é, então, perfeitamente válida para um reservatório de encostas retas. Em realidade, a forma das encostas é muito variável e deve-se estudar a variação da lei cota/volume em alguns casos simples. A Figura 5 mostra três perfis de encostas: 1 - perfil reto, 2 - perfil convexo, 3 - perfil côncavo.

Considerando-se, em primeiro lugar, o perfil reto já estudado.

Os segmentos OA, OB, OC correspondem às equações seguintes:

$$x = a(z/H_x) \quad x=b(z/H_x) \quad y=c(z/H_x)$$

O triângulo A'B'C', para uma cota z qualquer, tem por superfície $S(z) = (a+b) (z/H_x) c(z/H_x)/2$.

O volume OA'B'C' é obtido por integração de 0 a H da superfície S(z).

$$V(H) = 1/2 \int_0^H c(a+b) (z/H_x)^2 dz = \frac{1}{6} \cdot c(a+b) H_x (H/H_x)^3$$

$$V(z) = V_x \cdot (H/H_x)^3$$

onde: V_x é o volume máximo, correspondendo à cota máxima H_x .

A fórmula é do tipo $V = KH^3$ como já vimos.

Supomos agora que as encostas são convexas (traçado 2). Os arcos de curva OA, OB, Oc têm as equações seguintes:

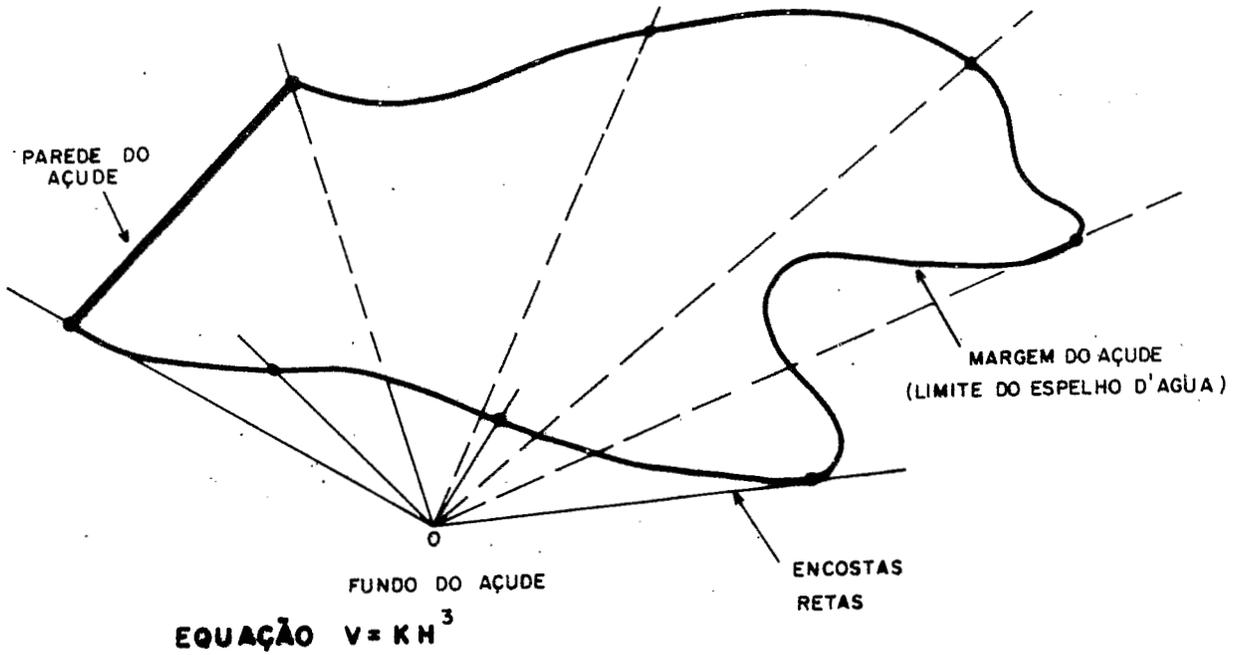
$$x = a(z/H_x)^d \quad x = b(z/H_x)^d \quad y = c(z/H_x)^d$$

O raciocínio anterior leva a integrar a superfície:

$$S(z) = 1/2 c(a+b) H_x (z/H_x)^{2d}$$

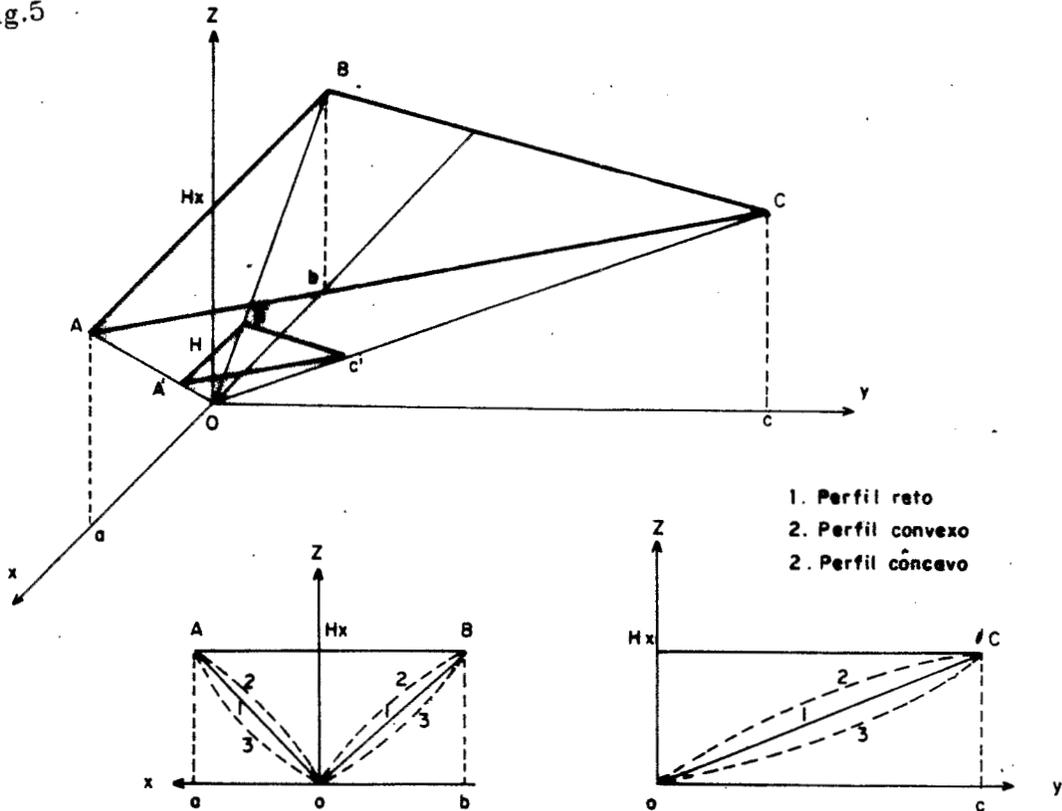
Fig.4

AÇUDE CÔNICO



VARIAÇÃO DO PERFIL DAS ENCOSTAS

Fig.5



$$\text{Obtemos: } V(H) = V_x(3/(2d+1)) (H/H_x)^{2d+1}$$

e constatamos que o expoente de H vale $(2d + 1)$, o qual, por ser (d) superior a 1, é maior que 3. Para $d = 1$, voltamos a encontrar o resultado anterior referente à pirâmide. Para encostas côncavas (traçado 3) o resultado é idêntico, com $d < 1$, e um expoente de H , $(2d + 1)$, inferior a três.

Podemos, também, considerar que o trecho OC é reto, o que fornece a lei cota/volume seguinte:

$$V(H) = V_x(3/d+2) (H/H_x)^{d+2}$$

onde o expoente de H vale agora, $d+2$.

Para esses perfis simples, obtivemos uma lei cota/volume da forma $V = K.H^\alpha$, sendo o expoente (α) um coeficiente que varia com a forma das encostas. Os dois primeiros reservatórios aludidos acima (o paralelepípedo e o prisma), também são casos particulares com valores de (α) respectivos de 1 e 2.

Na base destas considerações, é cabível adotar funções potência do tipo

$$V = K.H^\alpha \tag{1}$$

a fim de tentar, para cada açude, aproximar a relação cota/volume real. Essa hipótese será confirmada a seguir.

Uma consequência fundamental da adoção de funções deste tipo é a forma tomada pela lei cota/superfície, a qual é obtida por derivação da lei cota/volume.

$$S = \alpha.K.H^{(\alpha-1)} \tag{2}$$

Deduz-se, também, por combinação das equações (1) e (2), a relação fundamental:

$$V = H.S/\alpha \tag{3}$$

No caso da pirâmide $(\alpha = 3)$, encontra-se a lei clássica: o volume igual a um terço da área da base multiplicado pela altura.

Eliminando H entre as equações (1) e (2), obtém-se:

$$H = (V/K)^{1/\alpha} = (S/\alpha K)^{1/\alpha-1}$$

$$V = (1/K(\alpha)^{\alpha/\alpha-1}) \cdot S^{\alpha/\alpha-1} \quad (4)$$

Além de caracterizar os açudes e sua geometria através de dois parâmetros, tais relações analíticas mostram-se extremamente úteis na resolução de vários problemas ligados aos açudes (dimensionamento, potencial para irrigação, risco de salinização...)

3 OS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS

(α) e (K)

3.1 - SIGNIFICADO DOS COEFICIENTES (α) e (K)

As considerações geométricas do capítulo anterior evidenciaram a relação existente entre (α) e (K) e variáveis geométricas simples.

O coeficiente K relaciona-se à abertura geral do cone. Quanto mais aberto e menos inclinado o vale barrado pelo açude, maior será esse coeficiente. Pode-se esperar, conseqüentemente, achar valores elevados para açudes de grande porte situados em vales aluviais largos e abertos. Ao contrário, para vales fechados, como ocorre em regiões de relevo mais acentuado, espera-se encontrar valores mais baixos. Na base dessas considerações, chamaremos K de **coeficiente de abertura**. Além disso, a fórmula $V = K.H^2$ mostra que K pode também ser definido como o volume armazenado para uma profundidade de um metro.

Quanto ao coeficiente (α), evidenciamos uma relação direta, no caso de geometrias simples, com a concavidade das encostas. Por analogia, chamaremos (α) de **coeficiente de forma**.

3.2 - OS CONES EQUIVALENTES

Para tentar precisar e ilustrar essas noções geométricas, pode-se estabelecer uma relação analógica de um determinado açude, representado pelo par de características geométricas (α , K), com cones de geometria mais simples. Essas considerações foram colocadas em anexo afim de não abusar da paciência do leitor. Entretanto, essas correspondências geométricas serão de certa utilidade para quem quiser ter uma visão mais aprofundada do significado geométrico desses coeficientes.

3.3 - DETERMINAÇÃO DE (α , K) POR REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

3.3.1 - Método para determinação de (α) e (K)

Convém, agora, explicitar como determinar o par (α , K), representativo de um dado açude.

Em uma primeira etapa, supomos que existe um levantamento topográfico da bacia hidráulica do açude, do qual deduz-se um conjunto de pares (H_i, S_i) , sendo S_i a superfície do espelho d'água correspondendo à profundidade H_i . Geralmente, o levantamento fornece uma planta com curvas de nível de metro em metro, cada uma delas definindo uma superfície S_i . (Figura 6)

Com este conjunto de pares (H_i, S_i) , calculam-se os valores V_i correspondendo ao volume armazenado para cada profundidade H_i .

Existem dois métodos para se conseguir os valores dos volumes e nos limitaremos a lembrá-los resumidamente.

- o primeiro método consiste em plotar a curva cota/superfície e planimetrar a área limitada pela curva, o eixo x e a vertical passando pelo valor H_i , como indicado na Figura 7.
- O segundo método é mais empregado e consiste (ver Figura 8) em calcular sucessivamente os volumes parciais VP_i entre duas cotas H_i e H_{i+1} , por:

$$VP_{i+1} = V_{i+1} - V_i = (H_{i+1} - H_i) \cdot 1/2 \cdot (S_i + S_{i+1})$$

Uma vez conseguido o conjunto de valores (H_i, S_i, V_i) , plota-se H_i e V_i num papel logarítmico (ou se não tiver tal papel, calcula-se os valores $\text{Log}(H_i)$, $\text{Log}(V_i)$ e plota-os em um papel normal). (Figura 9)

Fig.6

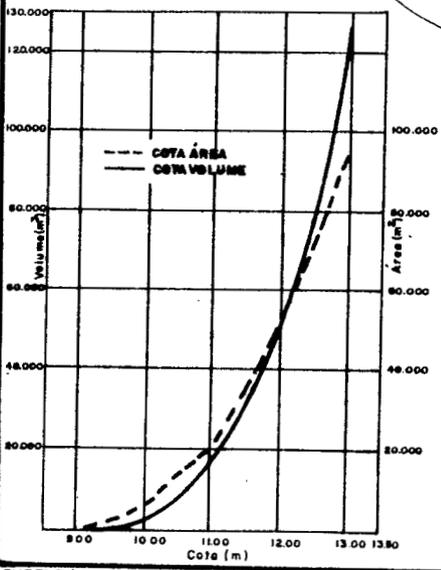
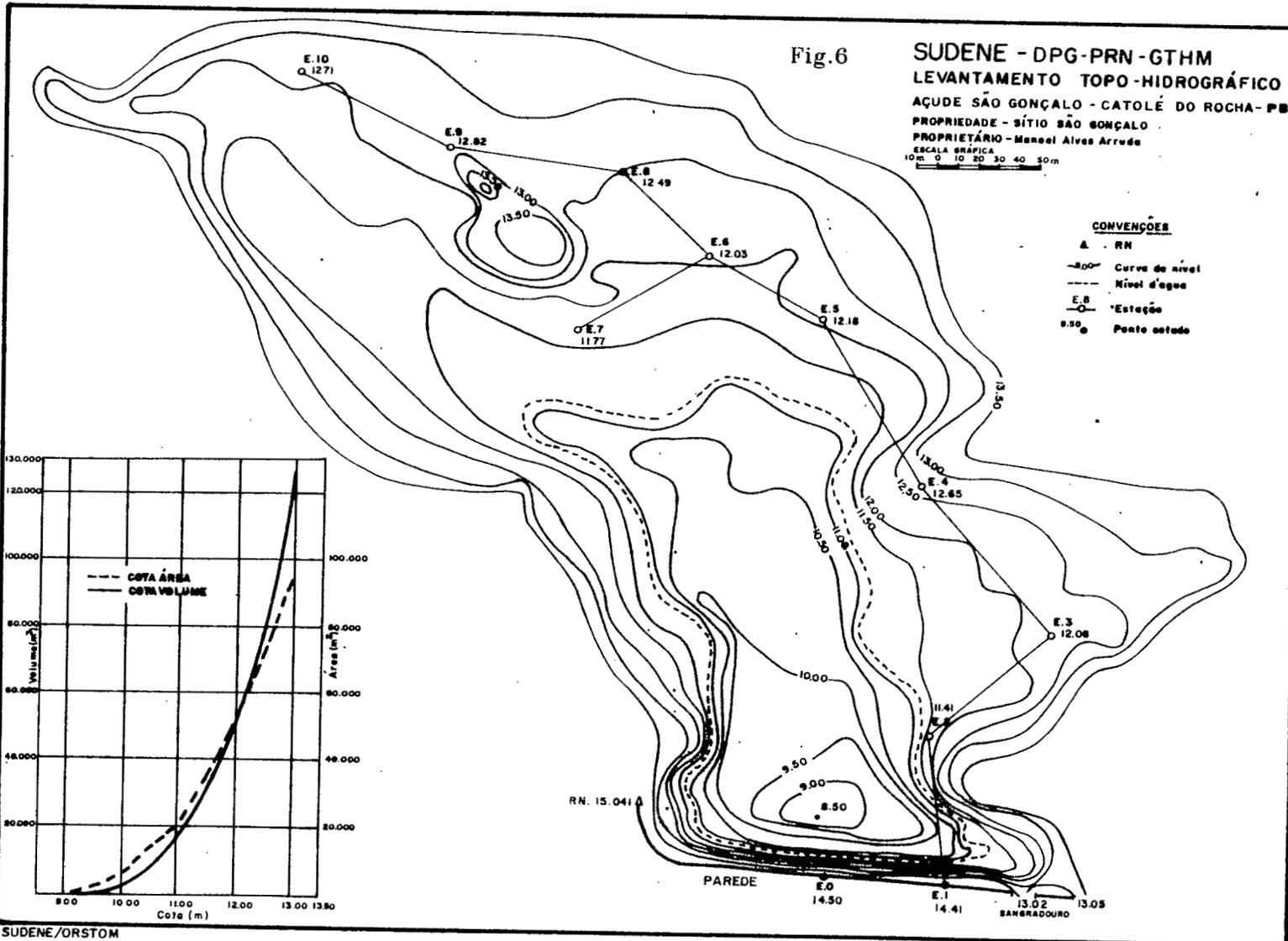
**SUDENE - DPG-PRN-GTHM
LEVANTAMENTO TOPO-HIDROGRÁFICO**

APUDE SÃO GONÇALO - CATOLÉ DO ROCHA - PB
PROPRIEDADE - SÍTIO SÃO GONÇALO
PROPRIETÁRIO - Manoel Alves Arruda

ESCALA GRÁFICA
10m 0 10 20 30 40 50m

CONVENÇÕES

- A - RN
- 800- Curva de nível
- - - - - Nivel d'água
- E.8 - Estação
- 8.50 - Ponto cotado

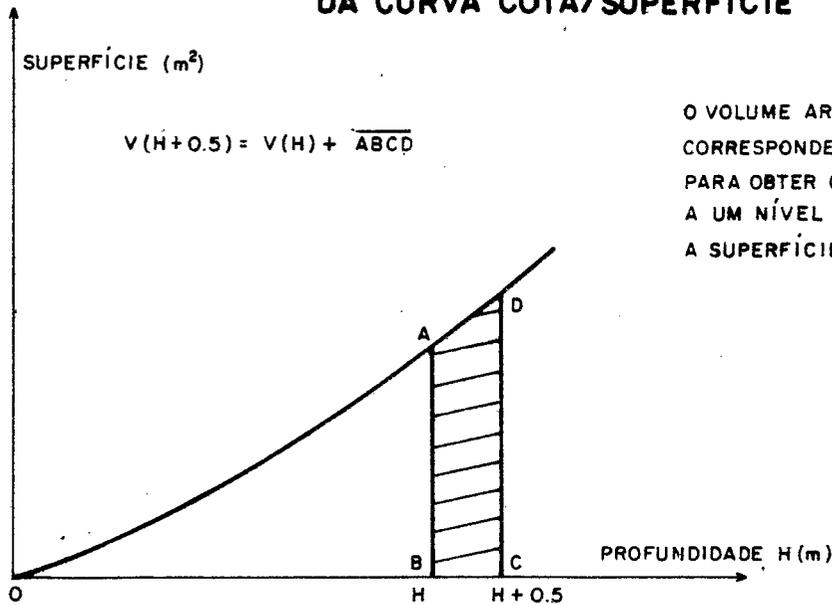


SUDENE/ORSTOM

Edilren

Fig.7

CALCULO DO VOLUME POR PLANIMETRAGEM DA CURVA COTA/SUPERFÍCIE

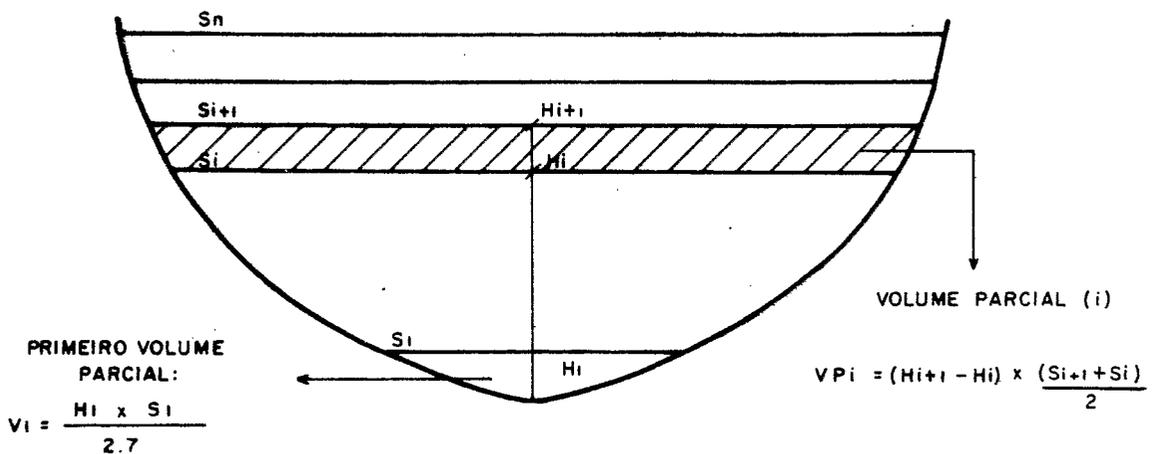


$$V(H+0.5) = V(H) + \overline{ABCD}$$

O VOLUME ARMAZENADO PARA O VALOR H CORRESPONDE A ÁREA OAB. PARA OBTER O VOLUME CORRESPONDENTE A UM NÍVEL DE MAIS 50 cm, ACRESCENTA-SE A SUPERFÍCIE \overline{ABCD} .

FIG.8

CÁLCULO DOS VOLUMES A PARTIR DAS PROFUNDIDADES E DAS SUPERFÍCIES



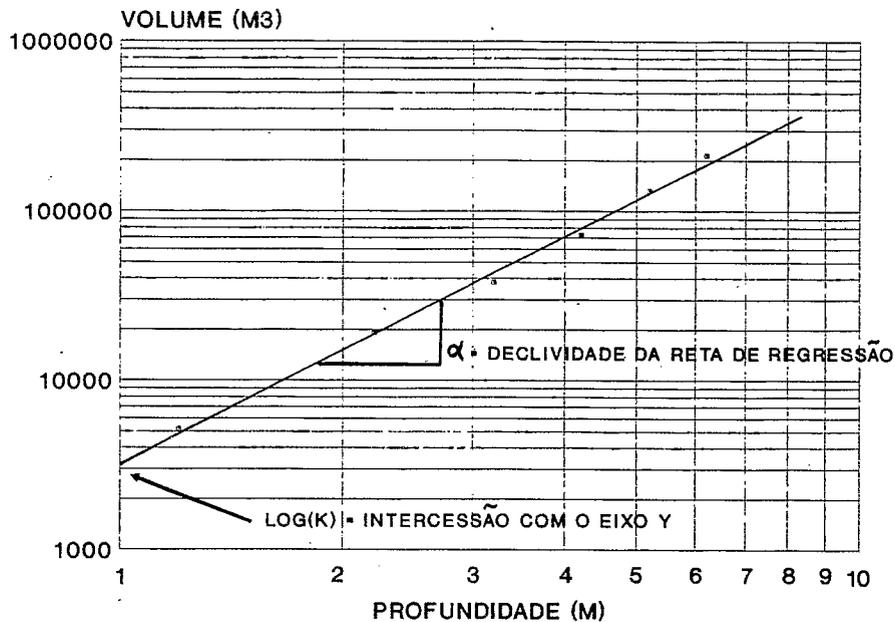
PRIMEIRO VOLUME PARCIAL:

$$V_i = \frac{H_i \times S_i}{2.7}$$

VOLUME PARCIAL (i)

$$V_{Pi} = (H_{i+1} - H_i) \times \frac{(S_{i+1} + S_i)}{2}$$

Fig.9 EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE ALFA E (K)
POR REGRESSÃO LINEAR SOBRE OS PARES (H_i,V_i)



Obtém-se, geralmente, um alinhamento satisfatório que permite ajustar uma reta por regressão linear.

Tomando o logaritmo^(*) da expressão $V = KH^\alpha$, chega-se a:

$$\text{Log}(V) = \text{Log}(K) + \alpha \cdot \text{Log}(H)$$

que mostra que a declividade da reta obtida corresponde a (α) enquanto $\text{Log}(K)$ corresponde à intersecção da reta com o eixo vertical (K é o volume correspondente a $\text{Log}(H) = 0$, ou seja, $H=1$).

2

3.3.2 - Erros comuns

A análise de aproximadamente 300 plantas de pequenos açudes acompanhadas das referentes tabelas cota/superfície/volume (a seguir denominadas Tabela CSV) evidenciou erros repetidos.

* O logaritmo considerado aqui e no que segue é o logaritmo neperiano.

Um erro comum diz respeito à determinação do volume V_1 , correspondendo à profundidade H_1 . Algumas vezes o volume correspondente não é calculado (aparecendo, na Tabela, um hífen no seu lugar). Outras vezes o seu valor é dado por $H_1.S_1/2$, ou, também, $S_1/2$, embora a cota H_1 seja, em geral, diferente de 1. Quando H_1 e S_1 são pequenos, o erro é negligenciável, mas, em alguns casos - particularmente no caso do levantamento de um açude já existente, onde H_1 é, muitas vezes, o nível d'água na hora do levantamento -, pode-se incorrer em erros importantes. Por isso, propomos calcular o primeiro volume parcial por $V_1 = H_1.S_1/2.70$, sendo 2.70 um valor médio de α , como haveremos de ver.

Às vezes, além das curvas de nível de metro em metro, pode aparecer uma curva intermediária com intervalo de 0.50 m, correspondendo, geralmente, à cota de sangria. Não se deve esquecer de considerar um valor ($H_{i+1} - H_i$) de 0.50 m e não 1 m como é costumeiro. Observamos, ainda, o erro que consiste em começar o cálculo a partir dos valores superiores de H e V , no lugar dos valores inferiores.

3.3.3 - Fatores que influenciam o resultado

Mesmo adotando o valor $V_1 = H_1.S_1/2.70$, o resultado pode ser afetado no caso de um levantamento tal que H_1 seja relativamente grande (por exemplo, $H_1 = 3$ metros para um açude de 5 metros).

O resultado da regressão também é afetado pelo número de pontos (H_i, V_i), podendo haver um deslocamento importante da reta por causa de um ponto afastado.

Todavia, o fator de maior influência é a precisão da determinação da profundidade, ou seja, da cota do ponto mais baixo do açude chamado a seguir H_0 . Esse assunto deve ser estudado detalhadamente.

3.3.4 - Influência do erro induzido pela determinação do ponto mais profundo (H_0)

A determinação do ponto H_0 , ponto mais baixo da bacia hidráulica, é dificultada pelas irregularidades do riacho e, em particular, da sua calha. Em alguns casos, existe uma calha que não passa de uma entalha de irrelevante largura, mas que tem 1 ou 2 metros de profundidade.

Caso se realize o levantamento topográfico de um açude já existente, a parte inundada deve ser levantada por

batimetria, sendo trabalhoso, no caso de um açude de vários hectares de extensão, achar o ponto mais fundo da bacia.

Há, ainda, deformações naturais da geometria da bacia (assoreamento), bem como deformações artificiais (retirada de material para construção) que podem modificar consideravelmente H_o .

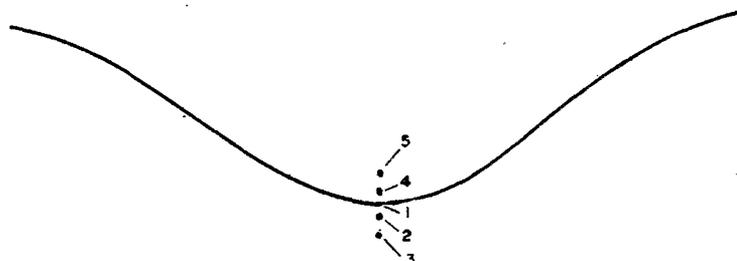
Antes de analisar as consequências de todos esses elementos, é importante estudar o efeito de um erro na determinação de H_o sobre o valor de α , de K , e sobre a estimativa do volume máximo V_x .

Considere-se um açude de 7 metros de profundidade, cuja lei cota/volume é $V = 1000.H^{2.70}$. Os valores de (α) e (K) são calculados por regressão sobre os pares $(\text{Log}(H_i), \text{Log}(S_i))$, sendo considerados os valores de S_i para cotas de 2 a 7 metros calculadas por $S = 2700.H^{1.70}$.

Testou-se 5 erros possíveis:

- 1) O ponto H_o foi estimado certo: erro nulo; $e = 0$.
- 2) O ponto H_o foi estimado em 50 cm mais baixo do que o ponto real; o açude é considerado como tendo 7.50 m de profundidade: $e = -0.50$ m.
- 3) O ponto H_o foi estimado em 1 m mais baixo do que o ponto real; o açude é considerado como tendo 8.00 m de profundidade: $e = -1$ m.
- 4) O ponto H_o foi estimado em 50 cm acima do ponto real; o açude é considerado como tendo 6.50 m de profundidade: $e = +0.50$ m.
- 5) O ponto H_o foi estimado em 1.00 m acima do ponto real; o açude é considerado como tendo 6.00 m de profundidade: $e = +1.00$ m.

Fig.10 5 TIPOS DE ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO



A Tabela 1 resume os valores de α , K e o erro decorrente sobre as estimativas do volume máximo V_x e do volume $V(5)$ (volume para $H = 5m$), para cada um dos 5 erros enumerados, bem como para dois outros valores de α (2.20 e 3.20), de maneira a observar a variabilidade do fenômeno com o valor de α .

Observa-se quatro fenômenos muito importantes:

- 1) O valor de α varia muito em função do erro. Para erros extremos de $\pm 1m$, o valor de α varia de 2.7, seu valor real, para 2.24 e 3.078.
- 2) O valor de K varia de maneira ainda mais considerável, já que passa de 1000, valor real, para 3358 e 323.
- 3) Constata-se, porém, que o erro final sobre a estimativa do volume máximo é inferior a 2% (para o caso $\alpha = 2.70$, chegando a 3.7% para um valor de $\alpha = 2.20$). α e K apresentam variações em sentidos opostos que se compensam para dar um volume final quase idêntico.

O erro sobre o volume intermediário $V(5)$ (volume para $H = 5 m$) é um pouco maior, da ordem de 5% para um erro de $\pm 1m$.

- 4) Observa-se que o produto $\alpha \cdot \log(K)$ é quase constante sendo pouco afetado pelo erro sobre H_0 . As médias, para cada valor de α , são respectivamente 18.3, 21.5, 15.3. Esse fenômeno, que será parcialmente explicado no item 5.3.1, nos levou a chamar o produto $\alpha \cdot \log(K)$ de "assinatura" do açude, destacando-se assim essa variável como geometricamente representativa da

represa. Essa constatação nos orientará na busca de correlações.

Nota-se ainda, que o valor calculado de K para $(\alpha) = 2.70$ e $(H_0) = 0$, é 1002. Essa pequena diferença (com o valor real 1000) provém do ligeiro erro resultante da metodologia do cálculo do volume (o cálculo dos volumes parciais por $(H_{i+1} - H_i) * (S_i + S_{i+1})/2$ é uma aproximação que induz um ligeiro viés).

TABELA 1

Variações decorrentes de um erro sobre a cota do fundo

		ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO (m)				
ALFA		-1	-.5	0	+ .5	+1
2.70	Valor de α	3.078	2.896	2.70	2.484	2.240
	Valor de K	323	565	1002	1812	3358
	DIF.V(5)%	4.2	2.0	0.2	-2.2	-4.2
	DIF. V_x %	1.8	.9	0.1	-0.7	-1.6
	α .Log(K)	17.8	18.3	18.6	18.6	18.2
3.20	Valor de α	3.57	3.350	3.09	2.817	2.51
	Valor de K	301	602	1221	2517	5310
	DIF.V(5)%	4.3	2.9	1.4	-0.2	-1.8
	DIF. V_x %	1.6	1.1	.6	0	-.5
	α .Log(K)	20.4	21.7	21.7	22.0	21.5
2.20	Valor de α	2.618	2.483	2.33	2.169	1.98
	Valor de K	323	497	780	1247	2047
	DIF.V(5)%	2.9	.3	-2.5	-5.4	-8.5
	DIF. V_x %	1.4	.1	-1.2	-2.4	-3.7
	α .Log(K)	15.1	15.4	15.5	15.5	15.1

Um erro e = +0.50 m significa que a profundidade do açude foi estimada em 6.50 m.

TABELA 2

Variações decorrentes de um erro sobre a cota do fundo
Cálculos feitos com primeiro volume parcial corrigido

		ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO (m)				
ALFA	Val.calculados	-1	-0.5	0	+0.5	+1
3.20	Valor de α	3.717	3.47	3.20	2.91	2.588
	Valor de K	226	474	1005	2162	4752
2.20	Valor de α	2.444	2.328	2.20	2.055	1.889
	Valor de K	461	673	1000	1518	2364

Para os casos de $\alpha = 3.20$ e $\alpha = 2.20$, o valor de α calculado para um erro nulo é diferente do valor real. Isso reflete apenas o fato de que o primeiro volume parcial, já que não se conhece a priori o valor de α , é calculado com a fórmula $V_1 = H_1 \cdot S_1 / 2.70$.

Para eliminar esse efeito, pode-se calcular o volume V_1 respectivamente por $V_1 = H_1 \cdot S_1 / 3.20$ e $V_1 = H_1 \cdot S_1 / 2.20$. A Tabela 2 mostra os novos valores obtidos.

A Figura 11 apresenta graficamente a variação de (α) e (K) para os três valores adotados de α (2.20, 2.70, 3.20), os 5 erros considerados e dois tipos de cálculo.

A Figura 12 apresenta as regressões logarítmicas para o caso $\alpha = 2.70$. Constata-se que os volumes calculados variam pouco (a única variação é devida à variação de H_1 no cálculo de $V_1 = H_1 \cdot S_1 / 2.70$, o qual vale sucessivamente 1 m, 1.50 m, 2.00 m, 2.50 m, 3.00 m). O deslocamento da reta é devido à translação sobre o eixo X resultante do erro.

As variações decorrentes de um erro sobre H_0 assim evidenciadas, devem ser modificadas quando se altera a situação de referência estudada, a qual caracteriza-se por: curvas de nível de 50 em 50 cm, de 2 metros até 7 metros.

O primeiro teste considerando curvas de nível de metro em metro não destacou variações significativas.

O segundo teste efetuado para um açude com levantamento apenas entre 4 e 7 metros (caso de um açude parcialmente cheio, por exemplo) forneceu os resultados seguintes (Tabela 3):

VARIAÇÃO DE (ALFA;K) EM FUNÇÃO DO ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO

Fig.11

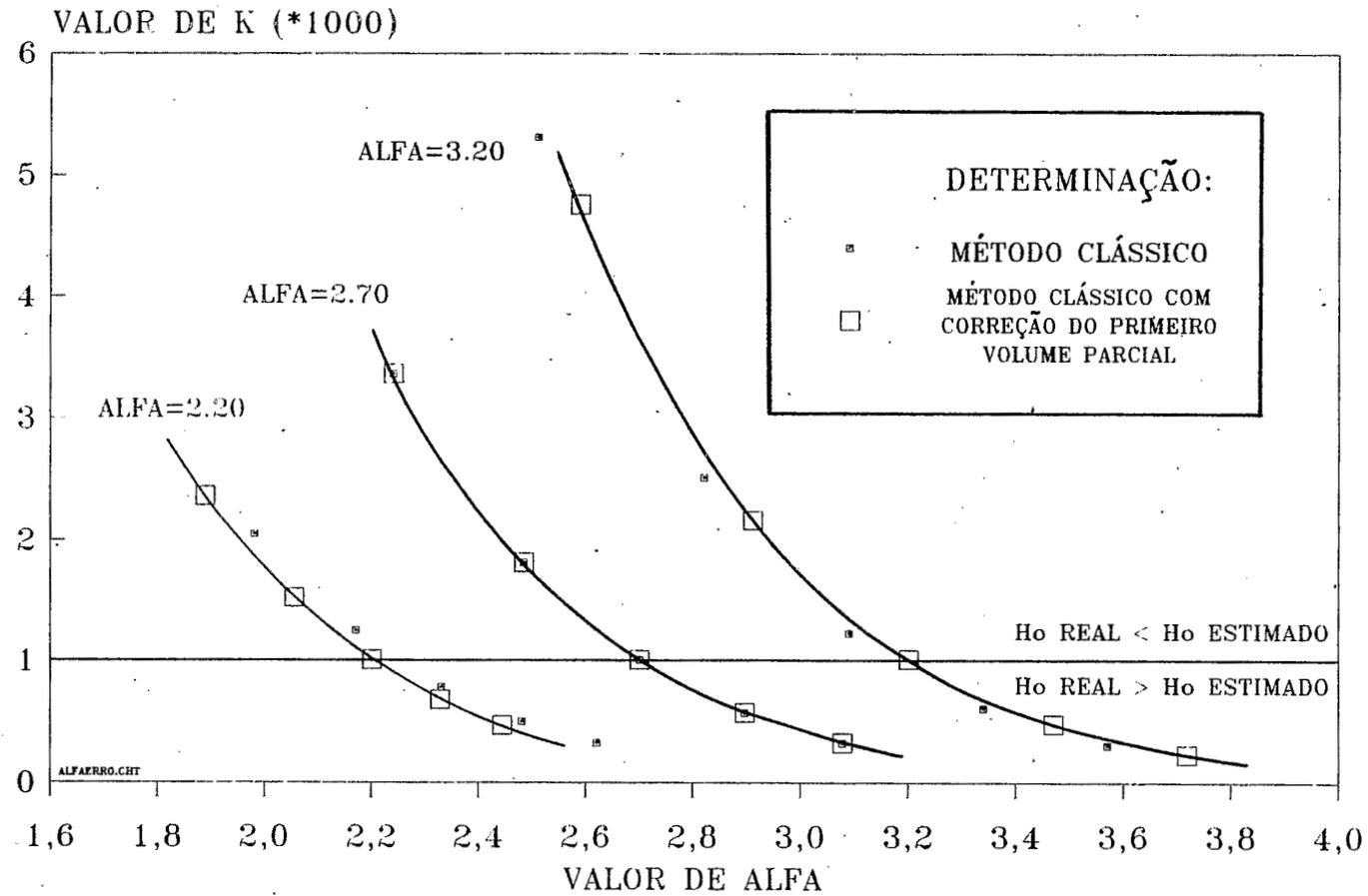


Fig.12 VARIACÃO DA ESTIMATIVA DE ALFA
EM FUNÇÃO DO ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO

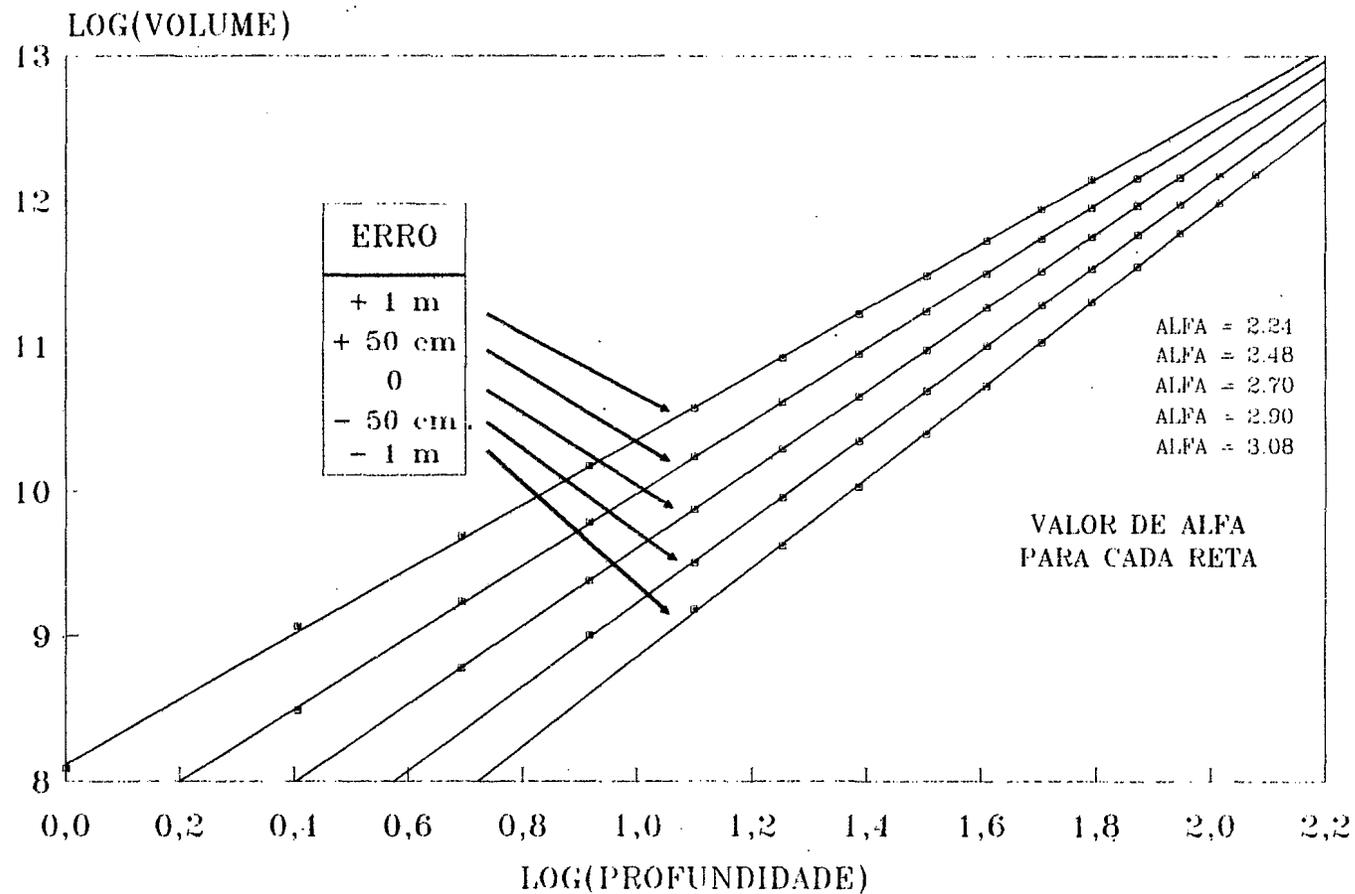


TABELA 3

Variação decorrente de um erro sobre H_0 para $H_1 = 4m$

	ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO (m)				
	-1	-5	0	5	1
α	2.86	2.784	2.10	2.609	2.507
K	524	718	999	1415	2043
DIFVx %	5.3	2.7	0.1	-2.2	-5.8
DIFV(5) %	12.1	6.5	0.1	-7.3	-15.8

Observa-se uma atenuação da variação de K e α , mas um aumento dos erros sobre os volumes que foram multiplicados por três.

O terceiro teste para um açude menor, de 4 metros de profundidade e levantamento de 2 a 4 metros com espaçamento das curvas de nível de 50 cm e $\alpha = 2.70$, forneceu as seguintes variações (Tabela 4):

TABELA 4

Variação decorrente de um erro sobre H_0 para $H_x = 4m$

	ERRO SOBRE A COTA DO FUNDO (m)				
	-1	-5	0	5	1
α	3.025	2.875	2.703	2.50	2.556
K	346	578	999	1790	3341
DIFV _x %	7.3	3.9	0.2	-3.8	-8.1
DIFV(5) %	14.5	7.9	0.3	-8.8	-19.7

As variações registradas de (α) e (K) são quase iguais, mas os erros sobre os volumes são muito mais importantes, 3 a 4 vezes superiores aos da situação de referência.

Esta análise tem consequências fundamentais que podem ser assim resumidas:

- Os valores de (α) e (K) , embora representativos das características da represa têm sensibilidade bastante grande. Entretanto, as suas respectivas variações são opostas, de tal maneira que o volume final é pouco alterado.
- Os erros sobre a estimativa dos volumes armazenados decorrentes de uma má avaliação da cota do fundo aumentam para um açude pequeno e para levantamentos parciais.
- Querendo adotar (α) e (K) como indicadores geométricos, devemos estabelecer regras estritas suscetíveis de evitar erros sobre H_0 :
 - . **Caso de um riacho com calha.** Evidenciando-se, ao fazer um levantamento, uma calha do riacho entalhada no vale; deve-se desprezá-la e considerar o ponto mais baixo fora da calha. O volume correspondente é desprezível.
 - . **Caso de um açude com cacimba.** Um caso semelhante é o do açude já construído, no fundo do qual cavou-se uma cacimba para aproveitamento das eventuais reservas subterrâneas quando o açude seca. Considera-se o ponto mais baixo fora da cacimba.
 - . **Caso de um açude com caixa.** Em muitos casos, o material necessário à construção da parede é tirado da área situada logo a montante do local da represa, de maneira a diminuir os movimentos das máquinas. Isso provoca uma modificação na forma da bacia. A cava assim formada é chamada caixa, ou caixão, ou porão. Um novo levantamento após a construção deveria, além de acusar uma descontinuidade na curva cota/superfície, levar a um (α) maior e a um (K) menor. Essa escavação não modifica muito, na maioria dos casos, o volume armazenado (o volume de terra, em média, representa 12% do volume d'água (ver capítulo 7)), mas aumenta o tempo de disponibilidade da água, já que, a profundidade é incrementada. A Figura 13 mostra a caixa de um açude recém-acabado.
 - . **Caso de um açude assoreado.** É o caso inverso do anterior. Com o tempo, os açudes tendem a assorear-se, ou seja, aterrar-se à medida em que os elementos sólidos trazidos pela correnteza ali se depositam. Esse fenômeno acarreta uma mudança de geometria, diminuindo a profundidade do açude.

FIG.13 UM AÇUDE E SUA CAIXA APÓS CONSTRUÇÃO



Um levantamento realizado após um processo de assoreamento deve levar a um valor de (α) menor e a um valor de (K) maior, segundo esclarecimentos dados acima.

Em alguns casos, este fenômeno pode, no decorrer dos anos, chegar a modificar o volume armazenado de forma sensível, além de reduzir a profundidade da represa.

Enfim, vale ressaltar os seguintes aspectos importantes:

- No caso do levantamento de um açude que contém água, deve-se recorrer à batimetria, sendo, às vezes, difícil determinar o ponto mais baixo. A tendência, neste caso, será encontrar um (α) um pouco menor do que o real (caso idêntico ao do assoreamento).
- Os dois efeitos (caixa e assoreamento) se compensam, se bem que suas consequências na determinação de (α, K) sejam atenuados. (Figuras 14 e 15)

- No caso de um levantamento efetuado antes da construção, pode-se determinar H_0 com precisão e conservar o par (α, K) então calculado, mesmo no caso em que se venha a escavar uma caixa, desde que o seu volume seja pequeno frente ao volume total armazenado.

VARIAÇÃO DA GEOMETRIA



Fig.14

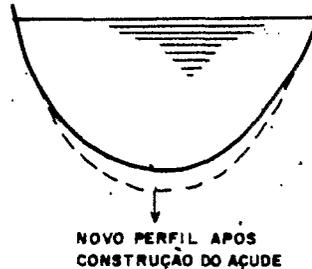


Fig.15

3.4 - DETERMINAÇÃO POR REGRESSÃO PONDERADA

A regressão sobre os logaritmos de H e V (procedimento conveniente e necessário à calibragem de uma função potência) apresenta duas limitações:

- 1) dá um peso idêntico a todos os pontos;
- 2) considera valores logarítmicos que encolhem a realidade.

Já vimos, como consequência disto, que a maneira de calcular o primeiro volume parcial (V_1) tem influência sobre o valor de (α) . Isso é devido à variação do primeiro ponto da regressão que "puxa" a reta ajustada. Ora, um determinado erro nos pontos baixos, relativos a fracos valores da profundidade e do volume, têm pouca importância frente a igual erro no volume máximo.

Para evitar tal fenômeno, é possível fazer regressões ponderadas, visando dar maior peso aos pontos altos. Um pequeno programa informático chamado GEOPAC, apresentado anexo, permite executar dois tipos de regressão: a primeira atribui a cada ponto $(\text{Log}(H_i), \text{Log}(V_i))$ um peso igual a H_i e a segunda, um peso igual a V_i .

Deste procedimento resulta, evidentemente, um afrouxamento do ajustamento nos pontos baixos e erros relativos

maiores. Em consequência disso, convém eliminar do ajustamento os pontos (H_i, V_i) mais baixos, fixando-se um limite arbitrário sob a forma de uma percentagem do volume máximo V_x . Adotamos o valor de 15%; isto significa que todos os pontos (\hat{H}_i, V_i) com V_i menor que $0.15 \cdot V_x$, não são contemplados na regressão. (Figura 16)

As variações induzidas no resultado e as justificativas de tal escolha serão apresentadas e discutidas ulteriormente.

Entretanto, já é bom notar que os pontos mais baixos, assim eliminados, ao refletirem as irregularidades dos leitos dos riachos, introduziam perturbações sem significado.

De um ponto de vista teórico, os valores (α, K) assim determinados, deverão ficar mais correlatos à geomorfologia dos vales do que às variações da dinâmica fluvial que afetam os leitos.

Além do mais, de um ponto de vista prático, temos interesse em aumentar a precisão do ajustamento na parte da curva que corresponde ao aproveitamento do açude. Tendo-se, geralmente, um volume morto, o critério adotado é coerente com a realidade. Um ajustamento simples só teria validade se quiséssemos estudar o que acontece quando o açude está próximo de secar, momento em que, geralmente, não há mais retirada d'água fora do abastecimento (neste caso o volume deixa de ser preponderante: a profundidade determina o tempo de disponibilidade em água).

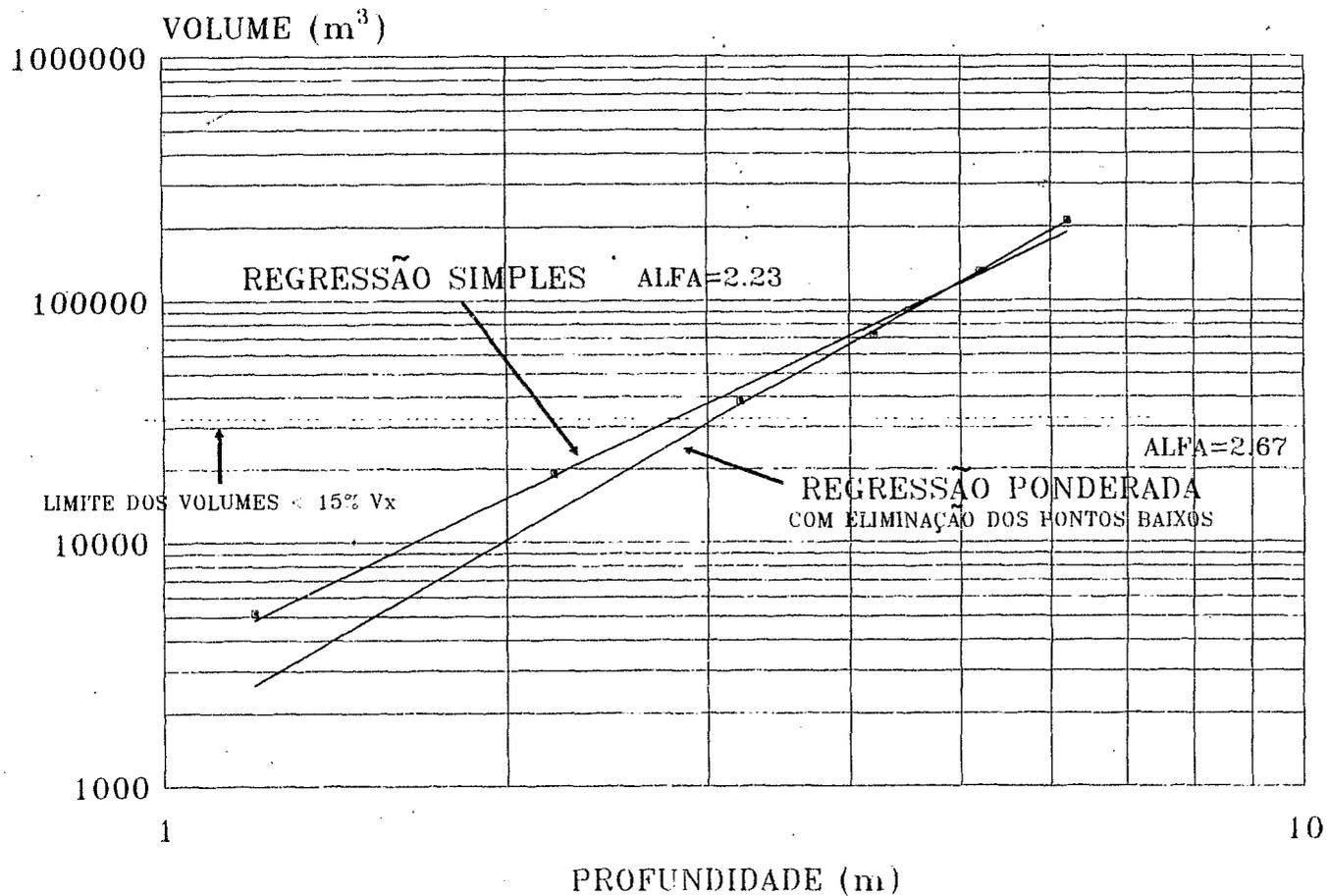
3.5 - OUTRAS REGRESSÕES: $S(H)$, $V(S)$

Pode parecer estranho e inútil, à primeira vista, a determinação prévia dos volumes V_i quando teria sido possível executar, de imediato, uma regressão entre os valores de H_i e de S_i . Por integração da função potência assim obtida, poder-se-ia obter a lei cota/volume sem maiores cálculos.

A razão dessa escolha reside nos melhores ajustamentos obtidos a partir dos pares (H_i, V_i) . É sabido e patente que o processo de integração absorve as irregularidades e restitui uma curva "suavizada" (ao contrário da derivação), o que justifica a preferência pelo procedimento adotado.

Devemos, portanto, cientificar de que a fórmula derivada de um ajustamento $V = K \cdot H^\alpha$, ou seja, $S = \alpha K H^{(\alpha-1)}$, fornecerá um ajustamento, em geral, menos satisfatório de que o inicial, relativo aos volumes, por razões opostas às aludidas acima.

Fig.16 EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE ALFA
COM REGRESSÕES SIMPLES E PONDERADA



Um caso extremo é ilustrado pelo açude Salgadinho cuja Tabela CSV é:

H (m)	V (m ³)	S calculado (m ²)	S levantamento (m ²)
1	1454	3853	46800
2	9126	12092	127000
3	26726	23608	26760
4	57283	37950	35900
5	103475	54842	49500
6	167751	74090	68450
7	252391	95548	97000
8	353545	119099	157000

A regressão ponderada fornece $\alpha = 2.65$, $K = 1454$ e diferenças máximas entre o levantamento e o cálculo de 6% (ou 3% se expressa em % de V_x). O ajustamento não é muito bom, mas a diferença entre S (levantamento) e $S = \alpha.K.H^{(\alpha-1)}$ é ainda mais marcada, chegando-se a um desvio de 24%.

Tamanho fenômeno acontece quando há **uma variação brusca** da geometria, caracterizada neste exemplo pelo grande aumento de superfície, +60%, entre as cotas 7 e 8 metros.

Existe, também, a possibilidade de efetuar uma regressão entre os valores da superfície e do volume. O ajustamento é ainda melhor mas de menor utilidade.

4 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA

Com o intuito de obter ampla informação sobre a variação da geometria dos pequenos reservatórios e sobre diversas correlações a serem evidenciadas entre os parâmetros em jogo, esforçou-se em reunir o maior número possível de plantas de projetos relativos a pequenos açudes, chegando-se ao acervo descrito a seguir.

Esse acervo reúne informações sobre 420 represas e apresenta um total de 25.000 dados disponíveis em um arquivo DBASE III. A cada açude são associados 60 parâmetros pormenorizados a seguir, os quais foram extraídos de plantas topográficas detalhadas e de suas referentes tabelas cota/superfície/volume. Os nomes em negrito indicam as variáveis correspondentes do arquivo DBASE.

4.1 - PARAMETROS DA BASE DE DADOS

4.1.1 - Origem dos dados

A maioria das plantas foram conseguidas nos antigos núcleos do Projeto Sertanejo que contavam com a colaboração técnica do DNOCS.

Outras são oriundas do Projeto de Desenvolvimento da Pequena Irrigação com Base em Açudes e do Programa de Bacias Hidrográficas Representativas, ambos desenvolvidos no âmbito da SUDENE/DPG/ PRN/GT.HME.

Vinte e sete curvas cota/superfície/volume foram fornecidas pela UFPB a partir de levantamentos feitos na microrregião de Catolé do Rocha. Onze curvas suplementares foram extraídas dos arquivos da CISAGRO-PE.

As últimas foram conseguidas nas "memórias de açudagem" da Inspetoria de Obras Contra a Seca e remontam a 1912.

TABELA 5

Distribuição da Amostragem em função da origem

ORIGEM	NÚMERO DE AÇUDES
Projeto Sertanejo:	
Núcleo de Caicó	104
Núcleo de Acari	73
Núcleo de Pombal	44
Núcleo de Pau dos Ferros	45
Núcleo de Açú	10
Núcleo de Tauá	09
Núcleo de Catolé do Rocha	11
Núcleo de Souza	12
Programas SUDENE:	14
IOCS	60
UFPB	27
CISAGRO-PE	11
T O T A L	420

Existem também levantamentos oriundos do Projeto Sertanejo, disponíveis no Município de Icó (CE), mas estes não foram conseguidos.

4.1.2 - Repartição geográfica

A Figura 17 mostra a distribuição geográfica da Amostra.

Cada núcleo é identificado pelo nome do Município principal (MUNI) e por uma letra código, a qual encontra-se, no arquivo, adjunto ao nome de cada açude (NOME). O mapa apresenta, ainda, o número de açudes para cada núcleo; nota-se a presença de três conjuntos relativos ao Ceará (C), Rio Grande do Norte (R) e Paraíba (P), de açudes espalhados em diversos Municípios e assim agrupados.

Cada núcleo corresponde, geralmente, ao Município do mesmo nome mais os Municípios vizinhos.

O grande número de açudes oriundos da região de Seridó/RN e oeste da Paraíba traduz a alta densidade de reservatórios ali existentes (Molle,1990).

A repartição por Estado fornece a tabela seguinte:

TABELA 6

Repartição da Amostragem por Estado

ESTADO	Nº DE AÇUDES
Ceará	31
Rio Grande do Norte	268
Paraíba	108
Pernambuco	13

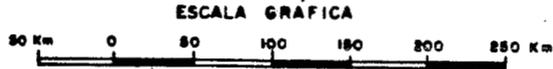
4.1.3 - Qualidade dos dados

A qualidade dos dados é bastante variável. Foi adotado um índice de qualidade (QUALI) cujo valor vale 1 para plantas de boa qualidade e 0 para plantas de qualidade duvidosa. Trata-se de um critério subjetivo mas, baseando-nos na experiência, é bastante fácil identificar plantas de execução rápida, as quais, muitas vezes, apresentam incoerências ou simplificações no desenho da bacia. Os açudes que não apresentam planta topográfica, mas apenas as curvas cota-volume e cota-superfície, foram agrupados na classe QUALI = 0, não se podendo verificar a qualidade do levantamento.

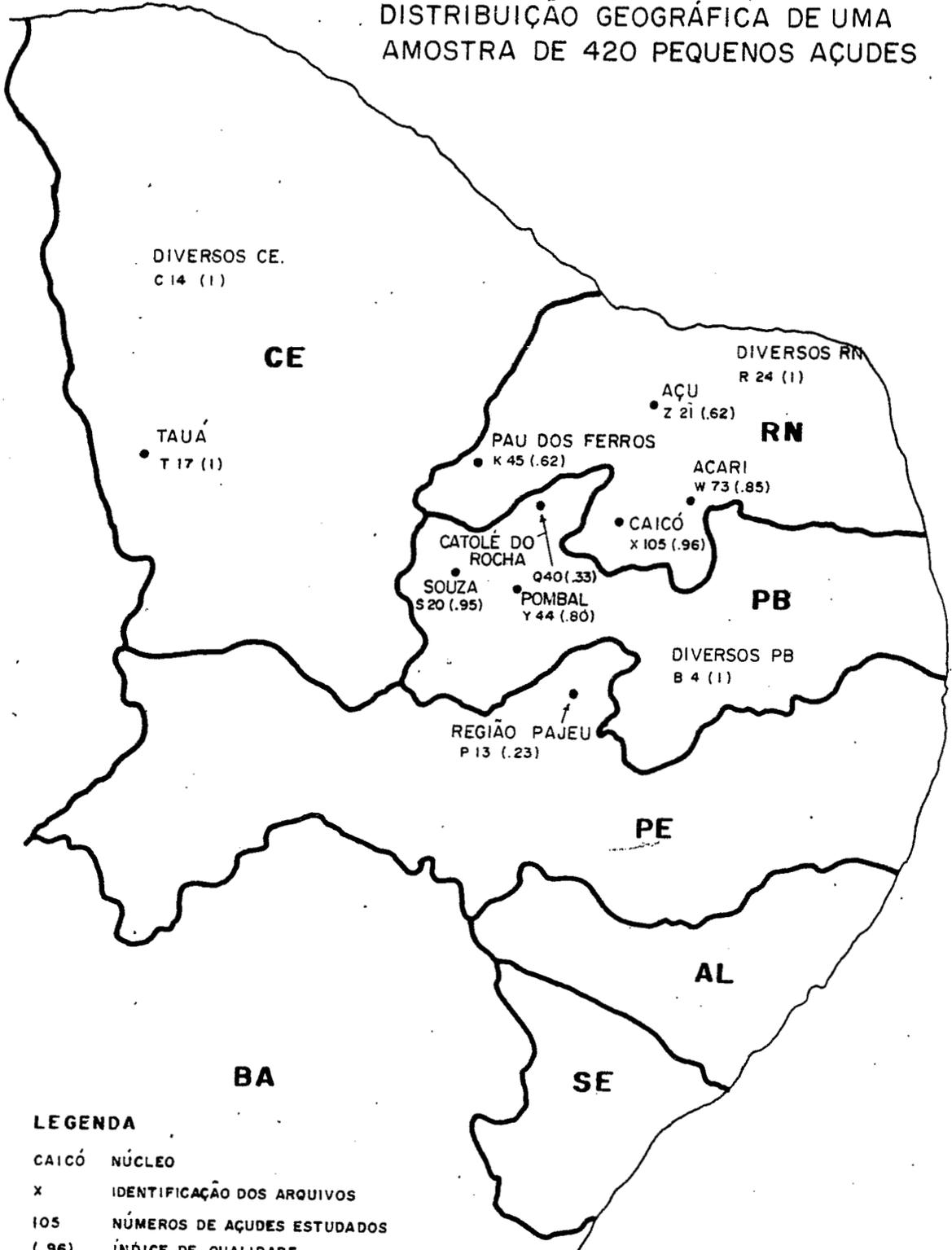
A Figura 18 reproduz uma das plantas da amostra da IOCS, a qual ressalta a extraordinária qualidade e precisão do levantamento.

A Tabela 7 fornece a média do coeficiente QUALI para cada Núcleo.

Fig.17.



DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE UMA AMOSTRA DE 420 PEQUENOS AÇUDES



LEGENDA

- CAICÓ NÚCLEO
- X IDENTIFICAÇÃO DOS ARQUIVOS
- 105 NÚMEROS DE AÇUDES ESTUDADOS
- (.96) ÍNDICE DE QUALIDADE

Nº 11

INSPECTORIA DE OBRAS CONTRA SECCAS

2ª SECÇÃO

AÇUDES PARTICULARES

„LAGÔA DO MATTO”

Proprietario José L. Machado de Sá

Município de Arari - Estado de Rio Grande do Norte -

APPROVO
No. de licença 24.841. Arari, 1911
Eng. M. B. de Sá
SECRETARIO

Perfil longitudinal da parte da linha C-D
na parte mais baixa de antiga sagração.

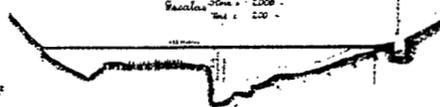


Perfil longitudinal da parte da linha C-B
na parte de antiga sagração.



Nota: Este perfil foi desenhado
por J. L. de Sá

Perfil longitudinal da parte -
Escala: 50m = 1:200 -
10m = 1:200 -



Arari, 1911

Perfil da calçada no
sagração da linha
C-D -
Escala 1:100

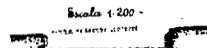


Perfil da calçada e muro
de alva no sagração -
Escala 1:200



Projectado por J. L. de Sá

Perfil da calçada e muro de alva no
sagração da linha C-B -
Escala 1:200 -



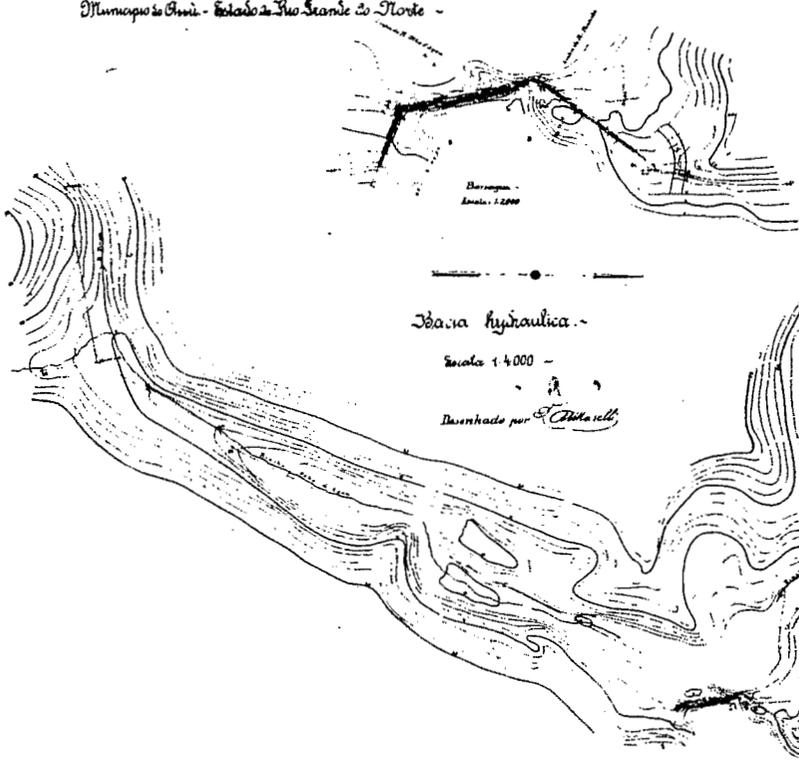
Perfil horizontal do muro de alva
Escala 1:25 -



Bacia hydraulica -

Escala 1:4000 -

Desenhado por J. L. de Sá



Bacia hydrographica -

Escala 1:200.000 -

TABELA 7
Distribuição dos projetos por Municípios

NÚCLEO	IDENTIFICAÇÃO	QUALI	OBSERVAÇÕES
Caicó	X	.96	
Acarí	W	.85	-
Pombal	Y	.80	-
Catolé	Q	.33	27 açudes da UFPB sem plantas
Tauá	T	1.00	-
Souza	S	.95	-
Açu	Z	.62	Proj. Sert. qualid. inferior
Pajeú	P	.23	-
Pau dos Ferros	K	.62	Proj. Sert. qualid. variável
CE diversos	C	1.00	-
RN diversos	R	1.00	-
PB diversos	B	1.00	-

4.1.4 - Tipo de projeto (TIPO)

68% das plantas analisadas referem-se a projetos de construção de açude, dividindo-se o restante entre projetos de reforma (17%) e de ampliação (16%), conforme mostrado na Figura 19.

4.1.5 - Tamanho das açudes

As Figuras 20, 21 e 22, caracterizam a amostragem a partir das distribuições relativas às variáveis Profundidade máxima (H_x), Superfície máxima ($SUPMAX$) e Volume máximo ($VOLMAX$), cujas características estatísticas se encontram reunidas na Tabela 8.

TABELA 8
Valores freqüenciais de H_x , S_x , V_x

PROBABILIDADE	.1	.25	.50	.75	.9	MEDIA
Profundi- dade(m)	7.40	6.20	5.00	4.00	3.30	5.21
Superfície(m ²)	260000	108080	53500	31400	21000	97506
Volume(m ³)	660084	224620	95955	50075	296502	15646

Fig.19 DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DO TIPO DO PROJETO

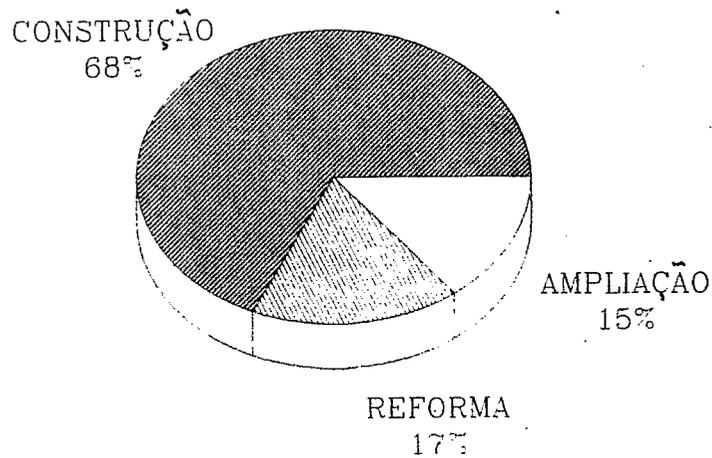


Fig.20 DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE (420 AÇUDES)

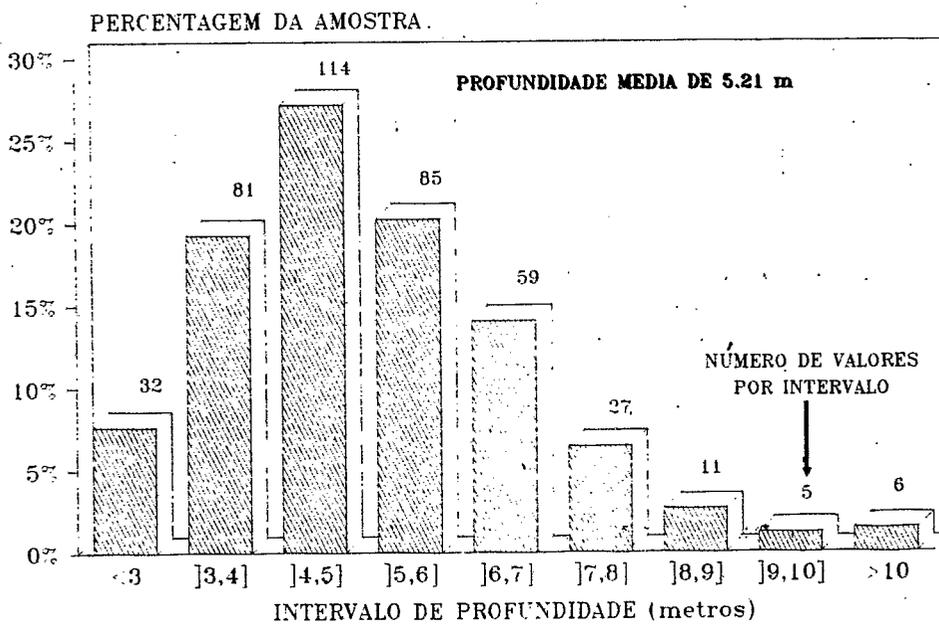


Fig.21

DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA SUPERFICIE DO ESPELHO D'ÁGUA

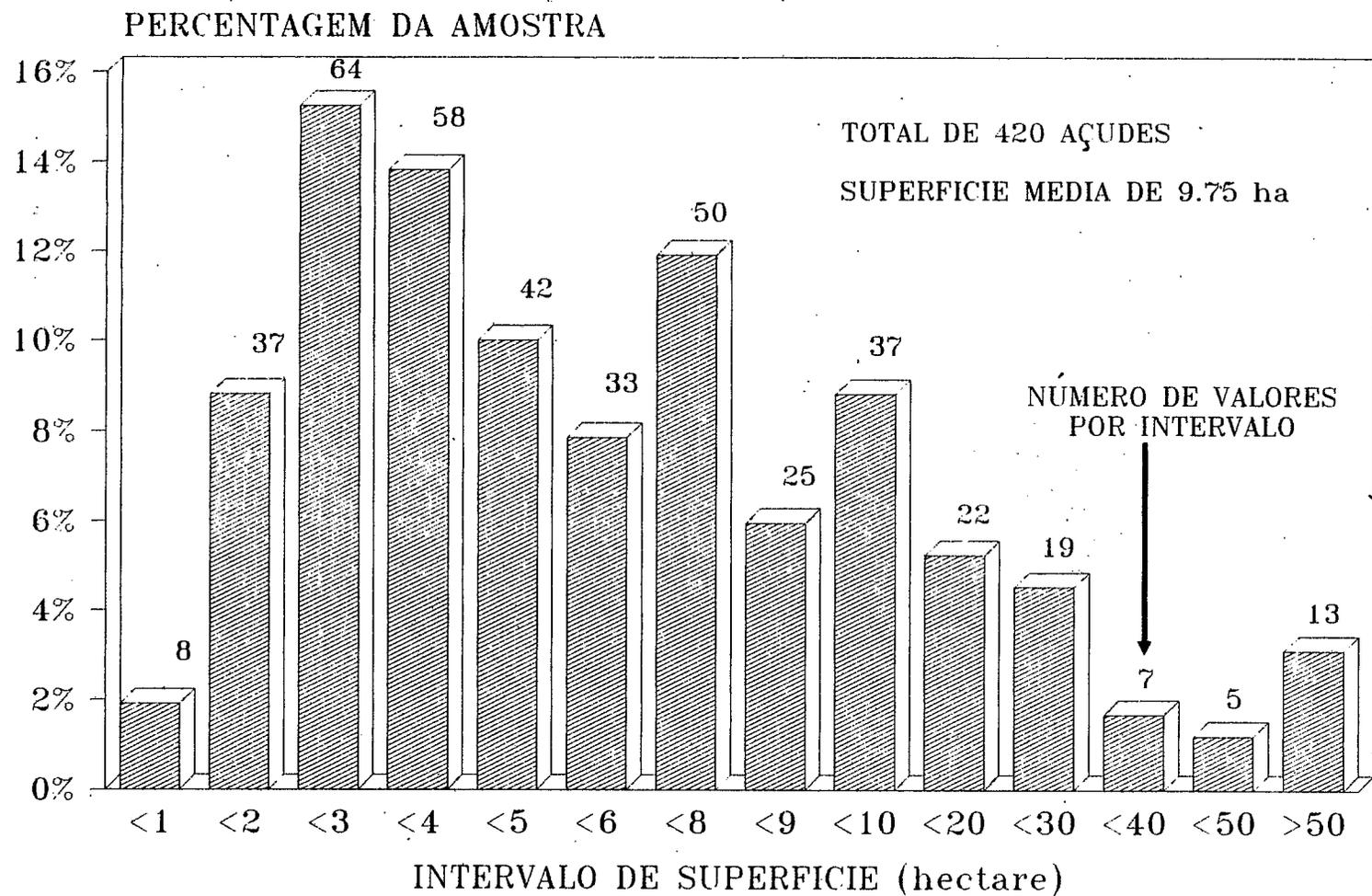
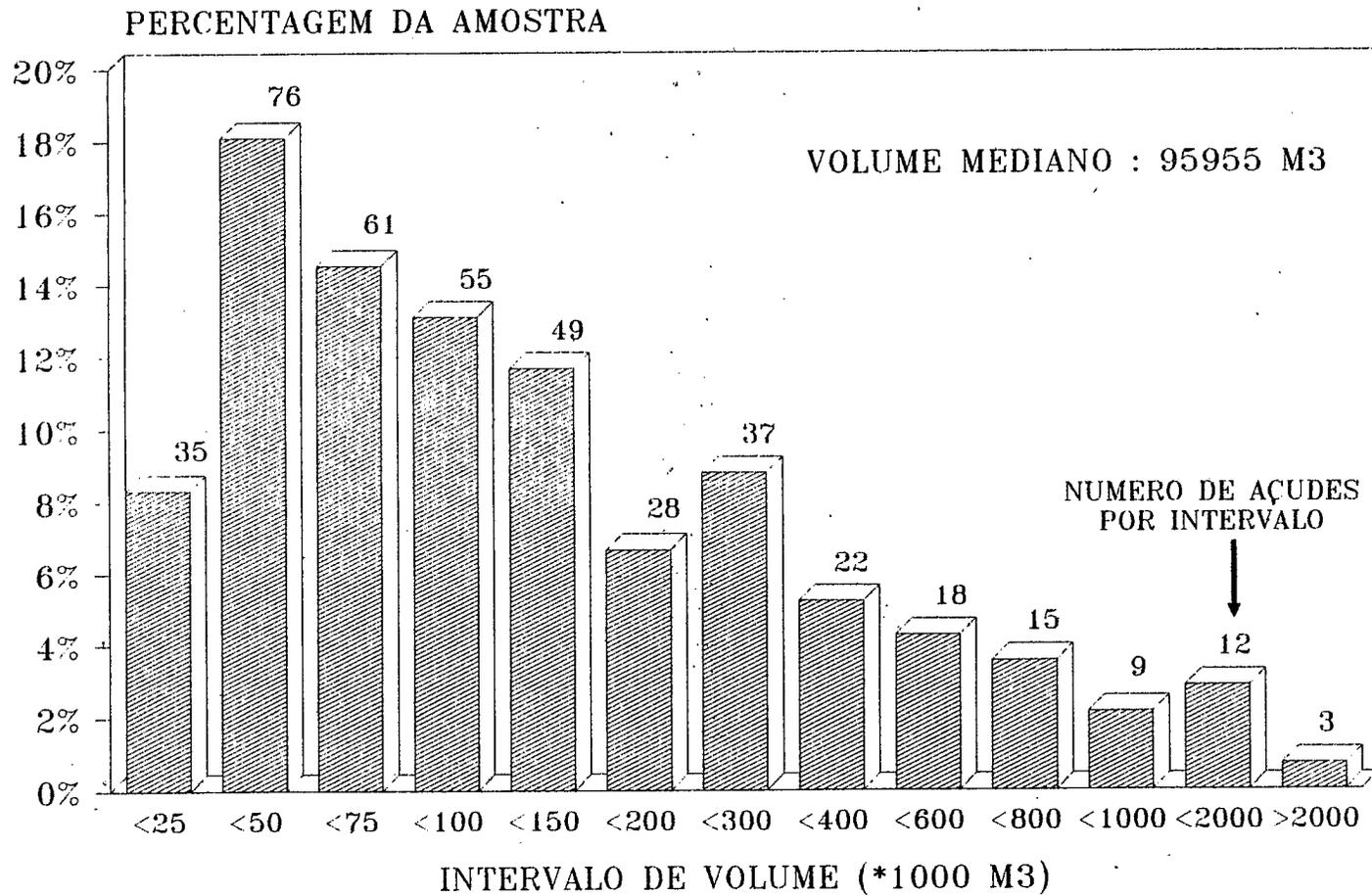


Fig.22

DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DO VOLUME (420 AÇUDES)



Constata-se que as médias são bem superiores às medianas, em decorrência da presença de açudes de porte mais importante que "puxam" os valores das médias para cima. 80% dos açudes têm profundidade entre 3.30 m e 7.50 m e volumes entre 30.000 e 660.000 m³. Este limite superior deve-se à presença, na amostragem, de 60 projetos da IOCS que têm, exceto alguns casos, volume superior a 200.000 m³.

Arredondando-se os valores medianos, podemos dizer que o açude mediano da amostra analisada tem 5 metros de profundidade, 5 hectares de espelho d'água e 100.000 m³ de capacidade.

4.1.6 - Características da parede

Somente 8 dos 420 açudes cadastrados são barragens de alvenaria, sendo o restante constituído de terra compactada. Podemos distinguir as características seguintes:

- Comprimento da parede

O comprimento da parede (COMPAR) dos açudes estudados é bastante variável e a distribuição correspondente encontra-se no gráfico da Figura 23.

Encontra-se um valor médio de 179 m, tendo 89% dos açudes, comprimentos entre 95 e 300 m. A mediana é 160 m.

10 açudes apresentam 2 paredes, encontrando-se, ainda, 3 açudes de 3 paredes e 1 de 4.

- Número de trechos (TRECHO)

Somente 75% das paredes são constituídas de um maciço reto. Em 21% dos casos, encontram-se dois trechos sucessivos que formam um ângulo e, em 4% dos casos, três (ou mais) trechos. 1 açude da amostra tem parede circular (Figura 24).

- Declive dos taludes

Todas as plantas apresentam diques com taludes de 1:2, com exceção dos 60 açudes construídos pela IOCS que contam com taludes de 1:1.5.

Fig.25 DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA LARGURA DO SANGRADOURO

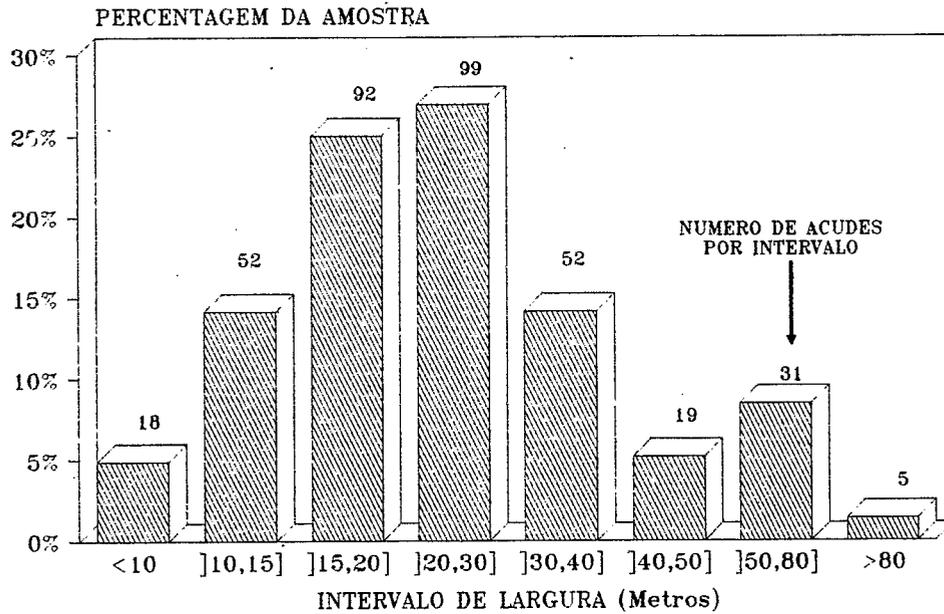
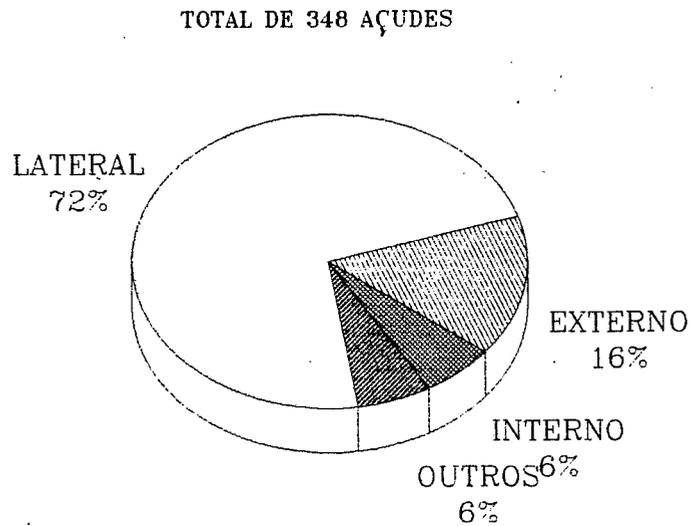


Fig.26 DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DO TIPO DE SANGRADOURO



- Largura da crista (CRISTA)

A largura da crista é, geralmente, de 3 m (78% dos açudes): 8% têm largura inferior a 3 m e 14% têm largura superior.

- Volume de terra (ATERRO) (CUTOFF)

O volume de terra médio do maciço (ATERRO) vale 7651 m³, tendo 80% dos açudes um volume incluído entre 4200 e 9000 m³.

A distribuição da amostragem segundo o volume da fundação (CUTOFF) fornece uma média de 1400 m³ e uma mediana bem inferior (715 m³), tendo 80% dos açudes um volume de fundação entre 570 e 1300 m³.

- Profundidade da fundação (FUND)

Os valores da profundidade da fundação (tratam-se de projetos) seguem uma distribuição cujos marcos são relacionados abaixo:

TABELA 9

Distribuição da profundidade da fundação

PROBABILIDADE	.9	.75	.5	.25	.1	MÉDIA
VALOR FREQUENCIAL(m)	1.20	1.60	2.00	2.60	3.30	2.20

4.1.7 - Características do sangradouro

- Tipo de sangradouro (TIPOSANG)

Distingue-se os tipos de sangradouro seguintes, com suas respectivas frequências de ocorrência (Figura 25):

- 16% **EXTERNO:** a sangria faz-se por um vertedor natural separado da parede, geralmente em outro riacho.
- 6% **INTERNO:** o sangradouro está situado no meio da parede. (vertedouro cimentado)
- 72% **LATERAL:** o sangradouro encontra-se em uma extremidade da parede, a qual é, geralmente, protegida por um muro lateral.

6% OUTROS: trata-se de associações de vários sangradouros: 2 sangradouros laterais, um em cada extremidade (9 casos), barragens galgáveis (barragem = vertedouro) (3 casos) e as associações seguintes: INT + LAT x 2; EXT x 2; INT + EXT; LAT + EXT x 2.

Observamos que o sangradouro lateral é o mais comum. A percentagem referente ao tipo externo é amplamente decorrente da grande proporção (50%) de tais sangradouros na amostragem oriunda da IOCS, a qual, remonta a 1912, época em que esse tipo, mais confiável, era preferido e procurado.

- Comprimento do sangradouro (COMPSANG)

A Figura 26 apresenta a distribuição relativa ao comprimento do sangradouro.

53% dos sangradouros têm comprimento entre 15 e 30 metros. Observamos valores extremos de mais de 80 metros (5) e de menos de 10 metros (15).

- Lâmina máxima, revanche e folga

Alguns projetos (178) indicam qual é a lâmina máxima (LMAX) prevista no vertedouro.

O estudo da distribuição dessa lâmina (Figura 27) mostra uma média de 72 cm e uma grande concentração entre 50 e 75 cm, sem que se saiba se se trata da aplicação de uma norma ou se os cálculos de cheia foram realmente feitos. Essa segunda hipótese é pouco provável já que somente 97 projetos (fora da amostra da IOCS) apresentam a área da bacia hidrográfica.

A revanche (diferença entre a cota do coroamento (COROA) e a cota do sangradouro) é, geralmente, prevista entre 1.50 m e 2.00 metros (89% dos casos) como mostrado na distribuição da Figura 28. Em todos os projetos da IOCS (60) o valor considerado é 1.50 m.

A folga, ou seja, a altura remanescente prevista entre o coroamento e a lâmina máxima tem média de 1 m.

4.1.8 - Rede hidrográfica

Anotamos o número de riachos afluentes à bacia hidráulica do açude (RIACHO). A distribuição correspondente a essa variável está apresentada na Figura 29. Para tentar melhorar

Fig.23

**DISTRIBUIÇÃO DO COMPRIMENTO DA PAREDE
AMOSTRA DE 376 ACUDES**

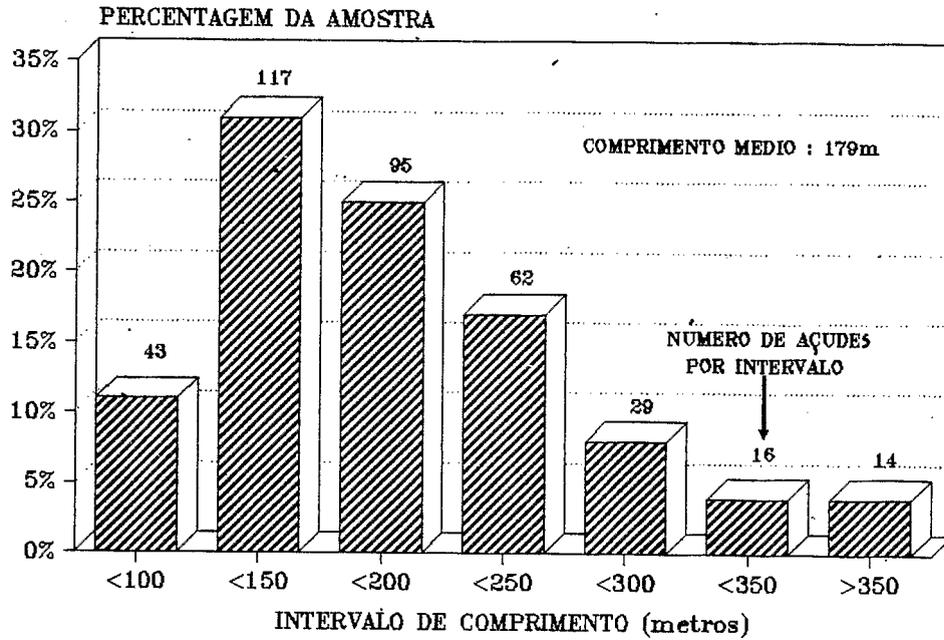


FIG. 23

Fig.24

**DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE TRECHOS
DA PAREDE (AMOSTRA DE 320 ACUDES)**

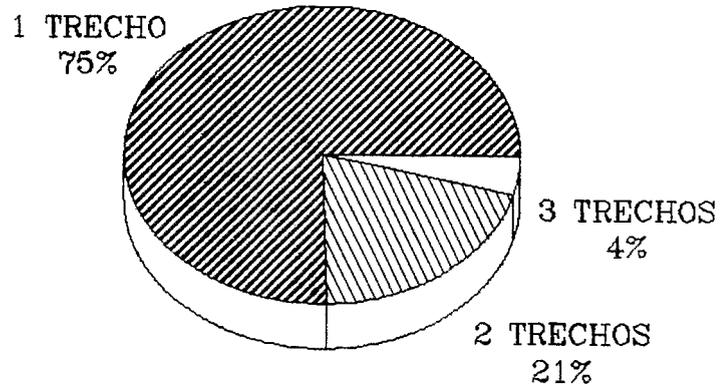


Fig.27

DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA LAMINA MÁXIMA DE PROJETO

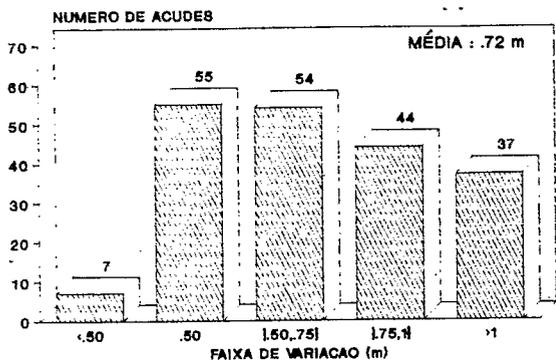


Fig.28

DISTRIBUIÇÃO DA AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA REVANCHE: COTA COROAMENTO - COTA SANGRIA

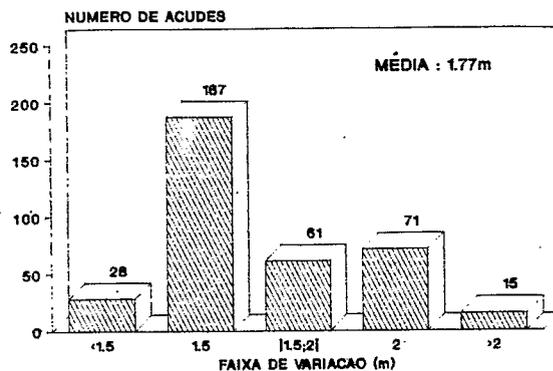


Fig.29

DISTRIBUICAO DA AMOSTRAGEM EM FUNCAO DO NUMERO DE RIACHOS

TOTAL DE 311 ACUDES

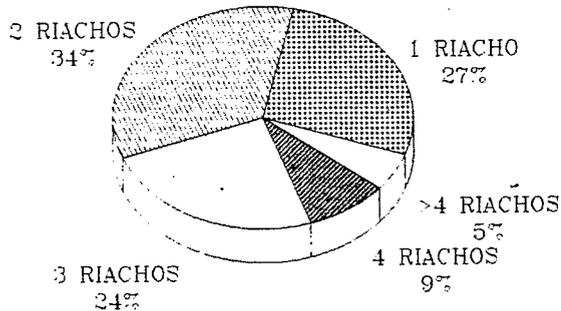
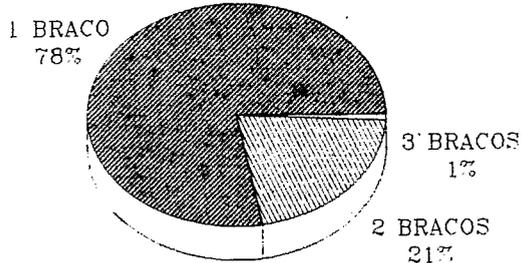


Fig.30

DISTRIBUICAO DA AMOSTRAGEM EM FUNCAO DO NUMERO DE BRACOS

TOTAL DE 314 ACUDES



essa noção que pode depender da precisão do desenho da planta, definiu-se a variável (**BRAÇO**). Um riacho é considerado um braço quando o comprimento de seu percurso, a partir da cota máxima do açude até a confluência com o riacho de maior comprimento, é maior do que a metade do comprimento do maior riacho.

4.1.9 - Bacia Hidrográfica

Poucas plantas (97), com exceção dos 60 projetos da IOCS apresentam o valor da superfície da bacia hidrográfica (**BACIA**). Mesmo assim, os valores apresentados, geralmente acompanhados de um croquis da referida bacia, devem ser considerados com muita cautela. Isso porque a determinação da bacia hidrográfica é delicada quando não se dispõe do material adequado e dos mapas (ou fotos) de escala conveniente. Houve até o caso do desenho de uma bacia cujo perímetro não passava pela parede do açude.

Os desenhos das bacias que não estavam acompanhados do valor da superfície não foram planimetrados, a menos que tenham apresentado detalhes da rede hidrográfica.

Obtivemos, assim, uma bacia média de 5.31 km² para 97 açudes e outra de 50.5 km² para 59 projetos (de maior porte) da IOCS.

4.1.10 - Indicador de geometria

A fim de destacar açudes que apresentem uma geometria particular ou "anormal", criou-se a variável (**EX**). Evidenciamos 20 açudes de geometria anormal (**EX = E**), ou seja, apresentando particularidades do tipo seguinte:

- existe a parede (às vezes arrombada) de um antigo açude ou barreiro na bacia hidráulica.
- Existem ilhas na bacia ou, ao contrário, depressões marcadas e singelas.
- O barramento corta dois riachos paralelos.

Em outro extremo, açudes com geometria a mais simples possível (um riacho, forma triangular) foram repertoriados (**EX = T**).

4.1.11 - Perfil do boqueirão

A forma do perfil do boqueirão, no local da construção da futura barragem, foi levantada, dando lugar a uma variável (BOCA), cujos valores são:

- I: perfil irregular
- V: perfil em forma de V
- U: perfil em forma de U
- G: perfil em forma de V curvado
- M: perfil misto (uma encosta côncava, outra convexa)
- B: perfil em forma de U aberto
- P: perfil reto de um lado e côncavo de outro.

4.1.12 - Outras variáveis

As outras variáveis oriundas das plantas de projetos são:

ESCALA: escala da planta

LEITO: comprimento do riacho principal. Este comprimento é medido com um curvímetro, seguindo-se o desenho do riacho e desprezando-se eventuais pequenos meandros, os quais raramente aparecem nos mapas.

PERI: perímetro do espelho d'água

DIAM: diâmetro do açude: distância entre o centro da barragem e o ponto mais distante do espelho d'água máximo.

COTAF2: a cota do fundo do açude corresponde, às vezes, ao fundo da calha de um leito escavado. COTAF2 é o fundo do vale fora da calha.

COTACOM: cota pela qual são calculados os valores de LEITO, DIAM e PERI. Faz-se necessário essa variável, já que nem sempre existe uma curva de nível correspondente à cota de sangria. Caso essa cota corresponda a uma curva de nível, teremos: $COTACOM = COTASANG$. No caso contrário, COTACOM é igual ao valor da curva de nível mais próxima de COTASANG.

SUPCOM: Superfície correspondente a COTACOM, necessária para cálculo dos índices de compacidade (ver mais adiante).

CHU: precipitação anual média no município do açude.

OBS: observações relativas ao projeto.

4.2 - VARIÁVEIS CALCULADAS

Além das variáveis descritas acima, armazenamos no arquivo de dados dois tipos de variáveis:

- variáveis correspondentes à geometria da represa; valores de (ALFA, K) e erros correspondentes obtidos sob várias condições e fornecidos pelo Programa GEOPAC, a partir das relações Cota/Superfície;
- variáveis calculadas a partir dos dados básicos.

Essas variáveis podem ser detalhadas da seguinte maneira:

4.2.1 - Variáveis geométricas

- (NPONTO) é o número de pares (Hi, Si) da Tabela Cota/Superfície do Projeto, transferidos para o programa GEOPAC.
- (ALFAT) (ABERT) são os coeficientes de forma e de abertura obtidos com regressão linear simples sobre a totalidade dos (NPONTO) pares.
- (DIFTA) e (DIFTB) são os valores do máximo de diferença entre os valores reais e os valores calculados pela fórmula $V = ABERT \cdot H^{ALFAT}$.
- (ALFATV), (ABERTV) são os coeficientes de forma e de abertura obtidos com regressão linear ponderada pelos valores do volume sobre a totalidade dos pontos.
- (DIFTVA) (DIFTVB) são os valores do máximo da diferença entre os valores reais e os valores calculados pela fórmula $V = ABERTV \cdot H^{ALFATV}$.
- (PONTO15) é o número de pares (Hi, Si) remanescentes após eliminação dos pares baixos, tais que, o volume correspondente é inferior a 15% de (VOLMAX).
- (ALFA15) (ABER15) são os coeficientes de forma e de abertura obtidos com regressão linear ponderada pelos valores do volume apenas sobre os (PONTO15) pares.
- (DIF15A) (DIF15B) são os valores do máximo da diferença entre os valores reais e os valores calculados pela fórmula $V = ABER15 \cdot H^{ALFA15}$.

- **SXCAL** = superfície máxima do açude, calculada com **ABER15** e **ALFA15**.
- **VXCAL** = volume máximo do açude, calculado com **ABER15** e **ALFA15**.
- **ALFA** = valor de alfa estimado por $Hx.SUPMAX/VOLMAX$
- **ALFA2** = valor de alfa estimado a partir de 2 espelhos d'água e duas profundidades.
- **ABER2** = valor de (K) correspondente a **ALFA2**.
- **VOL2** = volume máximo estimado com **ALFA2** e **ABER2**.

4.2.2 - Variáveis calculadas a partir dos dados básicos

(DE) = declividade média do riacho no trecho coberto pelo água do açude:

$$DE(\%) = (COTACOM - COTAFUNDO) * 10000/ESCALA * LEITO$$

(IC) = índice de compacidade:

$$IC = 0.00282 (PERI * ESCALA)/(SUPCOM)^{0.5}$$

Essa variável é igual à relação entre o perímetro do açude e o perímetro de um círculo de igual superfície. O círculo sendo a superfície mais compacta, IC será sempre superior a 1. Valores altos de IC (ou seja maior que 2) indicam açudes compridos e/ou ramificados.

(REC) = largura do retângulo equivalente, ou seja, do retângulo de igual superfície e igual perímetro.

$$REC = IC(SUPCOM)^{.5}/1.128 [1 + (1 - (1.128/IC)^2)^{.5}]$$

(TETA1) = ângulo do cone médio

(TETA2) = ângulo do cone corda

(SIN) = $ALFA15 * \text{Log}(ABER15)$ "assinatura do açude"

RESUMO DAS VARIÁVEIS ESTOCADAS

(Continua)

Nº NOME DA VARIÁVEL	UNIDADE	SIGNIFICADO RESUMIDO
01 NOME		Nome do açude
02 MUNI		Município onde se encontra o açude
03 NUM		Número de identificação do açude
04 TIPO		Tipo de Projeto
05 COTAFUNDO	m	Cota de fundo do riacho
06 COTAF2	m	Cota de fundo do vale
07 COTASANG.	m	Cota do sangradouro
08 LMAX	m	Cota da lâm. máxima de sangria do projeto
09 COROA	m	Cota do coroamento
10 COMPAR	m	Comprimento da barragem
11 TRECHO		Nº de trechos da barragem
12 COMPANSANG	m	Comprimento do sangradouro
13 TIPOSANG		Tipo de sangradouro
14 ESCALA		Escala da planta do açude
15 RIACHO		Nº de riachos do açude
16 BRAÇO		Nº de braços do açude
17 BACIA	km ²	Superfície da bacia hidrográfica
18 DIAM	m	Maior distância até o centro da barragem
19 LEITO	cm	Comprimento do riacho
20 PERI	cm	Perímetro do açude
21 CHU	mm	Precipitação anual do município
22 BOCA		Perfil do boqueirão
23 QUALI		Qualidade do levantamento
24 EX		Indicador de geometria "anormal"
25 COTACOM	m	Curva de nível mais próxima a COTASANG
26 SUPCOM	m ²	Superfície correspondente a COTACOM
27 SUPMAX	m ²	Superfície máxima
28 VOLMAX	m ³	Volume máximo
29 Hx	m	Profundidade máxima
30 OBS		Observações sobre o açude
31 NPONTO		Número de pares da tabela cota/superfície
32 ALFAT		ALFA regressão simples - todos os pontos
33 ABERT		K regressão simples - todos os pontos
34 DIFTA	%	Erro máximo % do volume
35 DIFTB	%	Erro máximo % VOLMAX
36 ALFATV	%	ALFA reg. ponderada V. Todos os pontos
37 ABERTV	%	K reg. ponderada V. Todos os pontos
38 DIFTVA	%	Erro máximo em % do volume
39 DIFTVB	%	Erro máximo em % do VOLMAX
40 PONTO15		Nº pontos eliminados com $V < 15\% V_x$

RESUMO DAS VARIÁVEIS ESTOCADAS

(Conclusão)

Nº	NOME DA VARIÁVEL	UNIDADE	SIGNIFICADO RESUMIDO
41	ABER15		K Reg.ponderada -pontos baixos eliminados
42	ALFA15		ALFA reg. pond. - pontos baixos eliminados
43	DIF15A	%	Erro máximo em % do volume
44	DIF15B	%	Erro máximo em % do VOLMAX
45	ALFA		Valor de ALFA calculado por $Hx.Sx/Vx$
46	SxCAL	m ²	Sup. máxima calculada com ALFA15 e ABER15
47	VxCAL	m ³	Vol. máximo calculado por ALFA15 e ABER15
48	ALFA2		Alfa calculado com 2 espelhos
49	ABER2		K correspondente a ALFA2
50	VOL2	m ³	Volume calculado com ALFA2, ABER2
51	DM	%	Declividade média do riacho
52	IC		Índice de compacidade
53	REC	m	Largura do retângulo equivalente
54	TETA1		Ângulo do cone médio
55	TETA2		Ângulo do cone corda
56	SIN		"Assinatura" do açude
57	CRISTA	m	Largura da crista
58	FUND	m	Maior profundidade da fundação

5 VARIAÇÕES E CORRELAÇÕES DOS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS

5.1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA TIPO DE REGRESSÃO

Para cada tipo de regressão descrito no item 4.2.1, conseguimos valores de α que cabe, agora, comparar para se ter uma idéia das diferenças reais entre essas abordagens. Lembramos o nome das variáveis utilizadas.

ALFA: valor de α obtido pela fórmula $\alpha = H_x \cdot S_x / V_x$

ALFAT: valor de α obtido com todos os pares do levantamento (H_i, S_i)

ALFATV: valor de α obtido com a ponderação pelos volumes

ALFA15: valor de α obtido com a ponderação pelos volumes, após exclusão dos pares tais que: $V_i < 0.15 V_x$ (eliminação dos pontos baixos).

Para a amostra completa, o número de pares N médio vale 5.8; O número de pares M após eliminação dos pontos baixos vale, em média, 3.8, e a média da relação M/N ficou em 0.66 .

As médias das razões entre os diversos valores de (α) são as seguintes:

TABELA 10

Relação entre os valores de α obtidos pelos 3 tipos de regressão

AMOSTRA	ALFAT/ALFATV		ALFAT/ALFA15		ALFATV/ALFA15		ALFA/ALFA15	
	NÉDIA	COEF.VARIAÇÃO (**)	NÉDIA	COEF.VARIAÇÃO	NÉDIA	COEF.VARIAÇÃO	NÉDIA	COEF. VARIAÇÃO
Completa(*)	1.01	5%	1.01	9%	1.00	4%	1.00	6%
Com QUALI=1	1.01	6%	1.01	9%	1.00	4%	1.00	5%

(*) Para os açúdes da IOCS dispomos apenas do valor ALFA.

(**) O coeficiente de variação é o desvio padrão dividido pela média

As médias obtidas são todas iguais a 1 ou a 1.01, embora exista uma certa variabilidade espelhada pelos coeficientes de variação e pela Figura 31 que exemplifica a relação

Fig.31

RELAÇÃO ALFAT / ALFA15

245 PONTOS

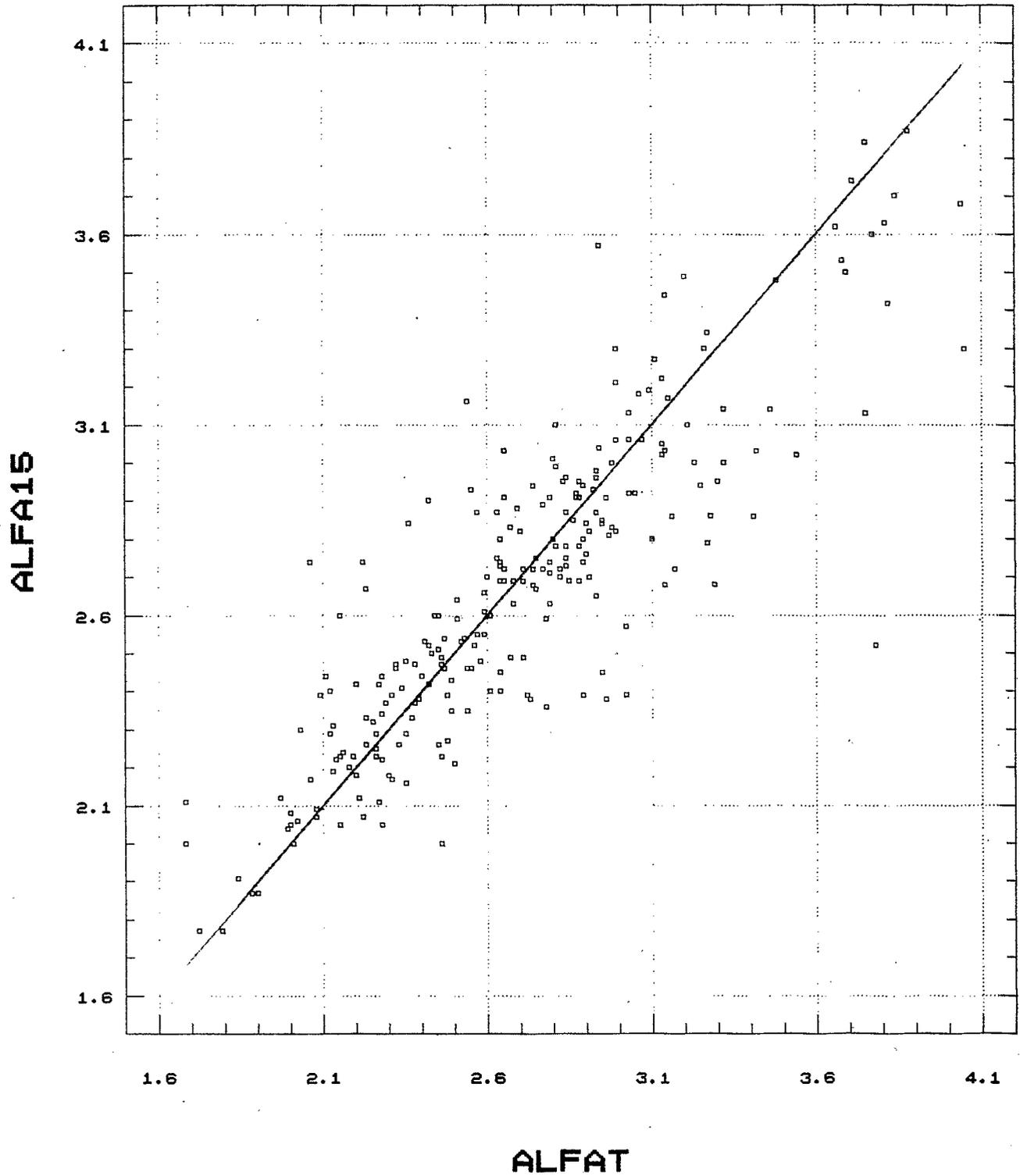


Fig.32

ALFA15/ALFAT. O coeficiente r^2 desta relação é .74 . Para ALFAT=f(ALFATV) e ALFATV=f(ALFA15), r^2 vale .90 e/.94 respectivamente.

Quanto às diferenças máximas entre o levantamento e as diferentes regressões, obtivemos os resultados seguintes, expressos em % do volume (índice A) e em % do volume máximo (índice B), como explicitado no item 4.2.1 e na Figura 32, para cada uma das 3 regressões (INDICE T, TV, 15).

DIFERENÇA ENTRE O VOLUME REAL E O AJUSTAMENTO

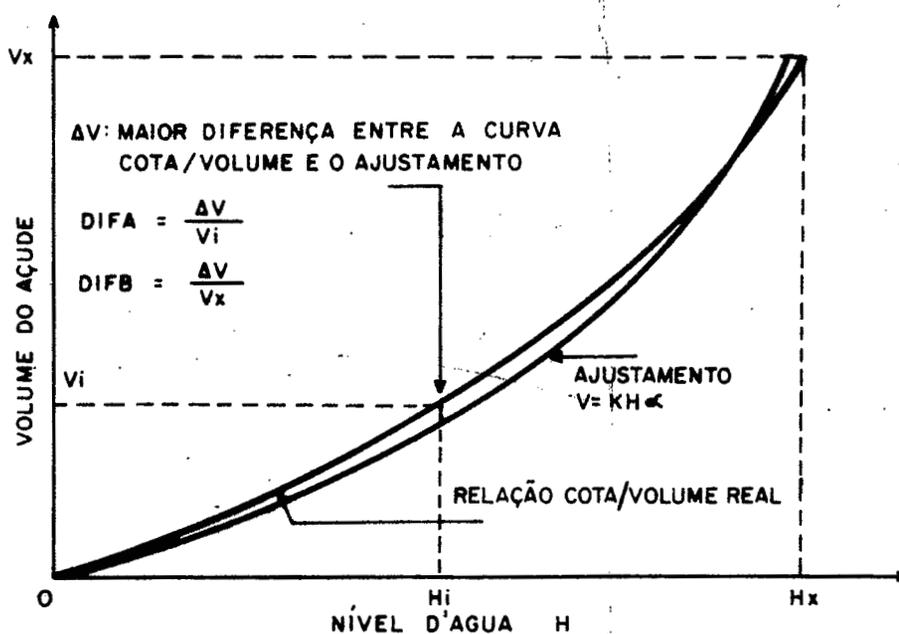


TABELA 11

Diferenças entre valores observados e calculados

AMOSTRA	DIFTA	DIFTB	DIFTVA	DIFTVB	DIF15A	DIF15B
Completa	6.4%	7.8%	16%	2.4%	1.6%	0.6%
QUALI = 1	6.6%	7.8%	17%	2.4%	1.6%	0.7%

Evidenciamos a superioridade da regressão ponderada pelos volumes e com eliminação dos pontos baixos, chegando-se a uma diferença média entre o levantamento e a fórmula de 1.6% (mas com coeficiente de variação importante: 118%) ou de 0.7% do volume máximo (com coeficiente de variação de apenas 19%).

Observamos uma diferença importante entre a regressão simples (T) e a regressão ponderada (TV) no que diz respeito aos valores de DIF: a relação DIFTVA/DIFTVB tem média de 7.51, o que significa que a ponderação pelos volumes, dando mais peso aos pontos altos, fornece uma reta de regressão menos ajustada nos pontos baixos, aumentando o erro nesses pontos (DIFTVA grande), sendo, porém, este erro, fraco quando expresso em percentagem do volume total (DIFTVB pequeno).

A eliminação dos pontos baixos, como já foi justificado, leva a um ajustamento extremamente satisfatório. A Figura 16 ilustra esse fenômeno: o ajustamento sobre os pontos (H_i , V_i) fornece uma reta de declividade 2.23 ($\alpha = 2.23$) e um erro máximo DIFTA = 14%; após eliminação dos dois pontos baixos, a regressão ponderada dá uma reta de declividade $\alpha = 2.67$ com ótimo ajuste (erro de DIF15A = 3%, ou 1%, se expresso em percentagem de V_x).

Em decorrência desses resultados, decidimos trabalhar, de preferência, no que segue com os valores de α estimados por ALFA15.

5.2 - VALORES MÉDIOS E FREQUENCIAIS DE (α) e (K)

Em primeiro lugar, calculamos as médias dos coeficientes de forma α sob várias condições, as quais encontram-se resumidas na primeira coluna da tabela seguinte (Tabela 12).

TABELA 12

Médias de α sob várias condições

AMOSTRA	Nº TOTAL DE AÇUDES	ALFA	Nº DE AÇUDES (*)	ALFA15	ALFAT	ALFATV
Am. completa	416	2.70	356	2.69	2.70	2.69
QUALIDADE = 1	331	2.69	271	2.72	2.74	2.72
Ampliação e reforma	116	2.71	176	2.70	2.75	2.72
Só construção	287	2.69	240	2.68	2.68	2.67
Construção QUALI = 1	223	2.70	176	2.70	2.70	2.69
EX = E	18	3.10	16	3.11	3.10	3.20
Total e EX \neq E	398	2.68	340	2.66	2.68	2.66
Total, EX \neq E, QUALI = 1	314	2.71	256	2.70	2.72	2.70
IOCS	60	2.75	-	-	-	-

(*) Este número corresponde à amostra menos os projetos da IOCS, para os quais não se tem as tabelas CSV.

Esta Tabela leva a várias observações: a primeira é que há pouca variação do valor médio de α para as subamostragens escolhidas.

Os projetos de ampliação e reforma deveriam ser associados a valores de α mais altos (incidência da caixa) mas a média correspondente (2.75) é apenas superior à média dos projetos de construção (2.68) (para ALFAT), o que tende a mostrar que, pelo menos em média, há uma compensação parcial pelo fenômeno de assoreamento.

Os açudes de geometria "anormal" (EX = E), 4.5% da amostra, apresentam um valor médio muito elevado (3.10), o que justifica, a posteriori, a necessidade de isolá-los.

A amostra total, com QUALI = 1 e exclusão das geometrias particulares fornece um valor médio de 2.70 que será, doravante, escolhido como valor de referência.

Este valor pode ser considerado como uma média regional, havendo uma variabilidade geográfica em função da geomorfologia como será discutido mais adiante.

É interessante comparar esse resultado ao encontrado para a amostra oriunda da África Ocidental (96 represas do Burkina Faso) para o qual o valor médio de α é 2.50, diferença condizente com a confrontação das características dessas duas regiões: o Burkina Faso apresenta um relevo muito suave e bastante erodido, com vales mais largos e uma atividade geológica reduzida. (Gilard, 1985)

O ajustamento de uma Lei de Gauss sobre a série de valores de (α) da amostra, indica que 80% dos açudes têm um coeficiente de forma superior a 2.17 e inferior a 3.23; evidenciando-se, assim, uma variação bastante ampla deste coeficiente (Figura 33).

O coeficiente de abertura (Figura 34) apresenta uma variação muito grande espelhada pelos valores freqüenciais fornecidos pela Tabela 13, após ajustamento de uma lei Log-normal. Observa-se que a mediana vale, aproximadamente, a metade da média.

TABELA 13

Parâmetros estatísticos da distribuição de α e K

Nº DE PONTOS	FREQUÊNCIAS									MÉDIA	DESVIO
	0.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9		
α 314	2.169	2.352	2.484	2.597	2.702	2.807	292	3.052	3.235	2.702	.416
K 314	304	520	764	1064	1450	1974	2747	4046	6917	3049	5641

Fig.33

DISTRIBUIÇÃO FREQUENCIAL

AJUSTAMENTO DE UMA LEI NORMAL

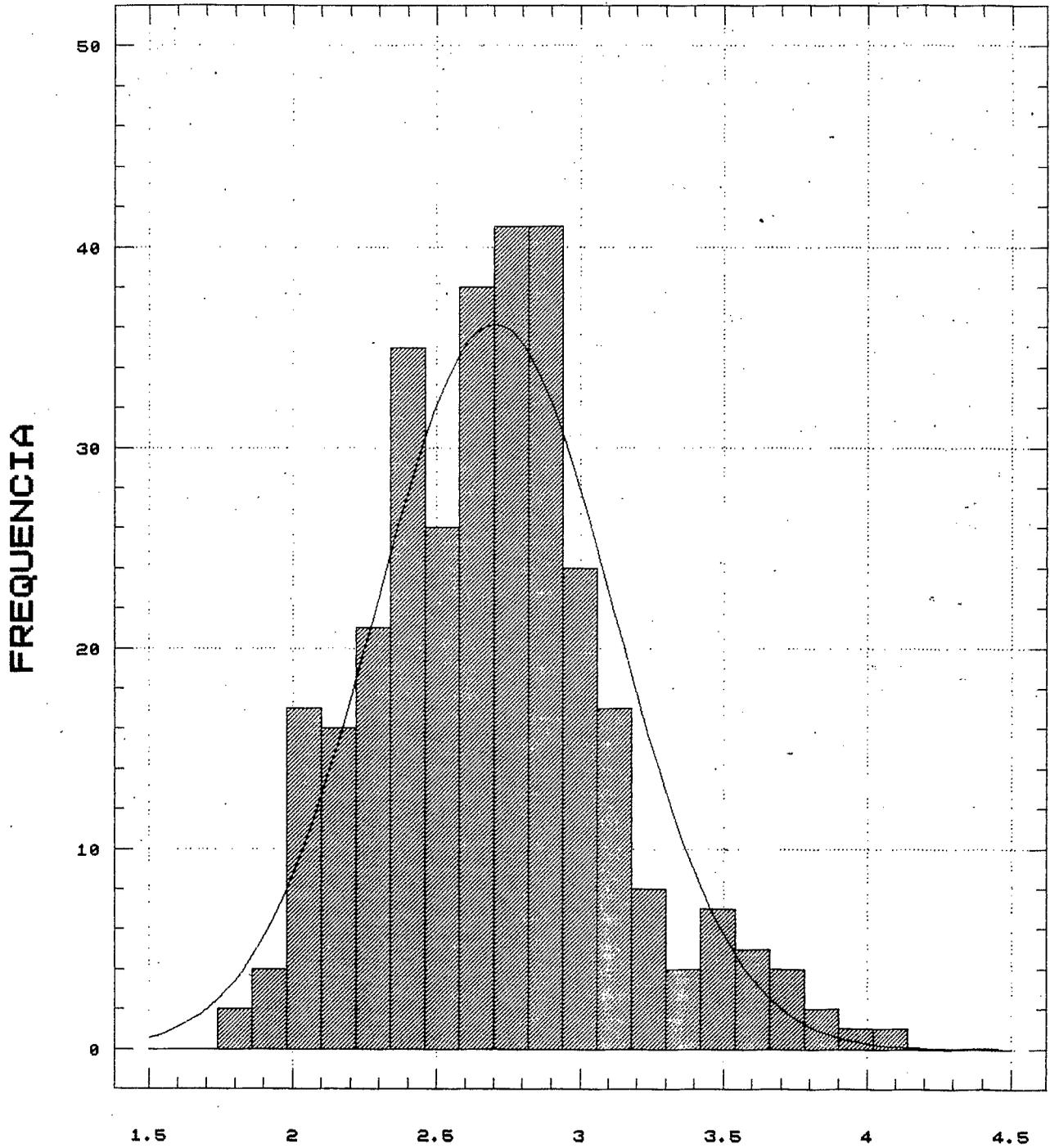
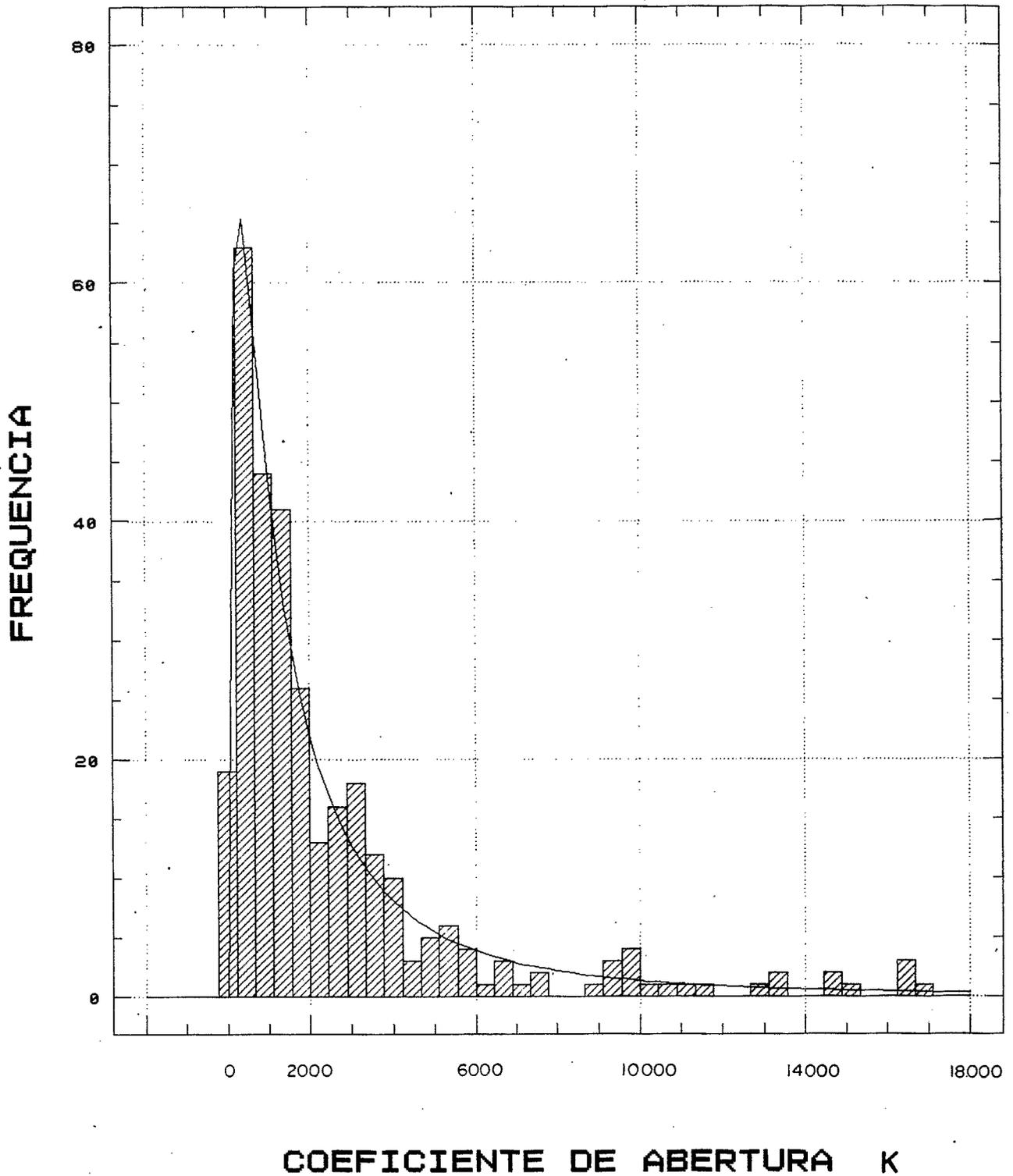
**COEFICIENTE DE FORMA : ALFA**

Fig.34

DISTRIBUIÇÃO FREQUENCIAL DE (K)

LEI LOG-NORMAL



5.3 - CORRELAÇÕES ENTRE OS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS

5.3.1 - Primeira correlação entre (K) e (α)

É de certo interesse procurar uma correlação entre (α) e (K), em primeiro lugar por conta do significado geométrico desses coeficientes e, em segundo lugar, para precisar a estimativa simplificada do volume armazenado (ver capítulo 8).

A primeira correlação que cabe procurar é a que relaciona os dois coeficientes geométricos, (α) e (K), entre si. Devido à grande variabilidade de K, somos levados a preferir a variável Log(K). A Figura 35 evidencia, para uma amostra de 314 pontos restrita aos dados de melhor qualidade (QUALI = 1) e tais que $EX \neq E$, uma correlação linear entre (α) e Log(K) correspondendo à equação:

$$\text{Log}(K) = 12.86 - 2.06 \alpha \quad r^2 = .496$$

equivalente a

$$K = 384616.e^{-2.06 \alpha}$$

A correlação não é muito boa ($r = .496$) e pode ser notavelmente aprimorada introduzindo as variáveis H_x e S_x para uma regressão multilinear, a qual fornece as relações seguintes:

$$\text{Log}(K) = 13.44 + 5.12 \cdot 10^{-6} S_x - 2.12\alpha - .18H_x$$

314 pontos $r^2 = .82$

$$\text{Log}(K) = 13 + 1.5 \cdot 10^{-5} S_x - 1.96\alpha - .3H_x$$

$S_x < 20$ ha $r^2 = .93$

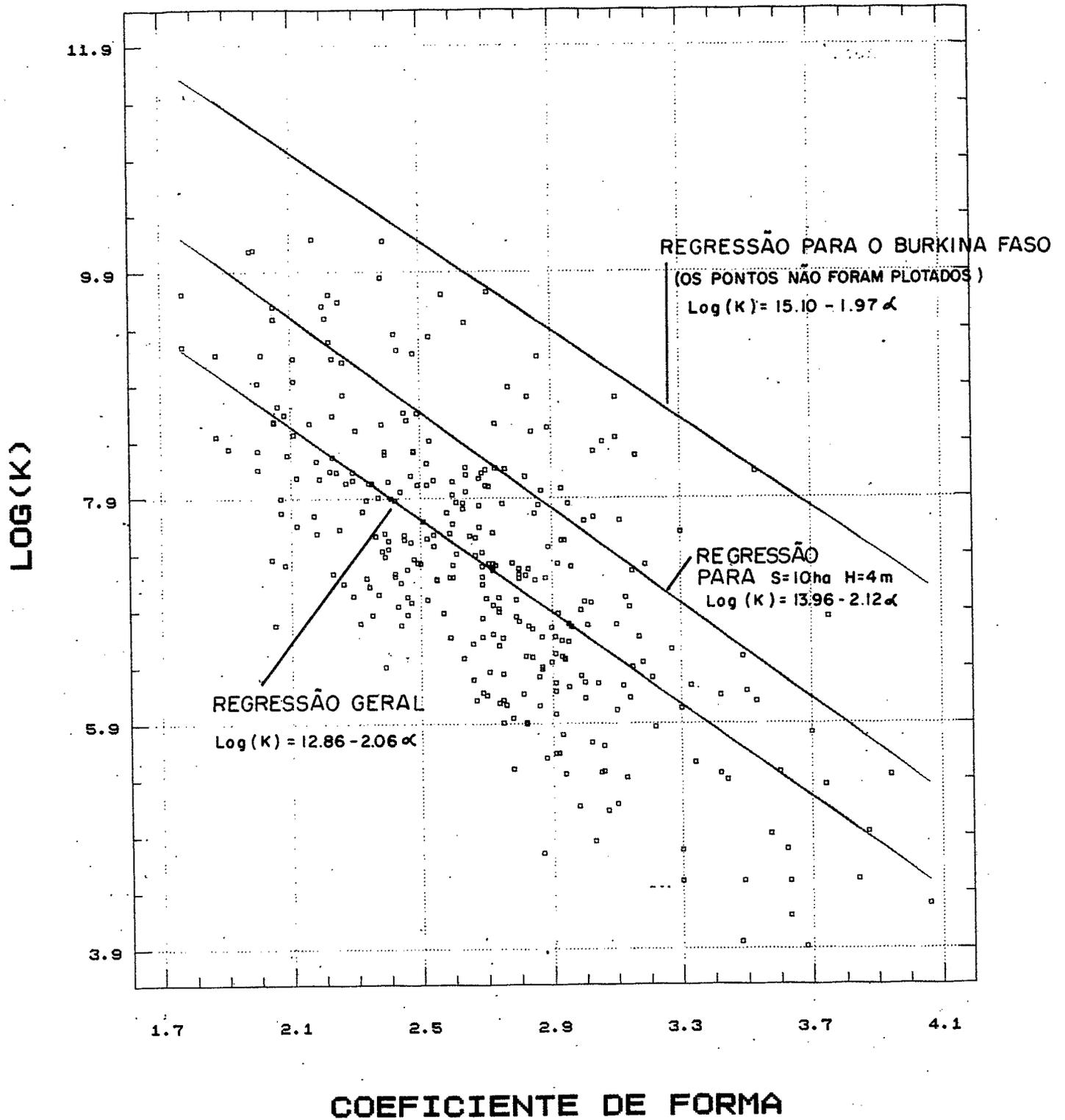
$$\text{Log}(K) = 12.72 + 2.3 \cdot 10^{-5} S_x - 1.916\alpha - .34H_x$$

$S_x < 10$ ha $r^2 = .955$

Estas equações significam que a nuvem de pontos se traslada verticalmente, à medida que a superfície aumenta. Poder-se-ia imaginar que os pontos da nuvem que correspondem a coeficientes de aberturas elevados e valores de α pequenos também correspondiam a represas de maior porte (valores abertos - K grande -, forma convexa - alfa pequeno). Classificando os valores de α por ordem crescente dos valores de S_x correspondentes, e calculando-se a média das três classes obtidas após a partição da distribuição em três grupos iguais (S_x pequeno - S_x médio - S_x grande) obtém-se, respectivamente, 2.73, 2.69, 2.68, ou seja, diferenças não significativas. Em

Fig.35

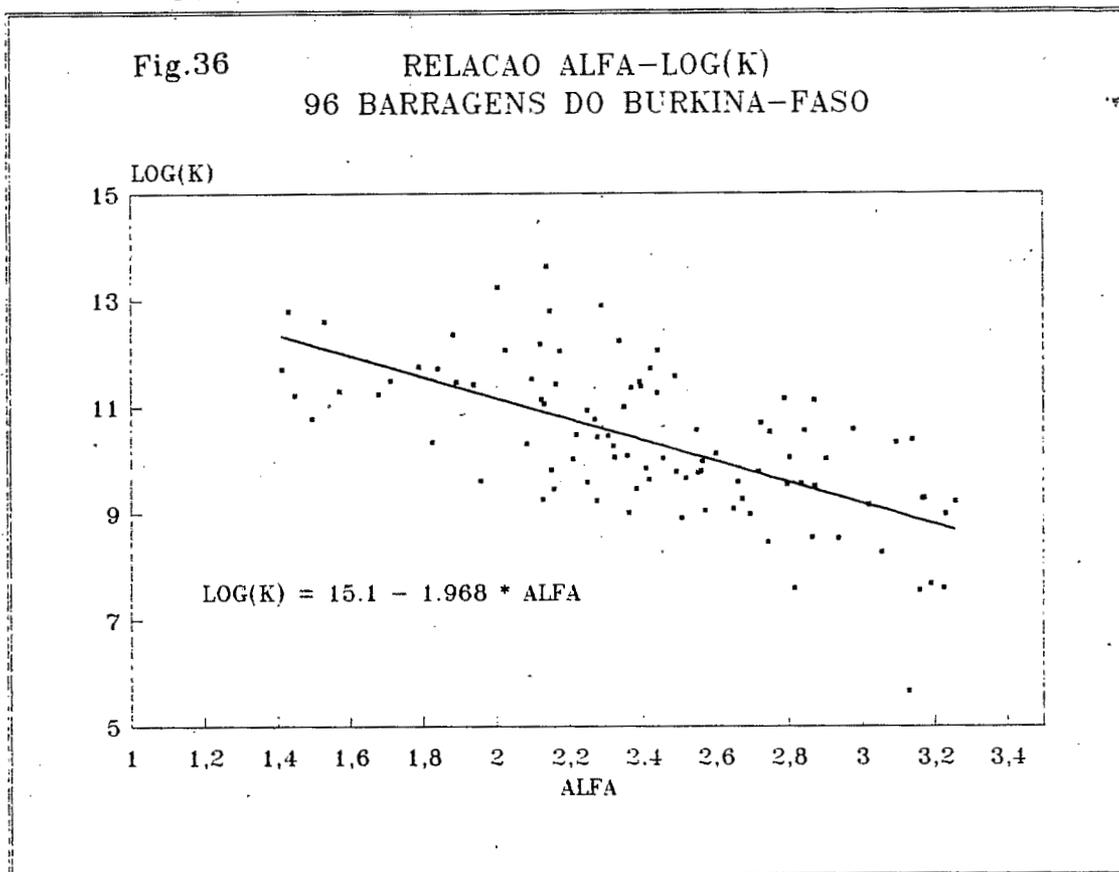
RELAÇÃO ALFA - LOG(K)



realidade, para cada classe de superfície, a distribuição de α é pouco diferente, enquanto que os valores de $\text{Log}(K)$ aumentam com S_x , deslocando-se a reta de regressão verticalmente.

É interessante comparar esse resultado com dados semelhantes oriundos da África Ocidental (Gilard, 1985) que constituem uma amostra de 96 represas com superfície média de 20 ha, cujos coeficientes geométricos apresentam a relação mostrada na Figura 36 e correspondente à equação:

$$\text{Log}(K) = 15.10 - 1.968 \alpha$$



Esta equação pode ser comparada à equação obtida acima, após considerar um valor de $S_x = 200.000 \text{ m}^2$ e $H_x = 4 \text{ m}$:

$$\text{Log}(K) = 13.96 - 2.12 \alpha$$

$$r^2 = .42$$

Estas duas equações estão representadas na Figura 35. Obtém-se duas retas quase paralelas mas de constante totalmente diferente, o que reflete as diferenças geomorfológicas aludidas acima.

5.3.2 - Segunda correlação entre (α) e (K)

As considerações geométricas expostas no anexo sobre os cones equivalentes possibilitaram a investigação de outro tipo de correlação entre (K) e (α) .

Introduzimos as noções de cone médio e cone corda, cujos ângulos de abertura, θ_1 e θ_2 , relacionam-se a H_x , S_x e V_x por:

$$\operatorname{tg}\theta_1 = (3V_x/\pi H_x^3)^{.5} \quad \operatorname{tg}\theta_2 = (S_x/\pi H_x^2)^{.5}$$

com a relação $\operatorname{tg}\theta_1/\operatorname{tg}\theta_2 = (3/\alpha)^{.5}$

Para $\alpha = 3$, (açude cônico), essas duas equações se reduzem a uma relação de proporcionalidade entre a tangente do ângulo de abertura e $K^{1/2}$, o que incita a procurar uma relação desse tipo. Obtém-se para a amostra completa de 417 pontos, as regressões lineares:

$$(K)^{.5} = -1.88 + 1.465 \operatorname{tg}\theta_1 \quad r^2 = .663$$

$$(K)^{.5} = 4.24 + 1.359 \operatorname{tg}\theta_2 \quad r^2 = .49$$

A dispersão das nuvens obtidas é devida ao fato de α não valer 3, o que leva a procurar uma relação linear com uma declividade variando com α . Obtém-se, de fato, um melhoramento espetacular da correlação:

$$(K)^{.5} = (3.571 - .88 \alpha) \operatorname{tg}\theta_1 + 4.64 \quad r^2 = .942$$

$$(K)^{.5} = (4.41 - 1.14 \alpha) \operatorname{tg}\theta_2 + 4.14 \quad r^2 = .926$$

Observamos que o r^2 obtido para a regressão com $\operatorname{tg}\theta_2$ (cone corda) é sempre menor do que o r^2 obtido com $\operatorname{tg}\theta_1$, condizendo isso com as considerações geométricas já explicitadas. (θ_1 depende do volume, informação mais rica que a superfície da qual depende θ_2).

Considerando a amostra reduzida a 314 pontos (QUALI = 1, EX \neq E) obtém-se os ajustamentos:

$$(K)^{1/2} = (4.036 - 1.01 \alpha) \operatorname{tg}\theta_1 + 1.97 \quad r^2 = .946$$

$$(K)^{1/2} = (4.70 - 1.22 \alpha) \operatorname{tg}\theta_2 + 2.016 \quad r^2 = .928$$

Essa relação, na verdade, não é de grande interesse porque se admitirmos (α) , como variável suplementar, a relação da

lei cota/superfície $K = S/\alpha.H^{\alpha-1}$, deve, no mínimo, ser de igual validade, verifica-se que:

$$K = 475 + 0.998 (S_x/\alpha.H_1^{(\alpha-1)}) \quad r^2 = .997$$

apresenta um r^2 superior. Com relação à primeira regressão em que (α) não intervém, obtém-se (para 314 pontos):

$$K = 648 + 1.012 (S_x/2.7 H_x^{1.7}) \quad r^2 = .42$$

ou

$$(K)^{1/2} = 1.06 (S_x/2.7 H_x^{1.7})^{.5} \quad r^2 = .52$$

5.3.3 - Terceira correlação entre (α) e (K)

A relação entre (K) e a declividade do riacho (DM) não passa de uma tendência, mas esta pode ser bastante aproximada, introduzindo-se a assinatura $\alpha \cdot \text{Log}(K)$ para a qual a nuvem acha-se muito mais concentrada (Figura 37), fornecendo a relação:

$$\text{Log}(K) = 14.5 - 11.41 e^{-DM} \quad r^2 = .56 \text{ (242 pts)}$$

5.4 - CORRELAÇÃO ENTRE (α), (K) E OUTROS PARÂMETROS

O coeficiente (α) apresenta correlações muito fracas com todas as variáveis estudadas, sejam estas simples (DM, BOCA, RIACHO, ...) ou mais sofisticadas (IC, REC, TETA...).

As variáveis (RIACHO) e (BRACO) não têm influência sobre α .

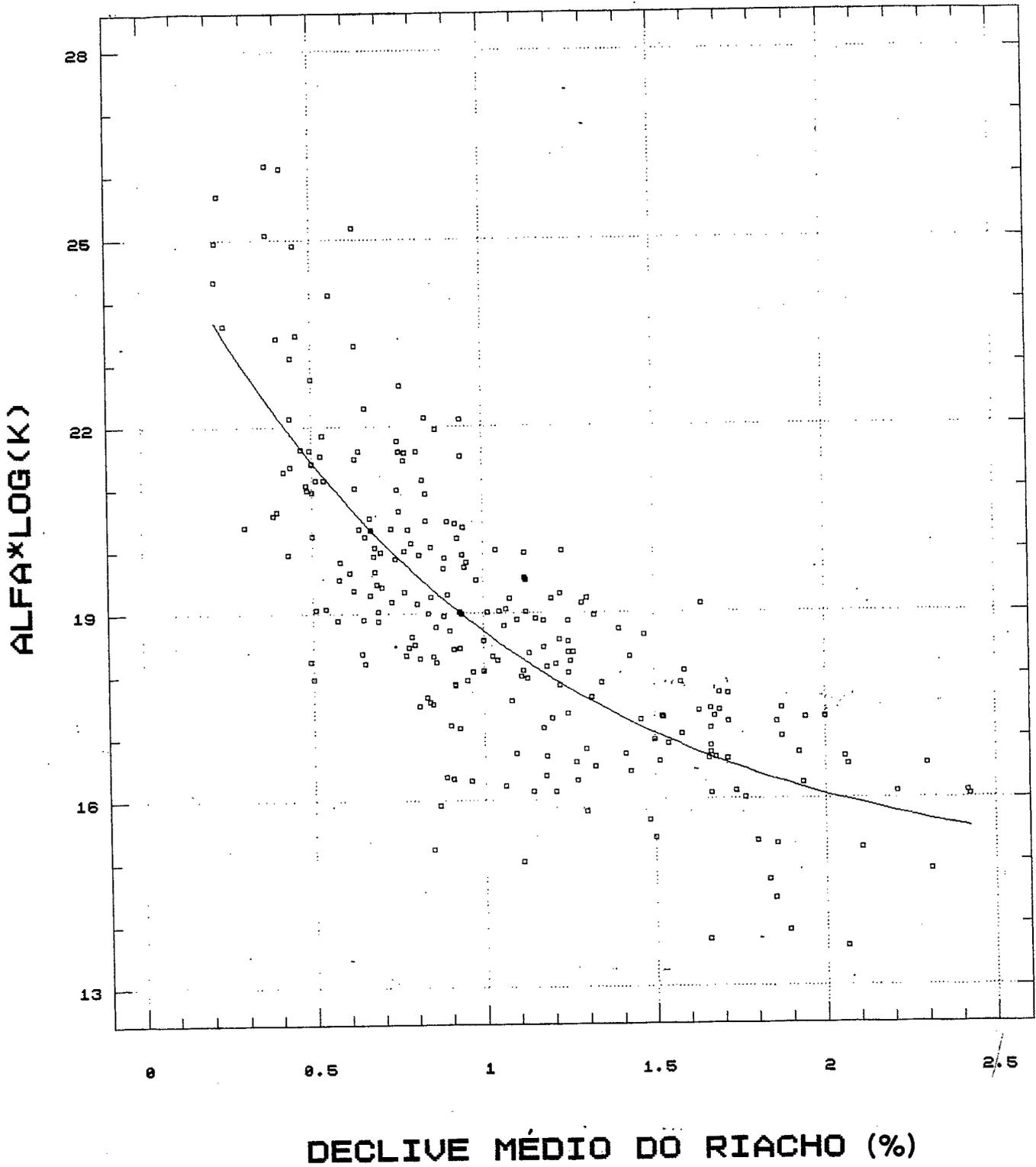
A variável (BOCA) que descreve a forma do boqueirão fornece uma certa correlação:

BOCA = B	(forma U com fundo largo)	$\alpha = 2.59$	(44 valores)
BOCA = V	(forma V)	$\alpha = 2.77$	(36 valores)
BOCA = U	(forma U)	$\alpha = 2.67$	(8 valores)
BOCA = M	(forma mista: um lado côncavo, outro convexo)	$\alpha = 2.42$	(18 valores)

As tendências encontradas nos valores médios de (α) estão de acordo com as considerações geométricas expostas no início. Infelizmente, não há uma correlação mais nítida, em parte porque o perfil do boqueirão é, geralmente, particular

Fig.37

RELAÇÃO ALFA*LOG(K) / DECLIVE MÉDIO



(escolhido por ser conveniente à construção) e, então, pouco representativa do perfil do vale.

A relação com o índice de compacidade (IC) foi também decepcionante: observamos apenas uma pequena variação do α médio:

IC < 1.5	(141 valores)	$\alpha = 2.60$
IC > 1.5	(160 valores)	$\alpha = 2.76$

Nenhuma das variáveis permite destacar uma correlação satisfatória.

Entretanto, as médias de α por núcleo, apresentadas na Figura 38 mostram uma variabilidade interessante: destacam-se valores baixos (2.48 - Pombal, 2.60 - Souza) e um valor alto (3.15 - Tauá), as primeiras correspondentes a zonas de relevo suave e a de Tauá a um relevo mais acentuado. Em contrapartida, o valor de Pau dos Ferros aparece muito baixo, o que tende a mostrar que essas médias são pouco significativas: de fato, muitos núcleos (Tauá, Acari, Pau dos Ferros, Pajeú) apresentam zonas de vale com relevo suave e zonas de Serra, sem que haja condição de precisar a exata localização dos açudes projetados. A Tabela 14 reúne a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança da média (a 95%) calculado por $(2\sigma/(N)^{1/2})$, onde N é o número de elementos da amostra) de cada Município, considerando-se todos os açudes, independentemente do índice QUALI.

TABELA 14

Intervalo de confiança da média de α segundo o Município

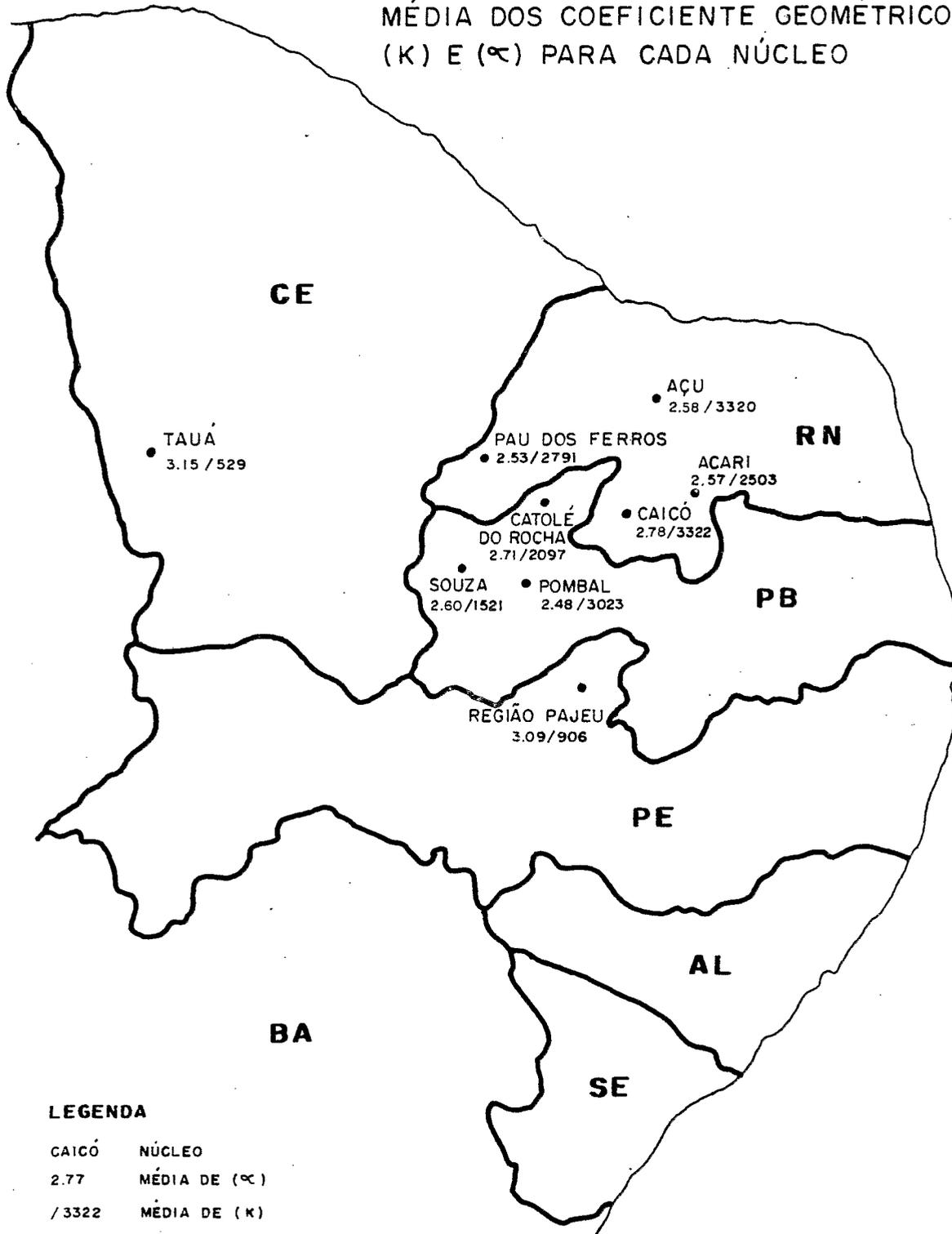
MUNICÍPIO	NÚMERO DE AÇUDES	ALFA		
		Média	Desvio padrão	Int.confiança
Tauá	17	3.154	.536	±.260
P.dos Ferros	44	2.520	.370	±.112
Açu	21	2.584	.402	±.175
Acari	73	2.574	.411	±.096
Caicó	105	2.779	.466	±.091
Catolé	40	2.707	.460	±.145
Pombal	40	2.484	.427	±.135
Souza	20	2.601	.339	±.178
Pajeú	12	3.090	.540	±.312

Os intervalos de confiança da Tabela nos permitem conferir que, de maneira geral, as variações são significa-

Fig.38

ESCALA GRÁFICA
 50 Km 0 50 100 150 200 250 Km

MÉDIA DOS COEFICIENTE GEOMÉTRICOS
 (K) E (α) PARA CADA NÚCLEO



tivas, em particular no que diz respeito aos municípios de Tauá e Pombal.

Essa discussão orienta nossa reflexão sobre a relação entre o relevo e os coeficientes geométricos, a qual não pode ser estudada, com nossa amostra, por falta de conhecimento sobre o relevo de cada local.

Para os 25 açudes da amostragem que têm forma triangular ($EX = T$), poderíamos esperar uma média de α superior à média geral, já que o relevo das pequenas bacias de cabeceiras, às quais devem ser associadas, apresentam geralmente perfil convexo. Não se evidenciou tal resultado, conseguindo-se valor médio de 2.71.

Existem várias maneiras de caracterizar o relevo - um índice ("índice de declividade global"), definido por DUBREUIL, e utilizado por NOUVELOT (1974), apresenta-se sob a forma:

$$Ds = IG. \quad S_b = \frac{D}{REC} \cdot S_b$$

onde:

REC é o comprimento do retângulo equivalente da bacia hidrográfica (definido no item 4.2.2)

S_b a superfície da bacia hidrográfica

D desnível entre H_5 e H_{95} , definidos como as áreas mais baixas e mais altas da bacia e de superfície correspondente a 5% do total da bacia.

É importante ressaltar os limites de aplicação desse índice que é empregado em bacias da ordem de 25 km² de superfície, com tolerância de 10 a 100 km². Para grandes bacias, uma pequena parte de serra pode modificar totalmente o índice e a classe de relevo correspondente.

Da mesma maneira, não se pode estimar o relevo de uma bacia de alguns km² a partir de uma zonificação realizada na escala de 1/500.000 ou 1/1.000.000. Além do mais, a experiência mostra que até pequenas bacias, de 1 até alguns km², apresentam microvariações muito importantes.

Outro índice de certo interesse é a ordem do riacho: essa ordem é definida traçando a rede hidrográfica da bacia, a partir das nascentes: a ordem de um determinado trecho é a maior das ordens dos trechos chegando a seu nó de montante, ou aumenta de uma unidade se os dois trechos têm a mesma ordem, de acordo com a classificação de talvegues de SCHUMM.

Algumas tentativas foram feitas para relacionar (α) e (K) com um índice do relevo e a ordem do riacho (SUDENE, 1980), (Serete, 1980) (Ribeiro, 1982). A comparação dos resultados evidencia uma grande discordância que mostra a dificuldade de tal empreendimento. Um tal estudo deve se apoiar em levantamentos confiáveis e precisos, regressões ponderadas, mapas de igual escala. O item 3.3, dedicado ao estudo da variação de (α, K) em função do erro sobre H_0 , mostra a fonte de outra perturbação que dificulta a busca de toda correlação nítida.

Entretanto, não obstante as devidas ressalvas, essas considerações podem constituir um ponto de partida interessante para um aprofundamento dessa pesquisa, levando-se em conta aspectos geomorfológicos, o que necessitaria, antes de tudo, estudos de campo aprofundados.

6 LOCAÇÃO E TAMANHO DA BARRAGEM

6.1 - LOCAÇÃO DA BARRAGEM

A escolha do local do açude é muito importante, pois, trata-se, na medida do possível, de:

- minimizar o volume de terra (e o preço do empreendimento);
- minimizar a superfície do espelho d'água (e a evaporação);
- maximizar o volume armazenado e a profundidade,

além de serem considerados outros critérios, tais como: local adequado para o sangradouro, disponibilidade de material, existência de um baixio para irrigação, etc...

Agora é o momento de ilustrar a grande variedade de geometria aludida na introdução. As Figuras 39 e 40 mostram a distribuição da superfície e do volume armazenado para uma mesma profundidade, tomada, arbitrariamente e a título de exemplo, igual a 4 metros, para a amostra completa de 416 açudes. 5 açudes se destacam com um volume superior a 500.000 m³ enquanto 58 têm valor inferior a 25.000 m³, ou seja, razões superiores a 20! Uma mesma variabilidade ocorre com a superfície que varia de mais de 40 hectares (2 açudes) a menos de 1 hectare.

Na base dessas considerações, é fácil entender a importância da escolha do local sobre as características da represa, e em particular, sobre a relação volume de terra/volume de água.

Numa primeira etapa, estudaremos a variação do volume do maciço e sua avaliação a partir de medidas simples.

6.2 - ESTIMATIVA DO VOLUME DO ATERRO

O método habitual de cálculo do volume de terra necessário à construção do maciço considera secções sucessivas da parede (geralmente, espaçadas de 20m) e calcula os volumes das fatias correspondentes, a exemplo do método usado para calcular o volume do açude. Entretanto, isso necessita um levantamento topográfico; pode ser válido dispor de uma fórmula, aproximativa, porém de fácil aplicação. A primeira idéia

Fig.39 **DISTRIBUIÇÃO DO VOLUME PARA H=4 metros**

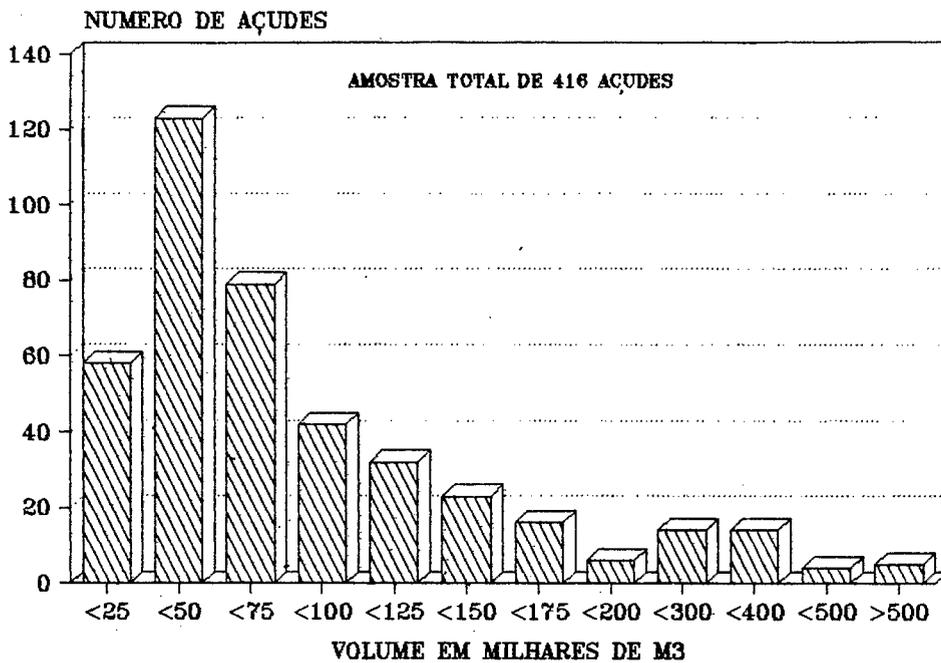
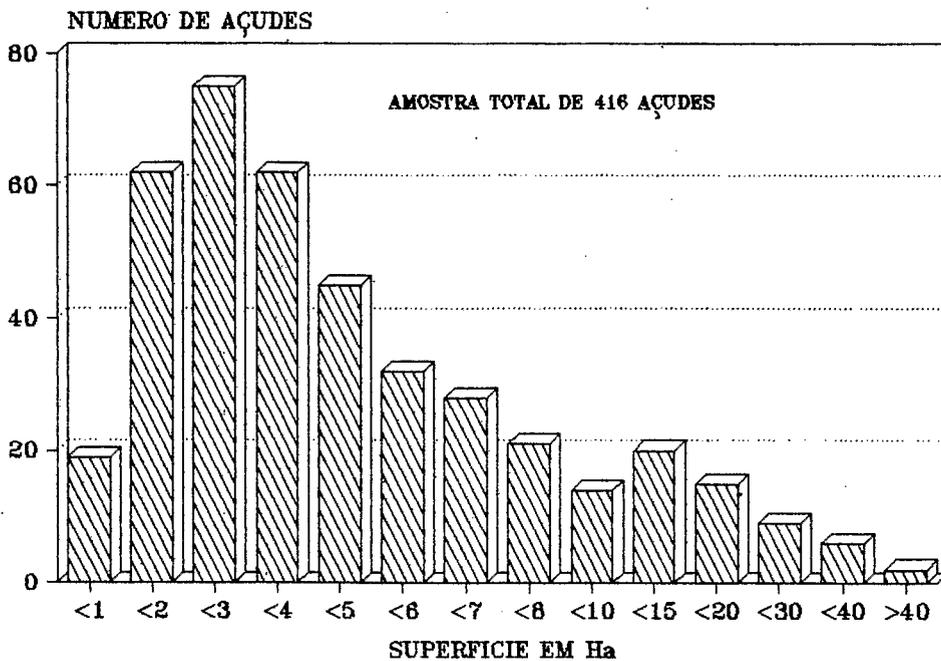


Fig.40 **DISTRIBUIÇÃO DA SUPERFICIE PARA H=4m**



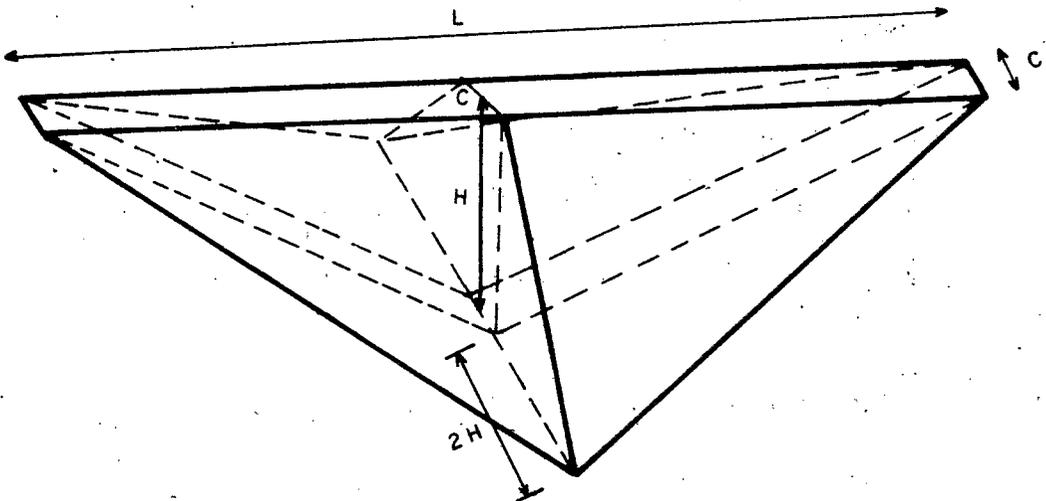
consiste em considerar uma secção do vale em forma de V. O açude tem taludes de 1:2 de declive. (Figura 41)

Verificamos facilmente que o volume da represa, assim esquematizada, é dado por:

$$V = LH \cdot \left(\frac{C}{2} + \frac{2H}{3} \right)$$

onde L é o comprimento da parede, H a sua altura máxima e C a largura da crista.

Fig.41 APROXIMAÇÃO DO VOLUME DO MACIÇO



Considerando que a largura do coroamento cresce com H, conforme a fórmula de Knappen $C = 1.65H$, obtém-se a fórmula aproximativa $V = 1.49 LH^2$.

Na realidade, essa fórmula não tem relevância e podemos adotar um coroamento médio de 3 m (encontrado para 77% dos açudes estudados) (ver 4.1.6), o que leva a:

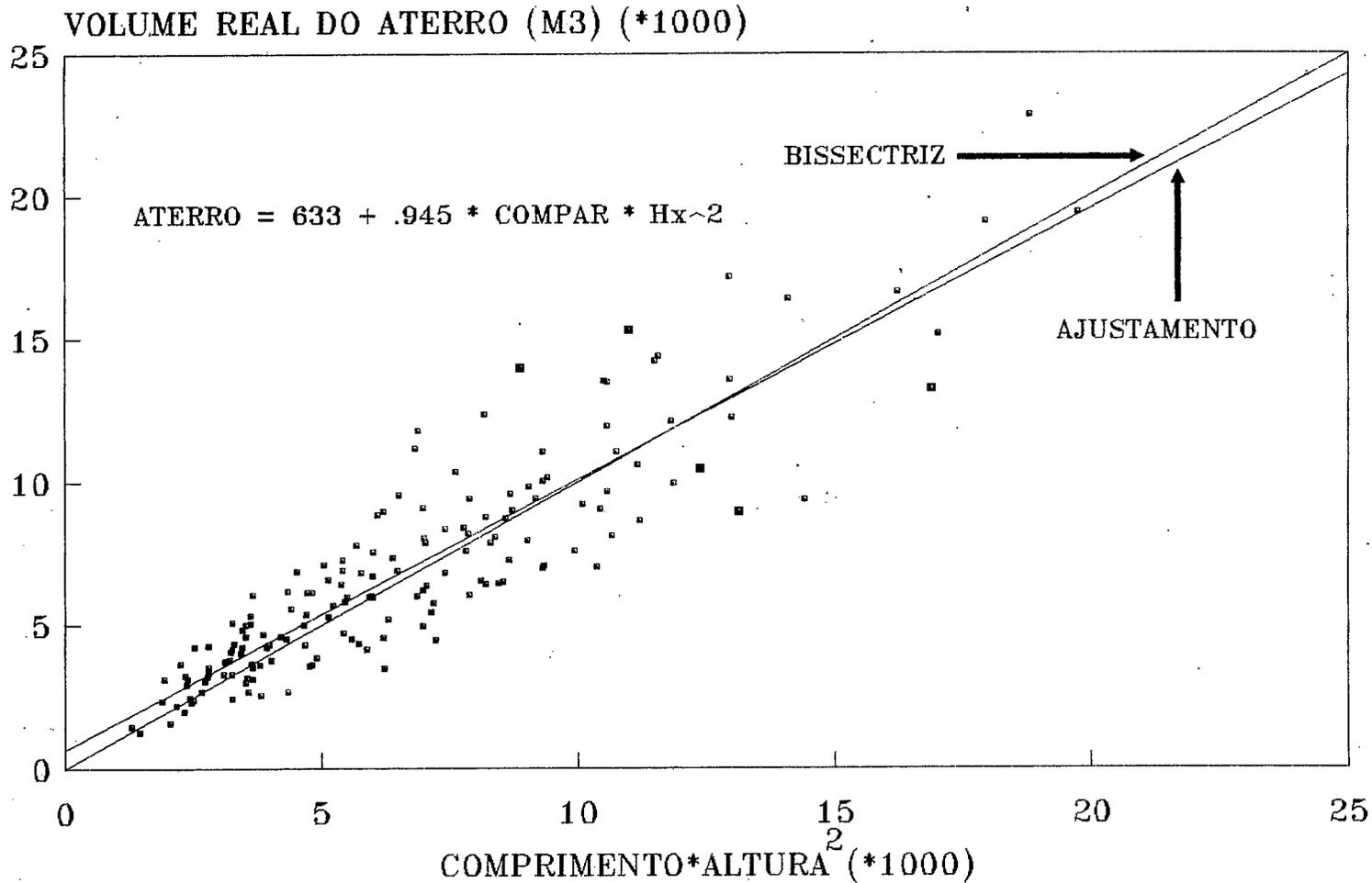
$$V = LH^2 (.66 + 1.5/H), \text{ ou}$$

$$V = .96 LH^2 \text{ para um H médio de 5 metros.}$$

A relação entre o volume do aterro e LH^2 , obtida para 135 açudes (descartando-se projetos de reforma e ampliação, bem como a amostragem da IOCS que tem talude de declive 1:1.5) é mostrado na Figura 42. Observa-se um ajustamento quase confundido com a bissetriz.

AVLIAÇÃO DO VOLUME DO ATERRO EM FUNÇÃO DA ALTURA E DO COMPRIMENTO DA PAREDE

Fig.42



$$\text{ATERRO} = 633 + .945 \text{ LH}^2 \quad (r^2 = .815)$$

ou forçando a passagem pela origem,

$$\text{ATERRO} = 1.019 \text{ LH}^2 \quad (r^2 = .81)$$

Essa fórmula constitui uma primeira aproximação do volume da barragem.

O intervalo de confiança é de $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ e $\pm 50\%$ para probabilidades respectivas de 60%, 80%, 95%.

A regressão linear sobre LH e LH² não melhora a correlação de maneira significativa.

$$\text{ATERRO} = 36 + 0.74 \text{ LH}^2 + 1.97 \text{ LH} \quad r^2 = .819$$

NOTA: após a execução da obra, o talude de montante fica geralmente com um declive inferior ao previsto, isto é, com um talude mais próximo de 1:3 que do valor 1:2 do projeto. Isso se deve à ação do trator que fica subindo e descendo no referido aterro. Considerando-se um talude de 1:3, o volume do maciço aumenta de um valor LH²/3, ou seja aproximadamente de um terço.

6.3 - ESTIMATIVA DO VOLUME DA TRINCHEIRA

O cálculo e a fórmula proposta acima não levam em conta a fundação do açude. O volume correspondente a essa fundação é eminentemente variável, pois depende da espessura do solo. A Figura 43 mostra a relação entre o CUTOFF e o ATERRO que comprova essa irregularidade. Após a classificação dos valores da razão CUTOFF/ATERRO, obtemos os valores freqüenciais seguintes.

TABELA 15

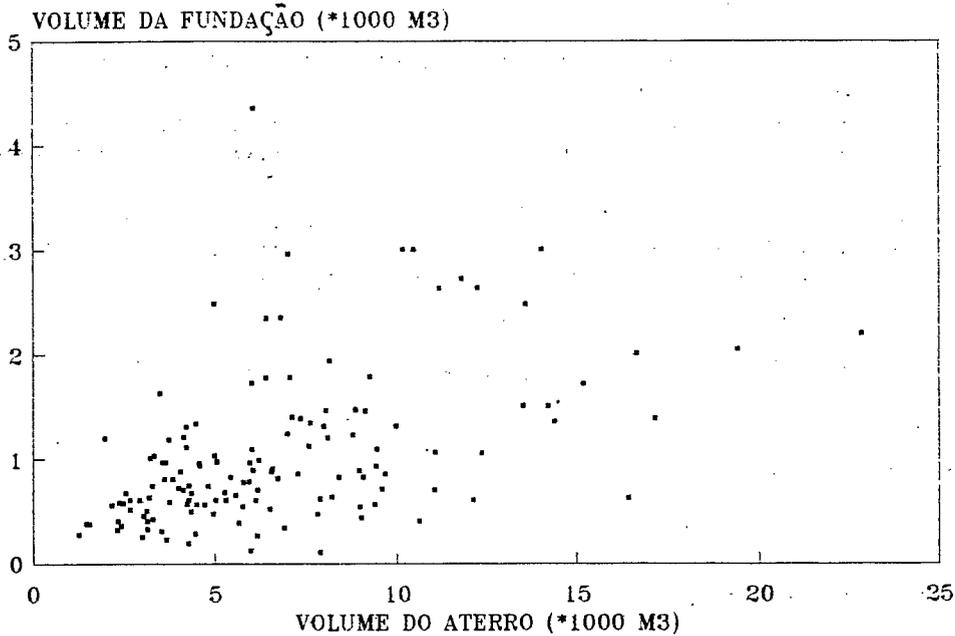
Distribuição da razão CUTOFF/ATERRO

	MÉDIA	PROBA.9	PROBA.75	PROBA.5	PROBA.25	PROBA.1
CUTOFF/ ATERRO (%)	17	6	10	15	22	29

Podemos adotar um valor médio do volume da fundação igual a 17% do volume do aterro.

Fig.43

RELAÇÃO V_{terra} / V_{cutoff}
135 AÇUDES DO PROJETO SERTANEJO



6.4 - ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL: ATERRO + CUTOFF

O volume total da obra pode ser estimado mediante as fórmulas do item 6.2 e acréscimo de 17%. O resultado será pouco diferente das fórmulas de regressão obtidas diretamente sobre o volume $V_{TOTAL} = ATERRO + CUTOFF$, ou sejam:

$$V_{TOTAL} = 1.27 LH^2 \quad r^2 = .767$$

$$V_{TOTAL} = 4.07 LH + .567 LH^2 \quad r^2 = .805$$

$$V_{TOTAL} = 1115 + LH^2 \quad r^2 = .784$$

6.5 - RELAÇÃO VOLUME D'ÁGUA/VOLUME DE TERRA

Ao localizar um açude, é mister conferir se a razão volume d'água armazenável/volume de terra é satisfatório, o que constitui um critério de escolha do local.

Em primeiro lugar, convém estudar a relação entre os dois volumes (nomeados a seguir V_a e V_t), a qual é representada graficamente na Figura 44, fazendo-se necessário adotar uma escala logarítmica em decorrência da grande variação observada.

Para obter uma lei mais abrangente, acrescentamos a nossa amostra 73 valores referentes a açudes do DNOCS, cujos volumes alcançam até um bilhão de m^3 . (Macêdo, 1977), (Est. da Bahia, 1984).

O ajustamento sobre um total de 273 açudes forneceu a equação:

$$\text{Log } V_a = -2.56 + 1.59 \text{ Log } V_t \quad r^2 = 0.861$$

$$V_a = 0.077 V_t^{1.59}$$

Deduz-se a razão V_a/V_t .

$$V_a/V_t = 0.077 V_t^{.59} = 0.2 V_a^{.371}$$

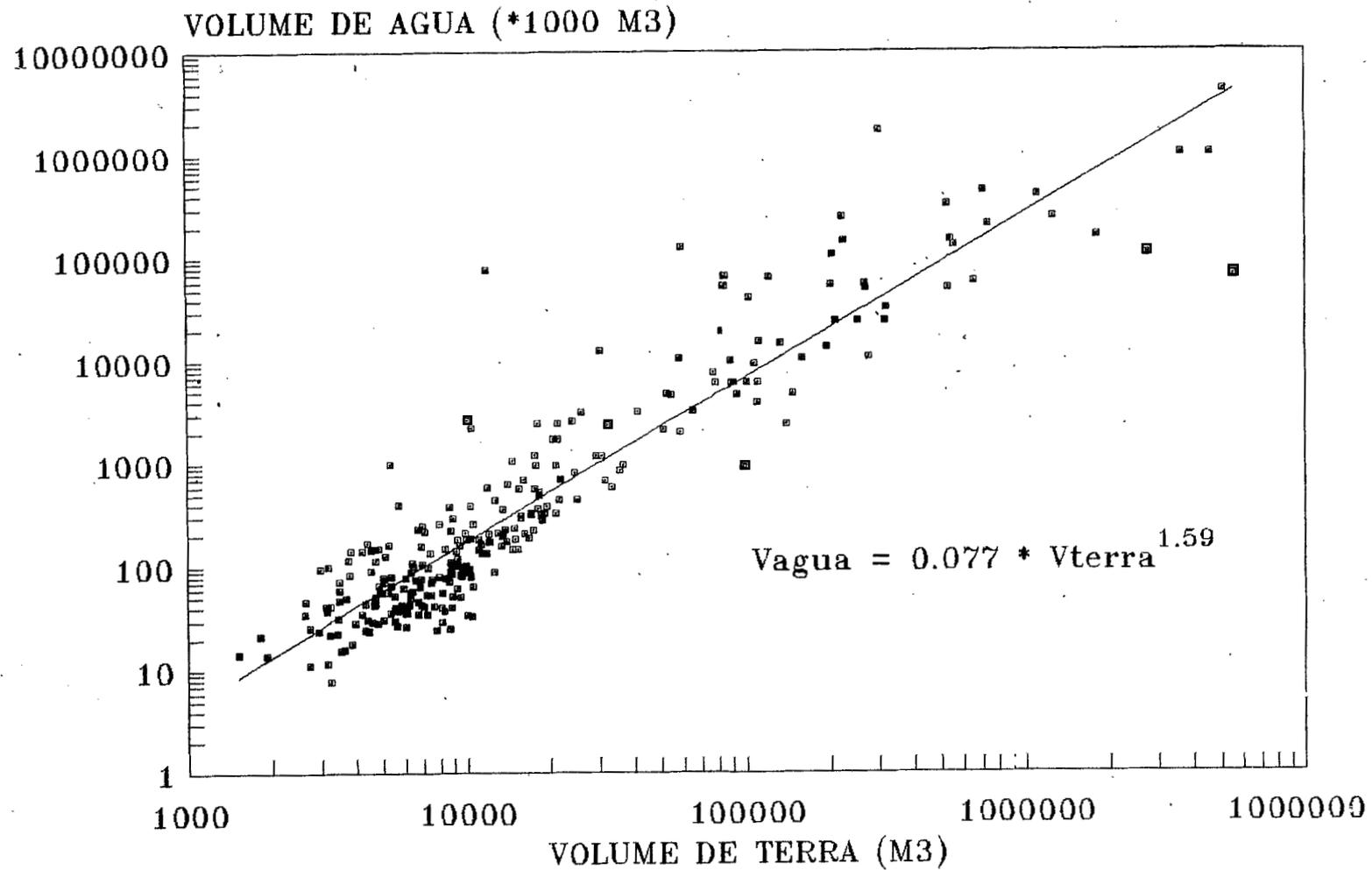
O ajustamento de uma reta para tão vasta amostra, conforme indica a Figura 44, tende a impor uma declividade um pouco fraca para a nuvem dos pontos baixos mais numerosos, a contrapartida da vantagem que ela oferece sendo válida para toda a faixa de variação.

Alguns valores estatísticos da distribuição correspondente são dados pela Tabela 16. Notamos uma grande diferença entre a média e a mediana devido a valores extremos elevados: o maior valor da distribuição vale 6380. Isso evidencia o fato expresso pela fórmula acima que indica que a razão V_a/V_t cresce com o tamanho do açude.

A relação encontrada é uma relação média: é óbvio que existe uma dispersão que reflete a variabilidade das condições naturais. Nota-se alguns casos extremos de barragens de grande porte construídas em boqueirões estreitos, como o açude Saco de Serra Talhada (PE), represa de 30 milhões de m^3 e com drenagem da ordem de apenas 150 metros de comprimento. Outro exemplo é o do local chamado Passagem Funda, no rio Apodi, cujo boqueirão apresenta oportunidade, incansavelmente apregoadá por Phelippe

Fig.44

RELAÇÃO VOLUME DE TERRA/VOLUME DE ÁGUA AMOSTRA DE 273 AÇUDES



Guerra no início do século, para represar mais de um bilhão de m^3 com uma parede de apenas 194 metros.

TABELA 16

Distribuição da razão Vágua/Vterra

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	.9	.75	.5	.25	.1	MÉDIA
V_a/V_t (amostra total)	6.00	9.20	16.40	40	180	112

Limitando-se agora à faixa de capacidade que nos interessa mais diretamente, ou seja, restringindo-se aos açudes oriundos do Projeto Sertanejo (160 açudes, de capacidade média de $100.000 m^3$), obtém-se a Figura 45. Observamos uma grande dispersão que espelha a variabilidade das situações topográficas.

O estudo da distribuição dessa amostragem em função da razão $V_{\text{água}}/V_{\text{terra}}$ fornece os valores estatísticos seguintes:

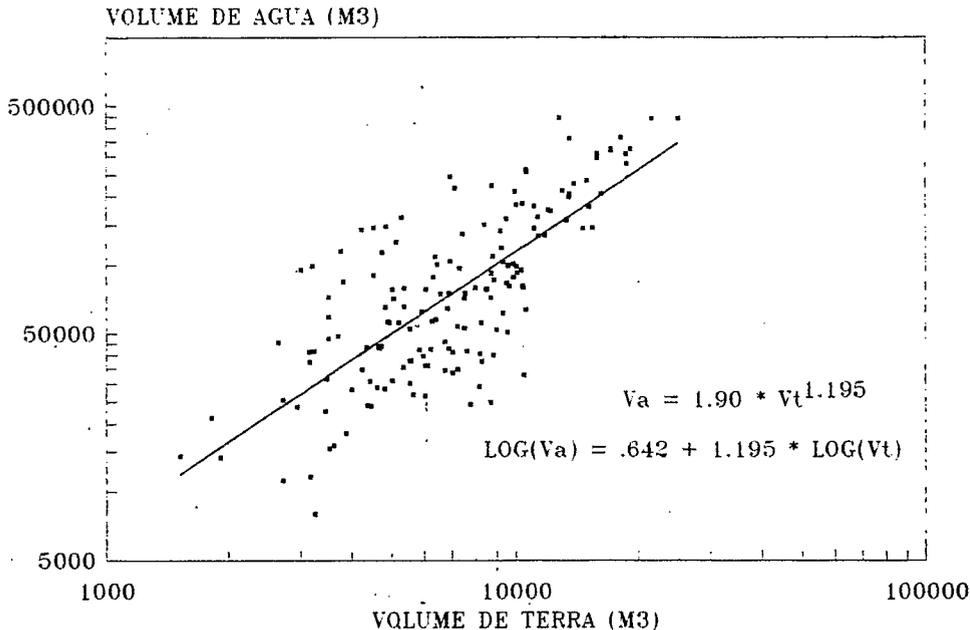
TABELA 17

Distribuição da razão Vágua/Vterra
para Vágua < $120000 m^3$

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	.9	.75	.5	.25	.1	MÉDIA
V_a/V_t (160 açudes)	4.80	6.85	10.50	15.70	22.00	12

Essas duas Tabelas e a regressão apresentada acima permitem, em função da relação V_a/V_t prevista, avaliar a oportunidade de um determinado projeto, possibilitando uma comparação com valores frequenciais. A título de exemplo, notamos que projetos de volume menor que $120.000 m^3$ e razão V_a/V_t próxima a 5, são, a priori, desfavoráveis.

Fig.45 RELAÇÃO Vagua / Vterra
160 AÇUDES DO PROJETO SERTANEJO



6.6 - CÁLCULO ECONÔMICO DA CONSTRUÇÃO

É de certo interesse fazer aqui uma digressão a respeito da utilização dos resultados que acabamos de obter para fins de cálculos econômicos.

O custo da obra pode ser estimado através das etapas seguintes:

- avaliação do volume do Aterro: $V_{\text{terra}} = 1.019 LH^2$
(L = comprimento da barragem, H = altura da barragem)
- avaliação do volume de fundação: $V_{\text{fund}} = 17\% V_{\text{terra}}$
- número de horas de trator NH

Consideramos 15 m³/hora para construção do maciço, e 30 m³/hora para a cavação da fundação, levando em conta uma distância de transporte média de 60 metros. (Valores médios para tratores de 70-90 HP

tipo FIAT AD7 ou Caterpillar D4).

$$NH = V_t (1.17/15 + .17/30) = V_t/11.95$$

- custo da hora de trator (US\$ 20,00/hora*)
- custo total da barragem, incluindo o sangradouro e a água para compactação (computa-se acréscimo de 30%)

$$\text{CUSTO TOTAL} = 1.3 * 20 * V_t/11.95 = 2.18 V_t \text{ (US\$)}$$

Esse cálculo pode, evidentemente, ser adaptado em função das características: estimativa melhor do volume de fundação, maior distância de transporte do material, sangradouro natural externo de custo nulo, material já úmido, etc.

A relação média entre o volume de terra e o volume d'água tem, também, grande interesse para cálculos de planejamento, já que permite, através do cálculo exposto acima, associar um preço médio ao metro cúbico de volume armazenável.

$$\text{De, } V_{\text{agua}} = 0.077 V_{\text{terra}}^{1.59} \text{ deduz-se:}$$

$$V_{\text{terra}} = 5.02 V_{\text{agua}}^{.629}$$

Utilizando-se os parâmetros econômicos adotados acima, chegamos, a título de exemplo, a:

$$\text{CUSTO TOTAL} = 2.18 \times 5.02 V_{\text{agua}}^{.629} = 10.94 V_{\text{agua}}^{.629}$$

o que dá o custo unitário por m³:

$$\text{Custo/m}^3 = \text{CUSTO TOTAL}/V_{\text{agua}} = 10.94 \cdot V_{\text{agua}}^{-0.371}$$

ou seja:

US\$ 0.36	o m ³ de água para um açude de 10.000m ³
US\$ 0.15	o m ³ de água para um açude de 100.000m ³
US\$ 0.065	o m ³ de água para um açude de 1.000.000m ³

A Tabela seguinte dá a relação média entre V_{terra} e o custo total da obra.

* Esse preço pode ser bastante variável, devendo-se modificar todas as formulas seguintes se se dispuser de outro valor mais preciso.

TABELA 18

Correspondências médias entre $V_{\text{terra}}/V_{\text{agua}}$ e o custo da obra

V_{terra} (m3)	V_{agua} (m3)	Custo (\$)	V_{agua} (m3)	V_{terra} (m3)	Custo (\$)
2000	13650	4630	25000	2926	6379
4000	41098	8720	50000	4525	9865
6000	78298	13080	75000	5840	12731
8000	123716	17440	100000	6989	15256
10000	176397	21800	150000	9031	19687
12000	235716	26160	200000	10822	23592
15000	336206	32700	250000	12452	27146
20000	531041	43600	300000	13965	30444
25000	757208	54500	500000	19257	41979
30000	1011844	65400	1000000	29779	64917

Uma outra aplicação desses resultados é a comparação entre um grande açude e vários pequenos que totalizam um mesmo volume armazenado. Consideremos, a título de exemplo, um açude de 10 m de profundidade com lei cota/volume $V = 3000 H^3$; 8 açudes com somente 5 m de profundidade e de mesma lei cota/volume. Verificamos que o volume d'água total desses 8 reservatórios é igual ao volume do grande açude, ou seja $V_x = 3$ milhões de m^3 . Avaliando-se o volume de terra necessário, em cada caso, conseguimos:

$$\text{Caso 1: 1 grande açude: } V_{\text{terra 1}} = 5.02 V_x^{.629}$$

$$\text{Caso 2: 8 pequenos açudes: } V_{\text{terra 2}} = 8 \times 5.02 \frac{V_x^{.629}}{8}$$

ou seja, a relação $V_{\text{terra 1}}/V_{\text{terra 2}} = .46$

Admitindo um custo de obra proporcional ao volume de terra, observamos que a segunda solução é, aproximadamente, duas vezes mais onerosa (considerando-se as relações médias).

Isso mostra que o custo do m^3 de água armazenado fica aproximadamente dividido por dois quando se duplica a profundidade, o que corresponde a uma multiplicação por oito do volume armazenado.

O caso 1 leva nítida vantagem no que tange, também, às perdas por evaporação. Com efeito, considerando-se todos os açudes cheios, a relação entre as superfícies dos espelhos d'água é $S_1/S_2 = 9000 \cdot 10^2/8 \times 9000 \times 5^2 = 0.5$. Isto significa que as perdas por evaporação no caso 1 são apenas a metade das obtidas no caso 2.

No entanto, a segunda solução apresenta importante vantagem no que diz respeito à disseminação das fontes d'água, sem falar dos aspectos ligados ao tamanho dos perímetros irrigados para os quais os pequenos apresentam maior rentabilidade, evitando os problemas notórios dos grandes perímetros públicos.

Vale frisar, ainda, que esse cálculo rápido não leva em consideração o custo dos estudos preliminares (para o grande açude) nem o fato de que obras como o sangradouro são relativamente mais caras para grandes obras, o que pode contribuir para diminuir sensivelmente a vantagem econômica evidenciada.

7. AVALIAÇÃO DO VOLUME A PARTIR DE FOTOS AÉREAS

A escolha do local do açude e da futura cota de sangria já define a extensão do espelho d'água. Como mostramos no item 6.1, dois açudes de mesma superfície máxima S_x podem ter volumes e profundidades totalmente diferentes.

De maneira geral, um espelho de grande extensão é vantajoso para:

- . cultivos de vazante (grande superfície cultivável);
- . piscicultura (a quantidade de peixes é função da superfície);
- . diminuição do efeito das infiltrações (se à infiltração corresponde um volume, o rebaixamento conseqüentemente será menor na medida em que o espelho d'água for mais extenso).

é desvantajoso por:

- . aumentar as perdas por evaporação;
- . inundar terras de possível uso agrícola.

7.1 - ESTIMATIVA DO VOLUME A PARTIR DA SUPERFÍCIE

Uma primeira relação entre o volume V_x e a superfície S_x é dada pela Figura 46. Para um mesmo volume V_x , observamos espelhos d'água de variados tamanhos.

Com o intuito de calcular o volume a partir da superfície, o que seria de grande utilidade para aproveitamento das fotos aéreas ou das fotos de satélites, pode-se introduzir uma variável suplementar calculável, também, a partir da foto.

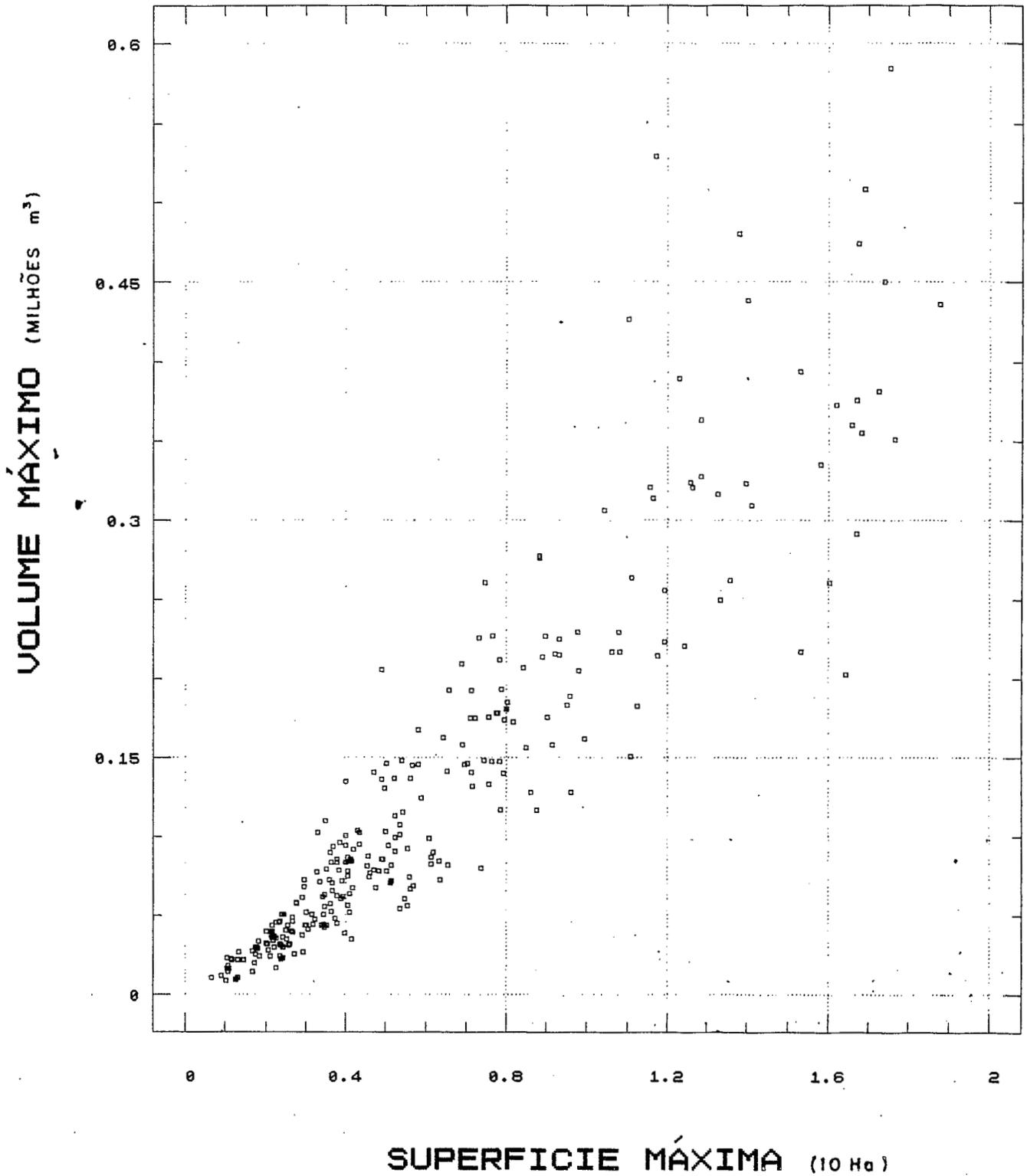
As únicas variáveis acessíveis por tais métodos são, em primeiro lugar, o comprimento da barragem, o diâmetro, a superfície, o perímetro do espelho d'água, a partir dos quais pode-se calcular o índice de capacidade e o retângulo equivalente. Em segundo lugar, pode-se estimar, a partir das fotos aéreas, o declive médio do riacho bem como o comprimento do talvegue (dentro da bacia hidráulica, a partir da forma geral do espelho d'água).

Uma análise multilinear sobre uma amostra de 314 açudes (Quali = 1), entre V_x e essas diferentes variáveis, só reteve,

RELAÇÃO VOLUME MÁXIMO/SUPERFÍCIE MÁXIMA

Fig.46

PARA SUPERFÍCIES < 20 Ha



como era de se esperar, a variável S_x , fornecendo as regressões seguintes:

$$V_x = -3144 + 2.04 S_x \quad r^2 = .946 \quad S_x < 80 \text{ ha}$$

$$V_x = -13853 + 2.95 S_x \quad r^2 = .844 \quad S_x < 20 \text{ ha}$$

O valor $r^2 = .946$, obtido para a primeira regressão é, em parte, devido à irregularidade da distribuição da variável S_x , havendo poucos valores na parte superior da faixa de variação e, por conseguinte, geração de um r^2 alto. Por isso, efetuamos uma regressão sobre a nuvem de pontos principais, restringindo-se às superfícies inferiores a 20 hectares.

A regressão sobre função potência deu um resultado de precisão equivalente.

$$V_x = 1.98 S_x^{1.001} \quad r^2 = .946 \quad \text{amostra completa}$$

$$V_x = -23776 + 5.64 S_x^{.93} \quad r^2 = .899 \quad S_x < 80 \text{ ha}$$

$$V_x = -6290 + .425 S_x^{1.147} \quad r^2 = .847 \quad S_x < 20 \text{ ha} \\ (273 \text{ pts})$$

A precisão dessas fórmulas é de $\pm 25\%$ para uma probabilidade de 0.5.

Introduzindo agora a declividade média do riacho (DM), é lógico, por definição, procurar um ajustamento em função do produto $S_x \cdot DM$ ou, geralmente, de $S_x^a \cdot DM^b$, obtendo-se:

$$V_x = S_x^{1.065} DM^{.144} \quad r^2 = .95 \quad 245 \text{ valores}$$

$$V_x = 0.117 S_x^{1.263} DM^{.49} \quad r^2 = .905 \quad S_x < 20 \text{ ha}$$

$$V_x = 0.045 S_x^{1.348} DM^{.50} \quad r^2 = .88 \quad S_x < 10 \text{ ha}$$

A introdução da variável DIAM não melhora o ajustamento, enquanto a variável LEITO (comprimento do riacho) traz um pequeno aumento de r^2 ,

$$V_x = 0.00348 S_x \cdot DM \cdot LEITO \quad r^2 = .973$$

$$V_x = 0.00384 S_x \cdot DM \cdot LEITO \quad r^2 = .944 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (230 \text{ pts})$$

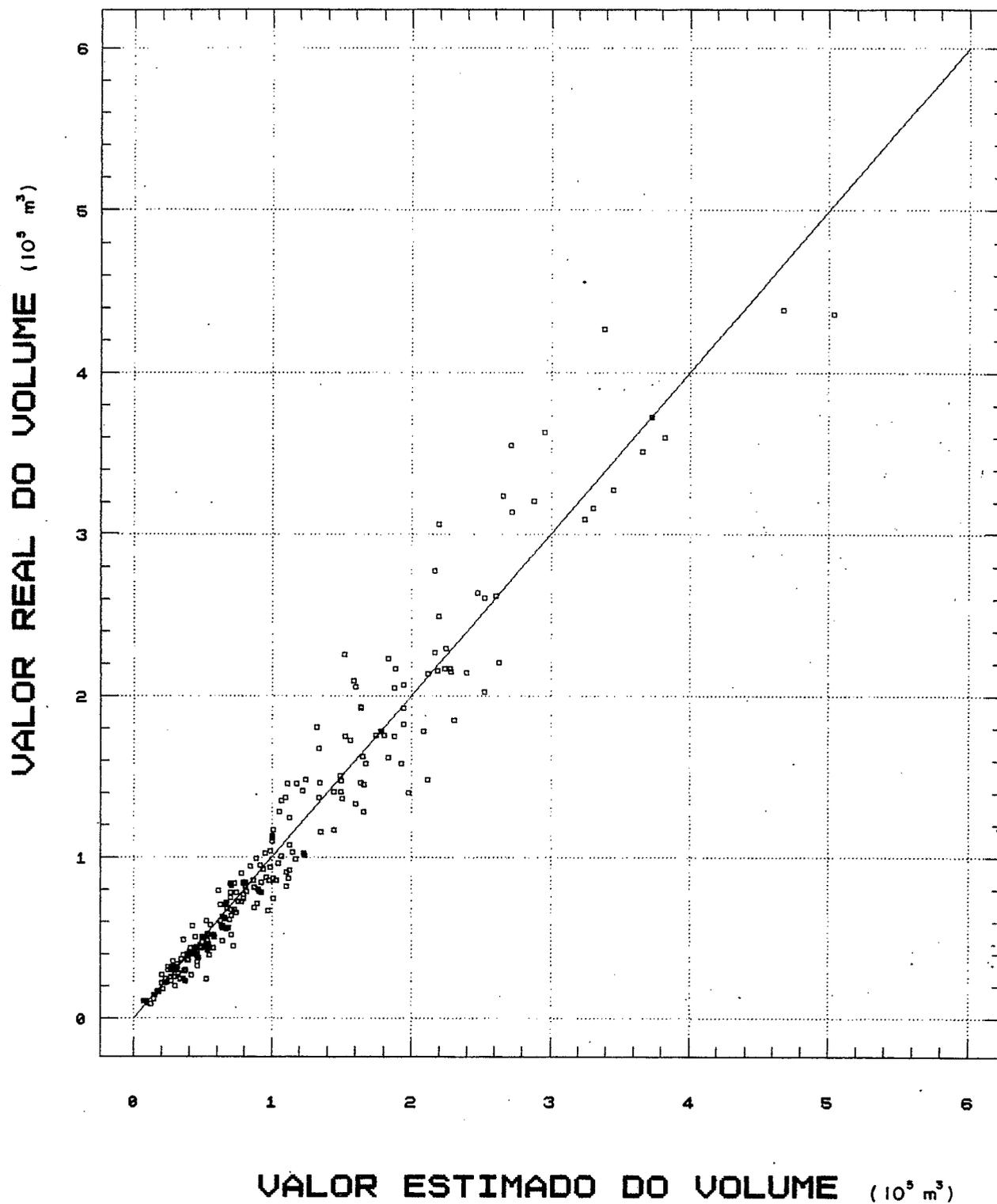
$$V_x = 0.00377 S_x \cdot DM \cdot LEITO \quad r^2 = .916 \quad S_x < 10 \text{ ha} \quad (203 \text{ pts})$$

chegando-se a uma correlação satisfatória como mostrado na Figura 47. Essas relações, na realidade, reintroduzem a profundidade mediante o produto $DM \cdot LEITO$, mas estas podem ser

VOLUME DO AÇUDE EM FUNÇÃO DE $DM \cdot LEITO \cdot SX$

Fig.47

PARA SUPERFICIES < 20 Ha



utilizadas para valores de DM estimados a partir das curvas de nível do mapa ou das fotos aéreas.

Essas relações também não permitem estimar o volume de um determinado açude com a precisão requerida para um projeto, mas são suficientes para, em termos de planejamento, avaliar com boa precisão os volumes armazenados de uma região, havendo certa compensação dos erros.

As tentativas de introdução das variáveis IC (Índice de compacidade) e REC foram infrutíferas.

Dubreuil (1966), baseando-se em uma amostragem de 160 açudes da bacia do Jaguaribe, estimou a profundidade da represa a partir do declive do riacho (como é natural), sendo este último correlato ao inverso do cubo da superfície da bacia hidrográfica. Essa superfície, em último lugar, varia com o quadrado do comprimento do riacho principal.

Não conseguimos evidenciar mais que uma tendência geral, no que tange à relação entre H_x e a superfície da bacia hidrográfica. Várias razões podem explicar esse fato:

- As fracas variações de DM, que vale 1.07%, em média, e cuja distribuição é:

Intervalo:]0;0.5]]0.5;1]]1;1.5]]1.5;2]	> 2
Nº de açudes:	29	130	80	47	17

- A qualidade insuficiente dos dados referentes à superfície das bacias.
- O caráter regional limitado da relação achada por Dubreuil.
- A diferença de tamanho das bacias, tratando-se, no nosso caso, de bacias relativamente menores.

7.2 - IMPORTÂNCIA DA DATA DE OBSERVAÇÃO

Uma estimativa global dos volumes armazenados disponíveis a partir da superfície do espelho d'água é muito dependente da data em que está realizada. Uma avaliação do volume total somente será possível logo depois de uma estação

chuvosa muito abundante (1985, por exemplo). Pode-se calcular a percentagem de água remanescente nos açudes depois de sete meses secos (junho - dezembro) subseqüentes a um inverno abundante (no fim do qual os açudes são considerados cheios).

O volume sobrando no fim da estação seca V_s , expresso em % do volume máximo, pode ser calculado por:

$$V_s = ((H_x - EVINF)/H_x) \alpha$$

onde EVINF representa as perdas por evaporação e infiltração no período junho/dezembro.

As duas tabelas seguintes mostram como varia V_s para EVINF = 1.70 m e EVINF = 2.20 m.

TABELA 19

Volume sobrando em fim de estação seca (% V_x)
(EVINF = 1.70 m)

ALFA	H_x (m)					
	3	4	5	6	8	10
2.1	17	31	42	50	61	68
2.4	13	26	37	45	56	64
2.7	18	22	33	41	52	68
3.0	8	19	29	37	49	57
3.3	6	16	25	33	45	54

TABELA 20

Volume sobrando em fim de estação seca (% V_x)
(EVINF = 2.20 m)

ALFA	H_x (m)					
	3	4	5	6	8	10
2.1	6	19	30	30	51	59
2.4	4	15	25	33	46	55
2.7	3	12	21	29	42	51
3.0	2	9	18	25	38	47
3.3	1	7	15	22	35	44

Nota-se:

- A grande influência de α na diminuição do volume. Para um açude de 5m e valor de $EVINF = 2.20$ m, o volume final varia entre 15 e 30%.
- A variação lógica com H_x ; observa-se, entretanto, que para um açude de até 10 m de profundidade, o volume perdido varia entre 55% e 32%, isto acontecendo devido ao fato de grande percentagem do volume total se concentrar na camada superior. Vale lembrar a repartição do volume para um açude médio de 5m de profundidade, de lei cota/volume: $V = K.H^{2.70}$

FAIXAS		% Vx
4m	- 5m	45.3
3m	- 4m	29.6
2m	- 3m	16.7
1m	- 2m	7.1
0	- 1m	1.3
		100%

Ressalta-se que mais de 45% do volume total está armazenado entre as cotas 4 e 5 metros.

De maneira geral, verifica-se que, para $\alpha = 2.70$, 54% do volume de um açude se encontra no quarto superior da represa, valor que alcança 60% para um valor de $\alpha = 3.20$.

Utilizamos a nossa amostra para fazer estatísticas sobre o volume sobrando no fim do período seco. $EVINF$ foi computado por:

$$EVINF = 1934 \cdot Ka (S_x) \cdot TINF$$

onde:

$$Ka(S_x) = .9 - .165 \text{ Arctg} (2.S_x/30) \quad S_x(\text{ha})$$

- Ka é o coeficiente de passagem entre a evaporação do açude e a do Tanque Classe A (Molle, 1989).
- 1934 é a evaporação média do Tanque Classe A no período junho/dezembro (mm).
- $TINF$ é uma taxa de infiltração mediana (Molle, 1989) tomada igual a:

$$\begin{aligned} &1.26 \text{ para } S_x < 10 \text{ ha} \\ &1.13 \text{ para } S_x > 10 \text{ ha} \end{aligned}$$

A média do volume sobrando nos açudes da nossa amostragem (416 pontos) nas condições aludidas, é de 27% e segue a seguinte distribuição:

TABELA 21

Valores freqüenciais do volume sobrando
em fim de período seco (%V_x)

Probabilidade de ocorrência	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
Valor %	7	12	17	22	27	31	36	41	50

Isto significa que somente 10% dos açudes da amostragem encontram-se com mais da metade do volume máximo. A metade deles chega a um volume inferior a 27% do volume inicial.

8. BACIA HIDROGRÁFICA E DIMENSIONAMENTO

8.1 - DIMENSIONAMENTO DO AÇUDE

O cálculo do dimensionamento do açude baseia-se no tamanho e nas características fisiográficas da bacia hidrográfica, bem como, na precipitação local (CHU).

Embora não seja assunto deste trabalho, aproveitamos a base de dados para relacionar a superfície da bacia hidrográfica (BACIA) com o volume V_x do açude.

Seja R o coeficiente de escoamento anual necessário para encher o açude. R é definido por:

$$\text{VOLMAX (m}^3\text{)} = 10 \cdot R \cdot \text{CHU(mm)} \cdot \text{BACIA(km}^2\text{)}$$

Sabe-se (Cadier, 1984) que, no Sertão Semi-árido, as lâminas escoadas anuais médias são da ordem de 5 a 15% da precipitação anual média.

A Figura 48 mostra a distribuição da amostragem em função do coeficiente R, necessário para encher o açude (ano médio).

Distinguiu-se 97 açudes, a maioria oriunda dos núcleos do Projeto Sertanejo, com superfície média igual a 5.71 km² (Amostra Sert.) e 59 açudes projetados pela IOCS (Sup. média 50.5 km²). A primeira amostra tem R médio próximo a 10%, enquanto que o da amostra do IOCS aproxima-se de 7%.

As médias correspondentes, 7.9% e 3%, mostram que a maioria dos projetos da IOCS estão subdimensionados, em parte por falta de conhecimento hidrológico naquela época e, também, porque os sítios mais favoráveis correspondem a bacias bastante grandes com poucos açudes já construídos.

8.2 - RELAÇÃO ENTRE AS BACIAS HIDROGRÁFICAS E HIDRÁULICAS

A Figura 49 mostra a relação existente entre a bacia hidrográfica (BACIA) e a superfície máxima do açude (SUPMAX), com um "zoom" sobre os pontos baixos, tais que SUPMAX < 40 ha. As curvas são exponenciais correspondentes a valores constantes de BACIA/SUPMAX; a dispersão dispensa qualquer ajustamento.

Fig.48

COEFICIENTE DE ESCOAMENTO ANUAL NECESSARIO PARA ENCHER O AÇUDE

PERCENTAGEM DA AMOSTRA

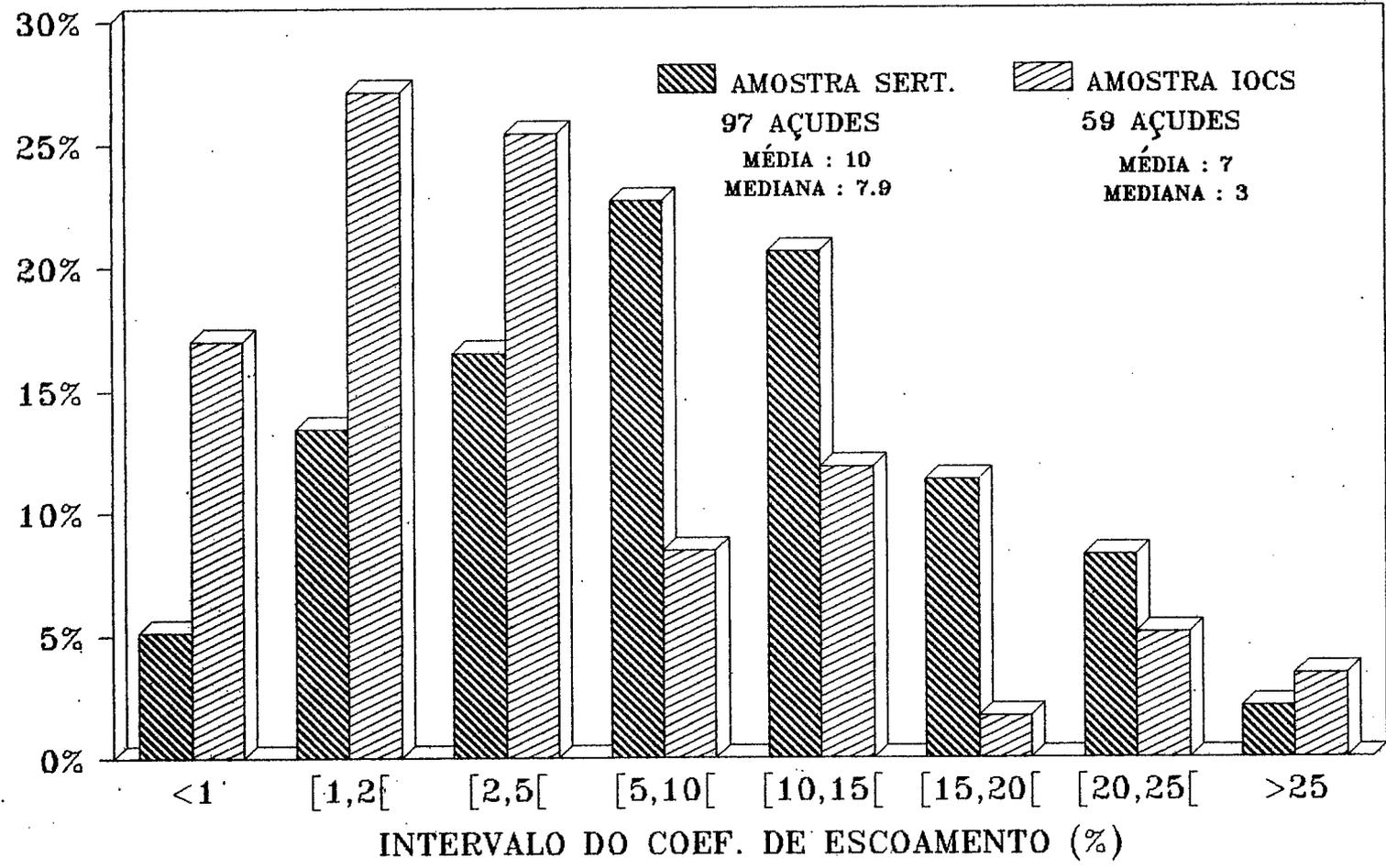
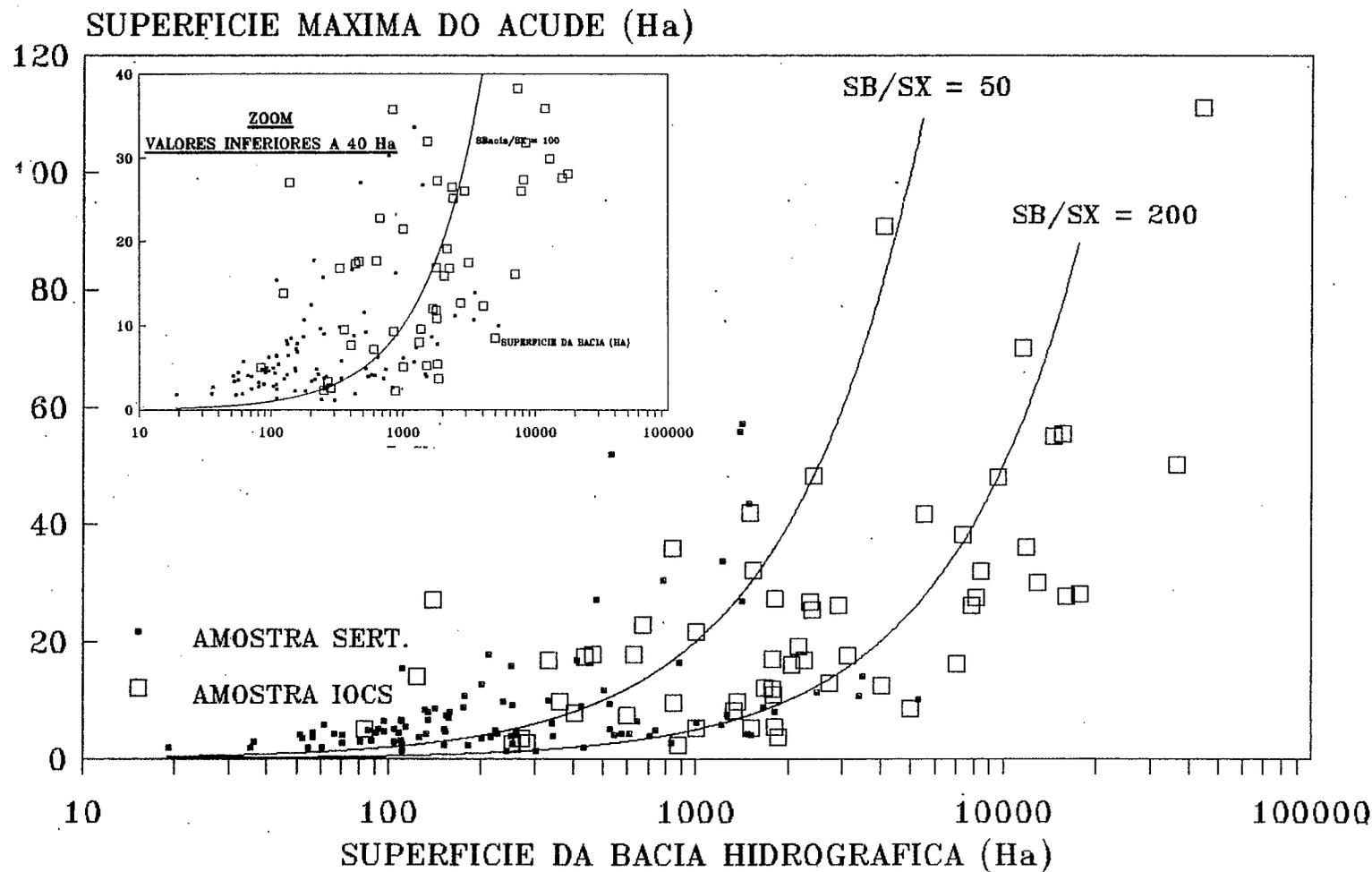


Fig.49

RELAÇÃO ENTRE AS SUPERFÍCIES DAS BACIAS HIDRAÚLICAS E HIDROGRÁFICAS (156 AÇUDES)



8.3 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO

O dimensionamento do sangradouro é feito considerando a cheia centenária estimada Q_c , dita cheia de projeto. Para bacias hidrográficas de superfície superior a 500 km², utilizamos, geralmente, a fórmula de Aguiar.

$$Q_c = 1150.S/((L.C)^5 (120+K.L.C.))$$

onde: S = área da bacia hidrográfica em km²

L = linha de fundo, em km

K, C = coeficientes que dependem do tipo da bacia

No caso de bacias menores, pode-se utilizar as fórmulas propostas por Cadier.

$$Q_c = 17 . S.80 . fc \quad (\text{Bacia} < 5 \text{ km}^2)$$

$$Q_c = 25 . S.58 . fc \quad (\text{Bacia} > 5 \text{ km}^2)$$

onde: fc é um fator de correção que consideramos aqui, igual a 1, na ausência de informação complementar sobre a bacia.

Utilizamos esta fórmula para comparar a cheia de projeto, assim estimada, com a vazão admissível, Q_a , nos sangradores dos açudes estudados. Essa vazão é calculada através da fórmula:

$$Q_a \text{ (m}^3\text{/s)} = m.L.H^{3/2}$$

onde: L é a largura do sangradouro, H a altura da lâmina vertida no nível da soleira e m um coeficiente que vale 1.6 para vertedouros (retangulares) de alvenaria e, aproximadamente, 1.5 para sangradores entalhados na rocha.

Entre os projetos que apresentam a superfície da bacia hidrográfica, 27 fornecem, também, a lâmina máxima prevista no sangradouro. Para essa amostragem limitada, calculamos a razão Q_a/Q_c (considerando um valor de m = 1.5). Somente 4 projetos apresentaram uma relação Q_c/Q_a superior a 1, enquanto 12 tinham um valor inferior a .5, como indicado na Figura 50, demonstrando assim, um forte subdimensionamento dos sangradores (relação média: 0.65).

Para os açudes cuja lâmina máxima não era discriminada, adotamos, como é de praxe, uma folga de 1 m, deduzindo L por $L = \text{Cota coroamento} - \text{Cota sangradouro} - 1$. Havendo uma grande disparidade entre os resultados referentes aos projetos

Fig.50 RAZAO CHEIA ADMISSIVEL/CHEIA CENTENARIA
DISTRIBUICAO PARA 27 ACUDES

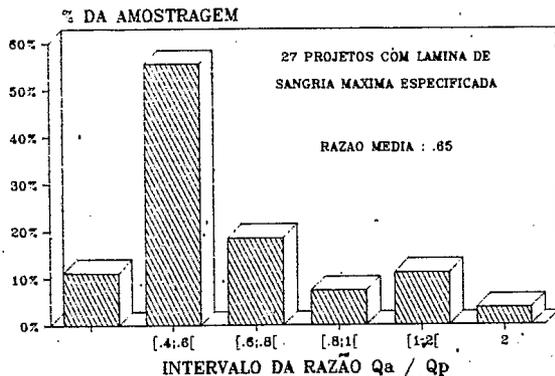


Fig.52 RAZAO CHEIA ADMISSIVEL/CHEIA CENTENARIA
DISTRIBUICAO PARA 55 ACUDES
COM VARIACAO DA FOLGA

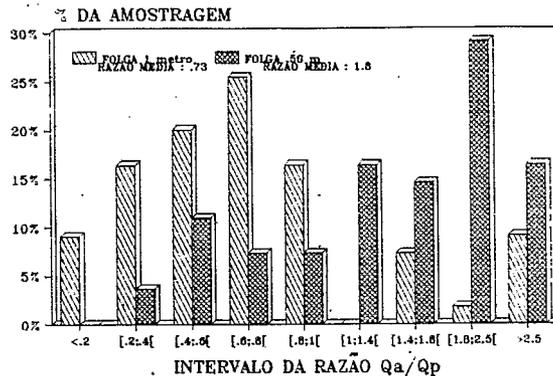
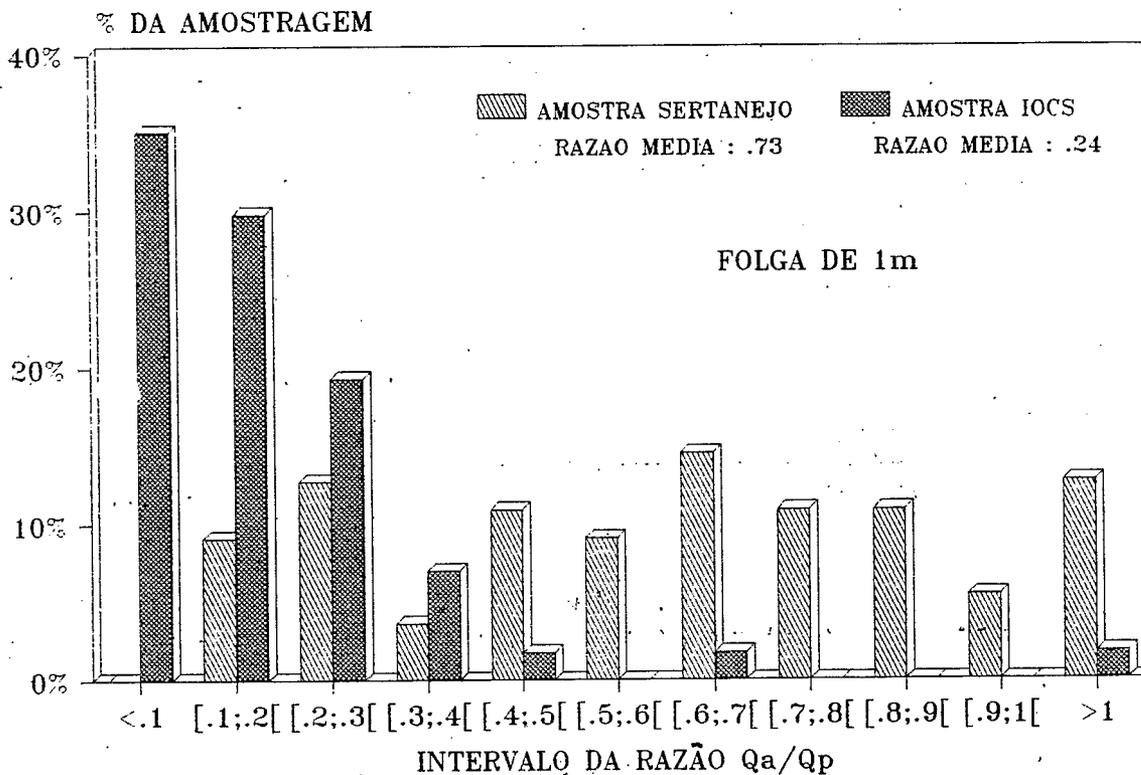


Fig.51 RAZAO CHEIA ADMISSIVEL/CHEIA CENTENARIA
DISTRIBUICAO PARA 112 ACUDES



da IOCS e os do projeto Sertanejo, separou-se essas duas amostras, computando-se 57 açudes para a primeira e 55 para a segunda.

As respectivas médias da razão Q_a/Q_c foram .24 e .73 apontando para um subdimensionamento geral e nitidamente mais acentuado para os açudes da IOCS. A distribuição das amostragens segundo o valor de Q_a/Q_c encontra-se na Figura 51, na qual observa-se que apenas 12% dos açudes do Projeto Sertanejo estão corretamente dimensionados. Entretanto, cumpre fazer as seguintes ressalvas e observações:

- O resultado obtido varia de maneira significativa se considerarmos uma folga de apenas 50 cm. A média de Q_a/Q_c passa de 0.73 a 1.80, para amostra do P.Sertanejo e de 0.24 a 0.56 para a da IOCS.

A Figura 52 indica como varia a distribuição de Q_a/Q_c para uma folga de 1 m e 50 cm, considerando-se os 55 açudes do projeto Sertanejo.

- É possível que os projetos para os quais os cálculos foram realmente feitos tenham utilizado a fórmula de Aguiar, a qual foi formulada e calibrada para bacias de superfície superiores a 500 km².
- Os cálculos de Q_c feitos acima não levam em consideração a amortização da cheia pela superfície da represa, fenômeno que para açudes de certo porte pode ser de relevante influência.
- Os dados referentes aos projetos da IOCS espelham uma falta de conhecimento hidrológico no início do século, embora ressalve-se que 40% desses sangradouros são naturais e suscetíveis de serem erodidos.
- A qualidade dos dados, no que diz respeito à superfície da bacia hidrográfica não pôde ser conferida.

9 PROPOSTAS PARA DETERMINAÇÃO SIMPLIFICADA DOS COEFICIENTES GEOMÉTRICOS E DO VOLUME ARMAZENADO

9.1 - AVALIAÇÃO SUMÁRIA

A fórmula $V_x = H_x \cdot S_x / \alpha$ leva-nos a propor uma estimativa do volume a partir da profundidade e da superfície que constituem a informação mínima para tal estimativa.

Considerando o valor médio de α , ou seja, 2.70, avalia-se o volume máximo por:

$$V_x = \frac{H_x \cdot S_x}{2.70}$$

Entretanto, esta fórmula apresenta um ligeiro viés já que a sua validade deriva da hipótese de que a relação cota/volume do açude é, por ela, perfeitamente representada.

Evidenciou-se, em linhas anteriores, que a adequação da Lei $S = \alpha \cdot K \cdot H^{(\alpha-1)}$, derivada da lei cota/volume, é um pouco inferior a esta última.

A consequência disto é que a regressão linear entre V_x e $H_x \cdot S_x$ fornece um resultado ligeiramente diferente:

$$V_x = \frac{H_x \cdot S_x}{2.68} \quad r^2 = .952 \quad (253 \text{ pontos} - \text{volume} < 800.000 \text{ m}^3)$$

O intervalo de confiança dessa fórmula é $\pm 13\%$, $\pm 20\%$, $\pm 31\%$ para respectivas probabilidades de 60%, 80% e 95%.

ATENÇÃO: A existência de uma caixa logo a montante da barragem pode levar a uma superestimação de H_x e, conseqüentemente, do volume. Deve-se levar em conta as indicações do proprietário a esse respeito e observar a cota do terreno natural a jusante da barragem que pode ser utilizada para o cálculo.

Várias tentativas foram feitas para melhorar essa fórmula e propor um valor médio de (α) relacionado à superfície e/ou à profundidade do açude. De fato, uns gráficos apresentados no Anexo 2 mostram que:

- existe uma correlação entre (K) e a superfície (e o volume) do açude, significando apenas que os

reservatórios de maior porte têm coeficientes de abertura mais elevados.

- apesar de existir uma correlação entre (α) e $\text{Log}(K)$, como mostrado na figura 35, não existe correlação entre (α) e a superfície (ou o volume do açude): na composição das duas correlações, perde-se a informação.

O exame detalhado da relação $\alpha=f(H_x)$, mostra que apenas existe certa correlação para açudes de espelho d'água inferior a 25 ha. Mesmo assim, a relação encontrada apresenta valor de r^2 igual .31.

$$\alpha_m = 1.95 + .175 H_x$$

Este valor de α_m permite uma estimativa um pouco melhor do volume total pela fórmula $V_x = H_x \cdot S_x / \alpha_m$; o coeficiente r^2 vale .88 para a relação $\text{VOLMAX}/(H_x \cdot S_x / \alpha_m)$ contra .84 para relação $\text{VOLMAX}/(H_x \cdot S_x / 2.68)$.

9.2 - METODOLOGIA SIMPLIFICADA

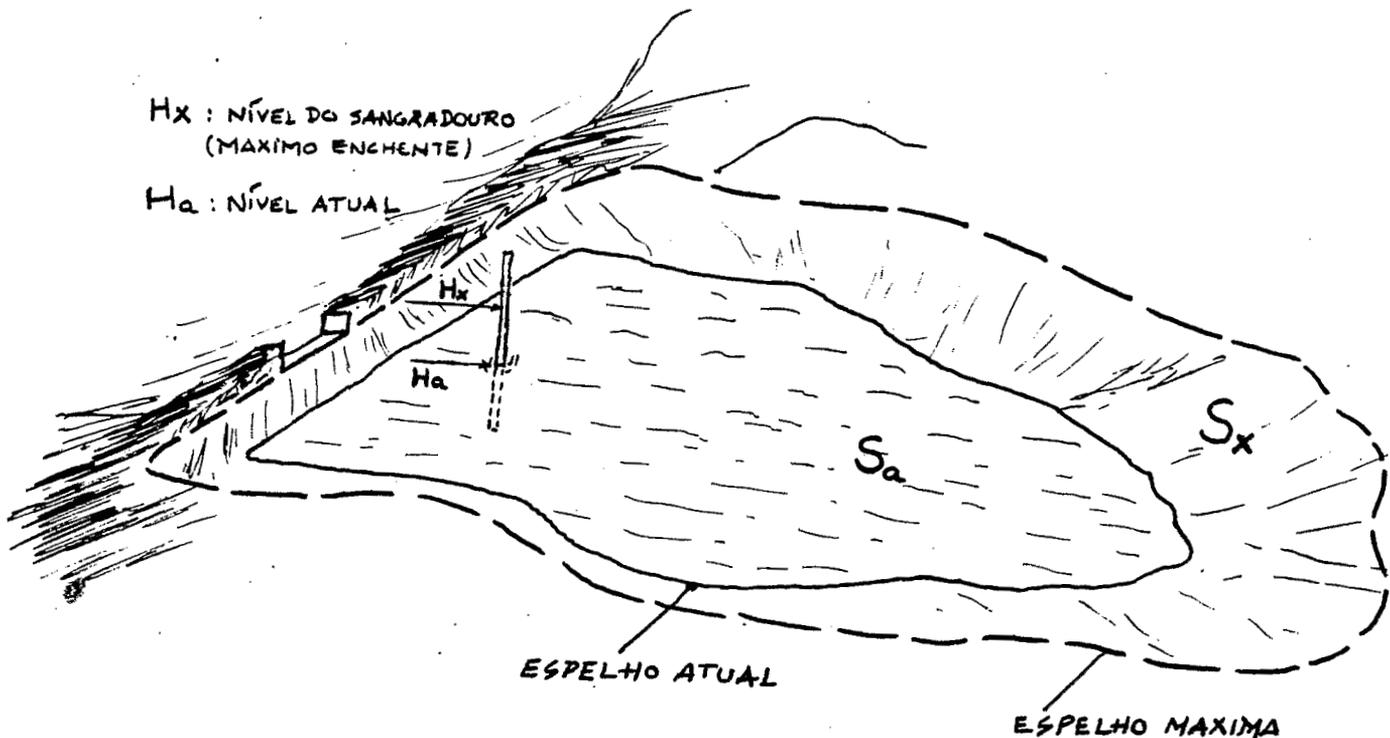
Com o intuito de elaborar uma metodologia simplificada permitindo avaliar os coeficientes geométricos (α) e (K) , estudamos a possibilidade de realizar um levantamento menos completo do açude mas que forneça, assim mesmo, valores de (α) , (K) e (V_x) de precisão aceitável.

Para determinação da reta de regressão, precisamos, no mínimo de dois pares (H, S) . Por isso, pode-se imaginar restringir o levantamento topográfico do açude ao levantamento de dois espelhos d'água distintos, os quais, por razões práticas óbvias, poderão ser o espelho d'água atual, S_a (no dia do levantamento) e o espelho d'água máximo (S_x) , correspondente à cota de sangria).

A essas superfícies correspondem profundidades notadas H_a e H_x (Ver Figura 53).

Fig.53

LEVANTAMENTO DE DOIS ESPELHOS D'ÁGUA

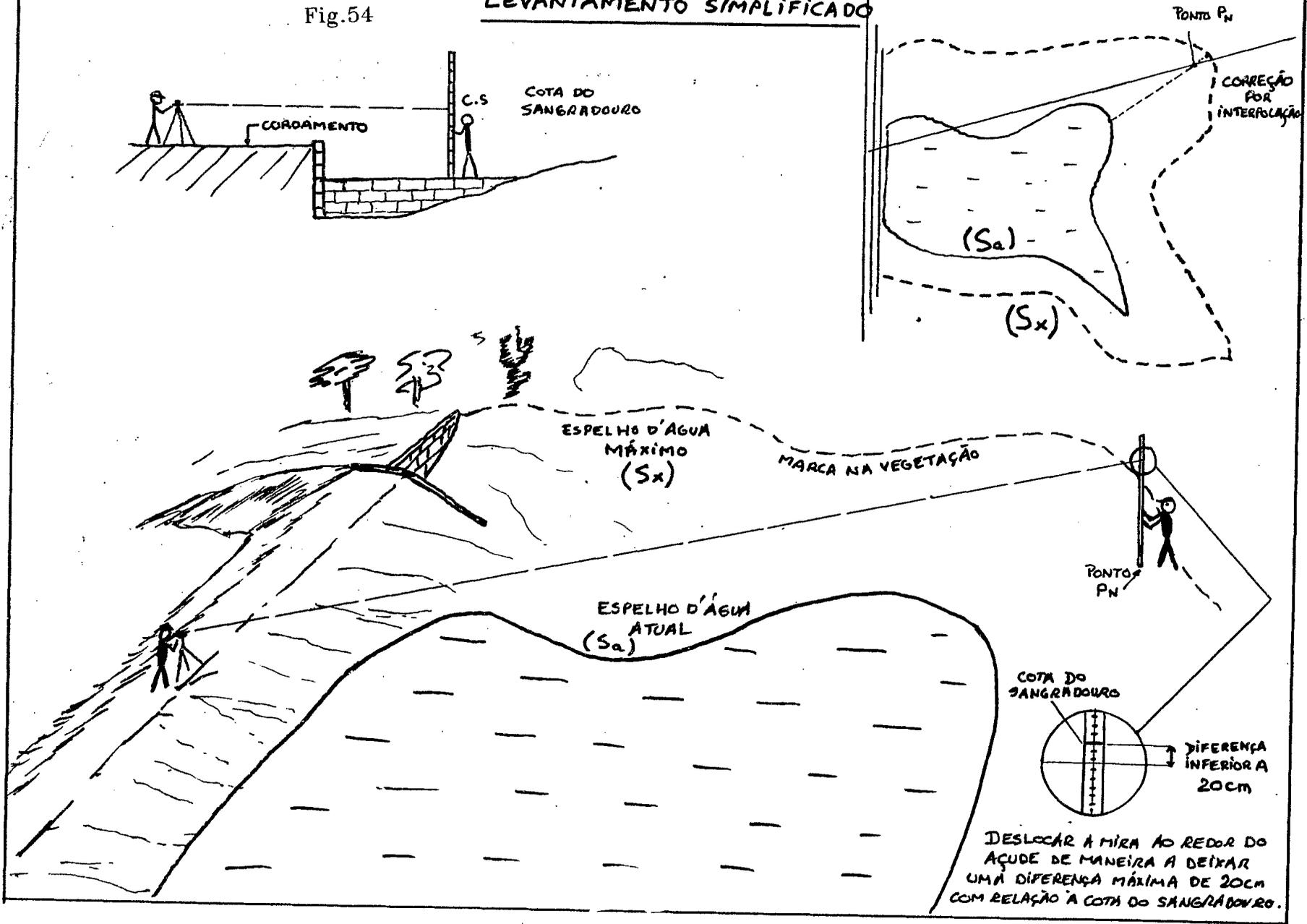


O levantamento do espelho d'água atual é o mais simples, bastando o porta-mira deslocar-se na margem da aguada. O levantamento do espelho d'água máximo será efetuado (valendo-se da marca na vegetação circunvizinha a título de primeira orientação) após determinar a cota do sangradouro na mira e deslocando esta última de maneira a mantê-la quase num plano horizontal. Para não perder tempo demais acertando o ponto exato que dê a cota do sangradouro, pode-se aceitar variações de 10 cm que serão corrigidas por interpolação (e extrapolação) na hora de desenhar a planta (ver Figura 54).

Caso o açude esteja cheio d'água ($H = H_x$), o porta-mira deverá deslocar a mira dentro d'água, de maneira a deixar o nível d'água na graduação de 1 metro: obtém-se assim, um espelho d'água atual fictício, correspondendo a $H_a = H_x - 1$ metro. Um procedimento desse tipo pode ser bastante penoso se o açude for

Fig.54

LEVANTAMENTO SIMPLIFICADO



grande; por isso efetua-se, de preferência, o levantamento quando o açude está com pouca água.

Se a diferença entre H_a e H_x for menos de 1 metro (para açudes de menos de 7 metros de profundidade e 2 metros para açudes com mais de 7 metros), aconselhamos considerar um espelho d'água S_a correspondente a uma cota H_a inferior, valendo-se do procedimento descrito acima.

Enfim, se a cota H_a estiver muito baixa ($H_a < H_x/3$), será preferível considerar um espelho intermediário entre S_a e S_x .

Em resumo, trata-se de determinar dois pares (H_a, S_a), (H_x, V_x) com as restrições: $H_x - H_a > 1\text{m}$ e $H_a > H_x/3$.

Dispondo-se apenas de dois pares (H_i, S_i), incorreríamos num erro importante se calculássemos os volumes V_i correspondentes pelos métodos descritos no capítulo 3. Por isso, é preferível efetuar diretamente uma regressão sobre os pares (H_i, S_i), a qual, passando apenas pelos dois pontos, resume-se à fórmula seguinte:

$$\alpha = 1 + \text{Log} (S_x/S_a) / \text{Log}(H_x/H_a)$$

obtida após eliminação de K entre as duas relações

$$S_x = \alpha \cdot K \cdot H_x^{(\alpha-1)}$$

$$S_a = \alpha \cdot K \cdot H_a^{(\alpha-1)}$$

o valor de K , por sua vez, é determinado por:

$$K = S_x / (\alpha \cdot H_x^{(\alpha-1)})$$

9.3 - ESTIMATIVA DOS ERROS

Supondo-se o levantamento executado, podemos estudar, numa primeira etapa, a variação da estimativa de V_x , com um erro sobre a determinação da profundidade (ou seja, sobre o ponto mais fundo H_0).

Consideremos um açude de 7 m de profundidade, cuja lei cota-volume é $V = 1000 \cdot H^\alpha$, com $H_a = 5$ m e $H_x = 7$ m, α valendo sucessivamente 2.70, 2.20, 3.20.

A Tabela 22 explicita a variação de α , K , V_a , V_x , obtidos pelo método exposto acima, para um erro de $0, \pm .5, \pm 1$ m; o erro sobre a cota do fundo é definido por H_0 considerando H_0 real + erro; um erro de 1 m consiste em considerar que um açude de 7 metros de profundidade real tem apenas 6 metros. As variações sobre V_a e V_x são expressas em % da diferença com o valor real.

TABELA 22

Erro na estimativa do volume decorrente de um erro sobre H_0

		ERRO	-1	0.5	0	0.5	1
		(m)					
$\alpha = 2.7$	α		2.988	2.844	2.700	2.556	2.411
	K		395	631	1000	1571	2444
	V_x (m^3)		197550	194592	191322	187700	183668
	erro/ V_x %		-3	-2	0	+2	+4
	erro/ V_a %		-9	-4	0	+5	+10
$\alpha = 2.2$	α		2.404	2.302	2.200	2.090	1.996
	K		511	717	1000	1387	1912
	V_x (m^3)		75646	74051	72313	70412	68324
	V_a		37887	36264	34493	32553	30418
	erro/ V_x %		-5	-2	0	+3	+6
	erro/ V_a %		-11	-5	0	+6	+13
$\alpha = 3.2$	α		3.573	3.387	3.200	3.013	2.826
	K		307	557	1000	1774	3109
	V_x (m^3)		510094	512452	506190	499202	491358
	V_a		185348	179256	172466	164852	156252
	erro/ V_x %		-2	-1	0	+1	+3
	erro/ V_a %		-9	-4	0	+4	+0

Constatamos que o erro sobre V_x é maior quando o valor de α diminui, sendo este da ordem de 4% para um erro de um metro e um valor de $\alpha = 2.70$ (erro que pode ser considerado como máximo). Observamos que o erro é maior para V_a , chegando-se a uma variação da ordem de 10% e, sobretudo, de (K), de até 300 %, variação oposta à de (α) que restabelece um volume máximo V_x de variação limitado.

A Tabela 23 mostra igual cálculo para um açude de mesma lei, mas de tamanho menor: $H_x = 4$ m, $H_a = 3$ m. O resultado evidencia uma sensibilidade maior que no caso anterior, chegando-se a erros aproximadamente duas vezes superiores.

TABELA 23

Erro na estimativa do volume decorrente de um erro sobre H_0
(açude de 4 metros)

ERRO	-1	0.5	0	0.5	1
α	3.192	2.946	2.700	2.453	2.206
K	262	518	1000	1881	3434
V_x (m^3)	44649	43536	42224	40658	38757
V_a (m^3)	21903	20764	19419	17808	15844
erro/ V_x %	-6	-3	0	+4	+8
erro/ V_a %	-13	-7	0	+8	+18

Esses erros são apenas resultados de uma má avaliação da cota do fundo. A Tabela 24 mostra como variam os resultados para um erro sobre S_x , ou sobre S_a , ou sobre os dois concomitantemente. Um erro igual a 0.9 significa que S_x foi estimada a 90% do seu valor real.

TABELA 24

Erro na estimativa do volume decorrente
de um erro sobre as superfícies

ERRO	S_x		S_a		S_x e S_a			
	0.9	1.1	0.9	1.1	.9;.9	1.1;1.1	.9;1.1	1.1;.9
α	2.387	2.983	3.013	2.417	2.700	2.700	3.296	2.104
K	1872	574	487	1939	900	1100	282	3687
V_x	194779	190471	171439	213747	172190	210454	172378	221007
V_a	87248	69806	62202	94786	69416	84482	56857	108896
erro/ V_x %	+1.8	-0.4	-11	+10.5	-11	+9	-11	+13
erro/ V_a %	+12	-10	-24	+18.6	-11	+9	-36	+29

A título de exemplo, para um valor de S_x determinado em 1.1 vez o valor real, obtém-se uma diferença de -0.4%. Enfim, um erro combinado sobre S_a e S_x de 10% e em sentido contrário, pode acarretar até 13% de erro sobre V_x e 36% sobre V_a .

9.4 - INTERVALO DE CONFIANÇA

Podemos considerar, em decorrência do que antecede, que a precisão obtida através deste método simplificado é satisfatória quando não se dispõe da possibilidade (em termos de tempo ou de recursos) de se realizar um levantamento completo, constituindo-se assim num compromisso aceitável entre o estudo completo e caro e a avaliação sumária e imediata.

A fim de determinar o intervalo de confiança sobre o volume máximo, calculou-se α , K , V_x por este método (respectivamente ALFA2, ABER2, VOL2), considerando os açudes de melhor qualidade onde a cota de sangria correspondia a uma curva de nível.

A cota atual considerada, H_a , foi de 1 a 2 metros inferior a H_x , segundo o tamanho do açude.

A razão VOL2/VOLMAX apresentou média de .99, desvio padrão de 0.084 e a distribuição seguinte (Lei normal)

TABELA 25

Distribuição da razão VOL2/VOLMAX

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	.1	.2	.3	.4	.5
VOL2/VOLMAX	.88	.92	.95	.97	.99

O intervalo de confiança é de 17% , $\pm 11\%$ e $\pm 7\%$ para probabilidades de 95%, 80% e 60%.

9.5 - LEVANTAMENTO COMPLETO

O levantamento completo, exaustivamente apresentado nesse trabalho, leva evidentemente a um erro ainda menor. A dificuldade reside na obtenção da regressão ponderada, a qual permite um sensível aumento da precisão. Na ausência de um programa adequado (GEOPAC ou outro), a solução de substituição consiste em fazer um ajustamento gráfico manual, dando-se maior importância aos pontos altos.

A obtenção dos coeficientes geométricos permite caracterizar a geometria do açude e, também, fornecer uma

relação analítica que facilite a resolução de vários problemas. De maneira geral e tradicional, as relações $S=f(H)$ e $V=f(H)$ são utilizadas na forma de tabela ou de curvas que podem ser suficientes em alguns casos.

10 - CONCLUSÃO

O presente estudo propôs-se apresentar elementos de reflexão sobre a geometria dos pequenos açudes, sua variabilidade e a sua influência sobre o tipo de aproveitamento.

Alguns resultados e conclusões merecem particular destaque:

- 1) A geometria dos reservatórios pode ser descrita com excelente precisão, mediante apenas dois parâmetros característicos: (α) e (K) .
- 2) Embora sejam passíveis de interpretação geométrica, ressaltou-se a variabilidade desses coeficientes, em particular com relação a um possível erro sobre a determinação da cota de fundo.
- 3) Existe uma correlação linear entre (α) e o logaritmo de (K) . O valor médio de α é 2.70. O valor mediano de (K) é 3000.
- 4) O volume do aterro de um açude pode ser estimado por $ATERRO = 1.02 L.H^2$, onde L é o comprimento da parede e H a altura máxima da parede.
- 5) O volume da fundação vale, em média, 17% do volume do aterro.
- 6) A relação média entre o volume de terra do maciço e o volume de água armazenado é:

$$V_{\text{agua}} = 0.077 V_{\text{terra}}^{1.59}$$

Para açudes com volumes inferiores a 120.000 m³, a razão $V_{\text{agua}}/V_{\text{terra}}$ média é 12.

- 7) O custo de um açude pode ser avaliado por:

$$CUSTO(US\$) = 2.18 V_{\text{terra}}(\text{m}^3).$$

- 8) Para uma amostragem de 420 pequenos açudes, calculou-se que o volume médio disponível no açude, depois de 7 meses de estação seca, corresponde a 27% do volume máximo.
- 9) A fórmula $V_x = H_x.S_x/2.70$ permite avaliar o volume de um açude dentro de um intervalo de confiança (proba.95%) de 31%.
- 10) Um levantamento parcial limitado a dois espelhos d'água permite avaliar o par (α, K) e o volume máximo com um intervalo de confiança de 17%.

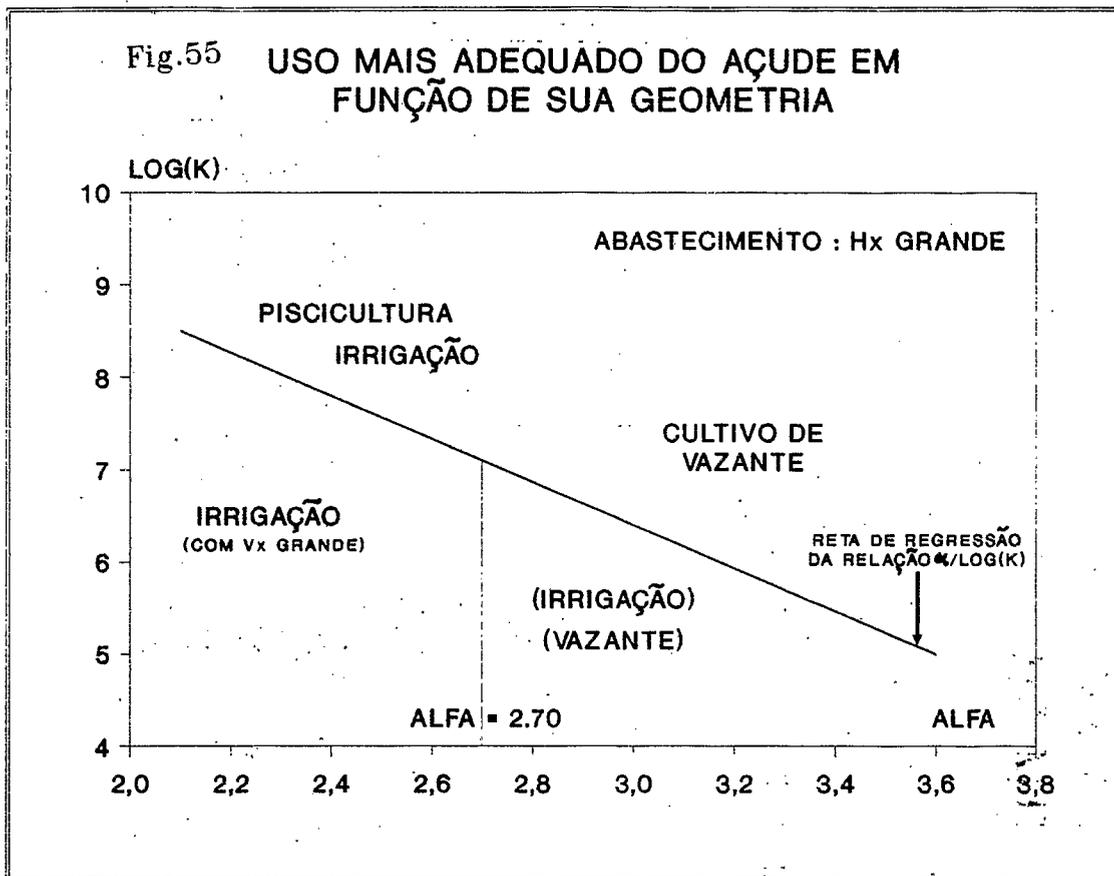
- 11) A precisão sobre o volume máximo, obtida a partir de um levantamento topográfico completo e regressão ponderada é digna de destaque, chegando-se a um intervalo de confiança de 2.5%, o que comprova a grande adequação das funções potência.

A Figura 55 consta a divisão da relação $\text{Log}(K) = f(\alpha)$ encontrada acima, sobre a qual colocamos, à guisa de conclusão, as áreas de maior aptidão para cada uso.

- Para o abastecimento, o fator principal é a profundidade (não intervêm, diretamente, os coeficientes geométricos).
 - Os açudes com valor de α elevado prestam-se melhor ao cultivo de vazante (área alagada extensa, descoberta rapidamente com o rebaixamento das águas).
 - A piscicultura deverá ser desenvolvida de preferência em açudes com valor de α muito baixo (para os quais a superfície do espelho d'água varia pouco).
 - A irrigação requer o maior volume d'água possível e um espelho d'água limitado.
- 12) O volume de um açude pode ser avaliado a partir da sua superfície (obtida na base de fotos aéreas ou de satélite), pelas fórmulas seguintes:

$$V_x = 1.98 S_x^{1.001}$$

$$V_x = -6290 + .425 S_x^{1.147} \quad \text{para } S_x < 20 \text{ ha}$$



Haja vista os esforços envidados no presente estudo para evidenciar correlações entre os coeficientes geométricos, em particular (α), e características simples e observáveis do açude que permitam aprimorar uma fórmula de avaliação do volume armazenado, é duvidoso que se possa chegar (com as amostras atuais) a resultados mais precisos do que os apresentados.

Entretanto, a nível estatístico, é possível que se chegue a definir índices de relêvo, ou geomorfológicos, cabíveis que sejam correlatos a (α). Um tal estudo deveria definir a escala de trabalho correspondente, locar com precisão no mapa os açudes estudados, os quais deverão ser oportunamente distribuídos em áreas correspondentes a valores diferentes do índice previamente definido, e calcular, a partir de levantamentos de reconhecida qualidade, os coeficientes geométricos.

O arquivo de dados já constituído pela SUDENE e apresentado nesse estudo pode servir de ponto de partida para um trabalho dessa natureza. Por sua vez, as inúmeras memórias de projetos acumuladas pelo DNOCS (açudes construídos em regime de cooperação), bem como pelos Estados, muitas vezes, infelizmente, dispersas, inacessíveis e esquecidas nos arquivos, poderiam ser a base de um estudo semelhante e mais detalhado para açudes de maior porte.

11. ANEXOS

11.1 - O PROGRAMA GEOPAC

O Programa GEOPAC foi utilizado para processar os dados das tabelas cota/superfície a fim de obter os valores dos coeficientes (α , K) correspondentes, bem como os erros máximos entre as fórmulas e o levantamento. Esses resultados são obtidos para os três tipos de regressão descritos no texto.

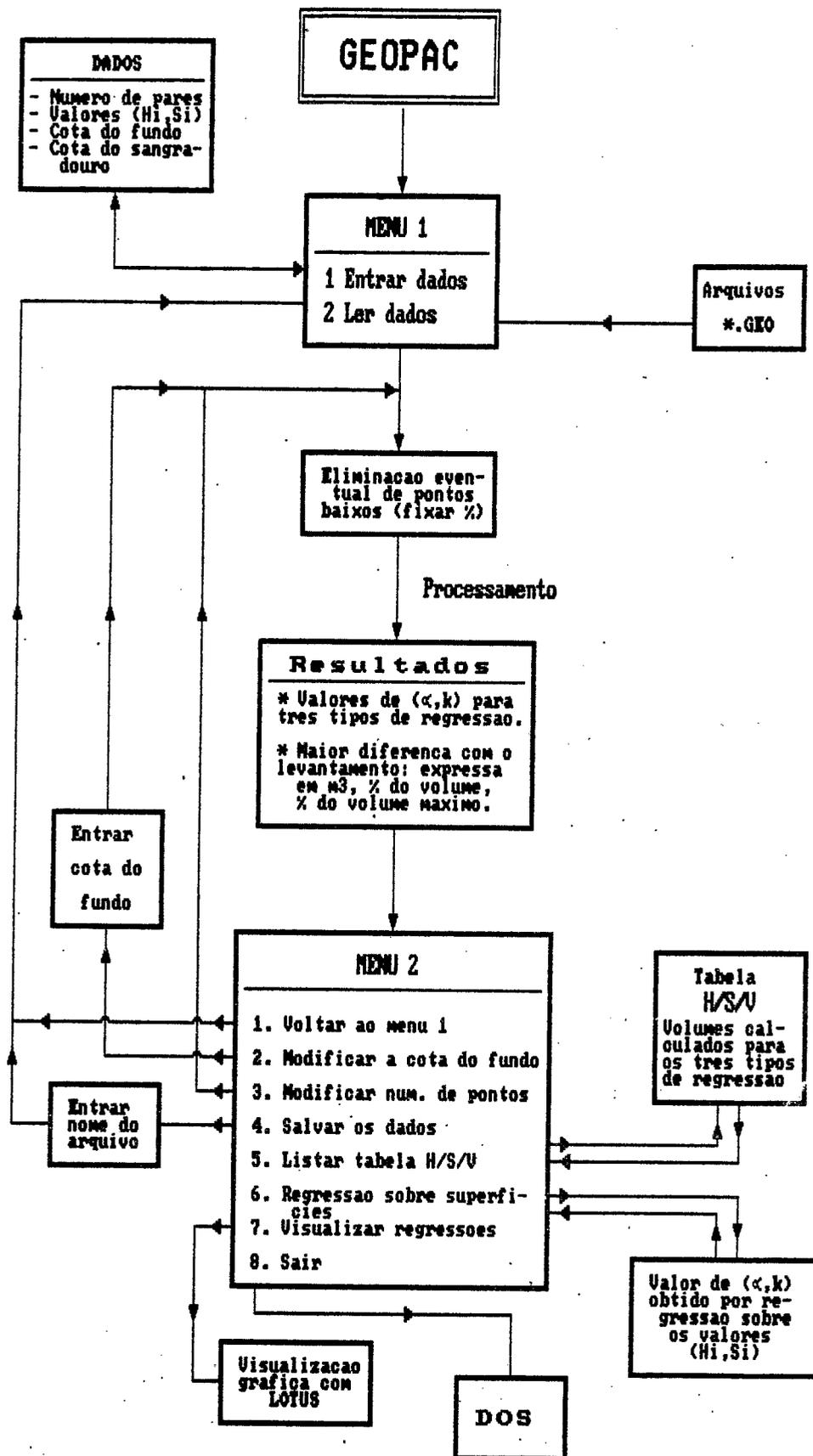
Além disso, o programa GEOPAC permite gravar pequenos arquivos referentes a cada açude com todos os dados da Tabela CSV.

Outras opções permitem, ainda:

- Modificar a cota do fundo.
- Modificar a percentagem de V_x limite abaixo do qual não se consideram os pontos^x (essa percentagem foi considerada igual a 15% na obtenção dos valores ALFA15, ABER15).
- Visualizar as diferentes regressões através dos recursos gráficos do LOTUS.
- Listar a Tabela CSV, bem como os valores dos volumes calculados a partir das fórmulas obtidas com as 3 regressões.
- Efetuar regressões entre os valores de H e S, em vez dos valores de H e V.

O Fluxograma, anexo, resume o funcionamento geral do programa.

Fluxograma do GEOPAC



11.2 - CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS

- Açude equivalente

O açude equivalente é definido a partir do par (α, K) de um açude qualquer, como o volume de revolução que tem a mesma lei cota/volume (ver figura anexa).

Se $z = ar^b$ é a equação da geratriz, o volume para uma altura H é dado por:

$$V = \pi \int_0^H r^2 dz = \pi ab \int_0^H r^{1+b} dr = \frac{\pi ab}{b+2} \frac{H}{a} (b+2)/b$$

Por identificação com a lei $V = K.H^\alpha$ do açude, obtêm-se:

$$\alpha = (b + 2)/b \quad K = \pi ba^{-2/b}/(b+2)$$

$$b = 2/(\alpha - 1) \quad \alpha = (aK/\pi)^{-b/2}$$

- Cone médio

Cone médio é o cone circular (cone de revolução) de mesma profundidade e mesmo volume que o açude.

O volume do cone de revolução é dado por:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \text{tg}^2 \theta_1 \cdot H^3$$

Sendo θ_1 o ângulo de abertura.

A definição do cone médio equivale a escrever:

$V = V_x$ para $H = H_x$, ou seja:

$$V_x = 1/3 \text{tg}^2 \theta_1 \cdot H_x^3$$

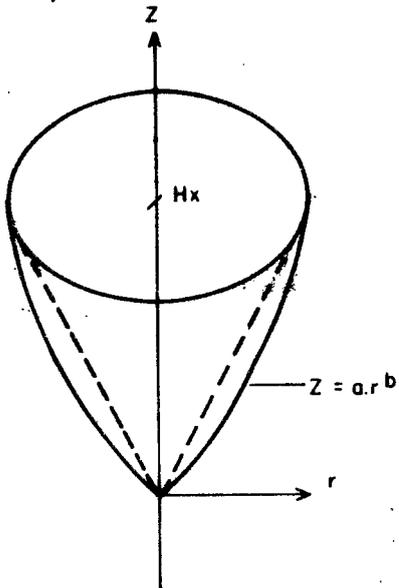
$$\text{tg} \theta_1 = \left(\frac{3 \cdot V_x / H_x^3}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{3K \cdot H_x^{-3}}{\pi} \right)^{1/2}$$

A relação das superfícies do cone médio e do açude é:

$$S_x / S_{\text{cone}} = S_x / \pi H_x^2 \text{tg}^2 \theta_1 = H_x \cdot S_x / 3V_x = \alpha/3$$

CORRESPONDÊNCIAS GEOMÉTRICAS PARA UM AÇUDE DE LEI COTA / VOLUME $V = KH^{\alpha}$

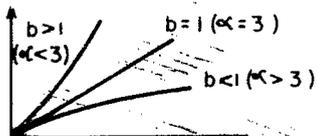
AÇUDE EQUIVALENTE



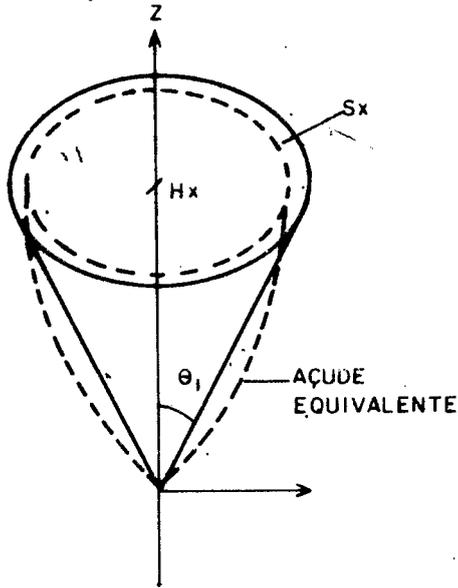
VOLUME DE ROTAÇÃO
DEFINIDO PELA CURVA

$$Z = ar^b$$

DE MESMO VOLUME E
MESMA SUPERFÍCIE QUE
O AÇUDE.



AÇUDE MÉDIO



CONE DE MESMO VOLUME
E MESMA PROFUNDIDADE
QUE O AÇUDE.

$$V_x = \frac{1}{3} \pi \operatorname{tg}^2 \theta_1 H^3$$

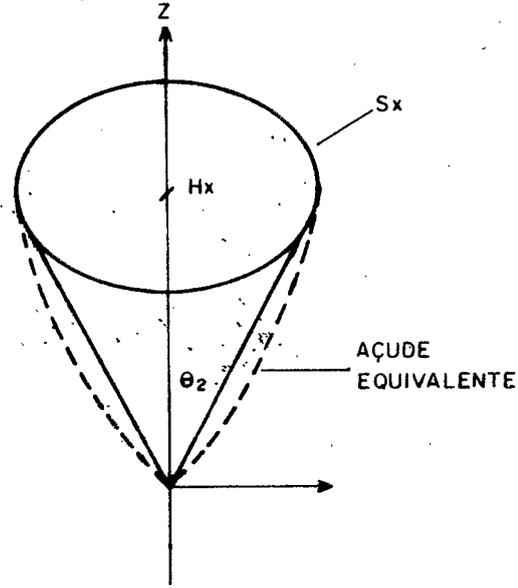
$$\alpha = (b+2)/b \quad \operatorname{tg} \theta_1 = \sqrt{\frac{3}{\pi} \frac{V}{H_x^3}}$$

$$K = \pi b / ((b+2)a^{2/b})$$

$$= \sqrt{\frac{3K}{\pi} H_x^{\alpha-3}}$$

$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = \sqrt{3/\alpha}$$

AÇUDE CORDA



CONE DE MESMA SUPERFÍCIE
E MESMA PROFUNDIDADE
QUE O AÇUDE.

$$S_x = \pi H^2 \operatorname{tg}^2 \theta_2$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \sqrt{\frac{S_x}{\pi H_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{K}{\pi} H_x^{\alpha-2}}$$

- Cone corda

O cone corda é o cone de rotação de mesma profundidade e mesma superfície que o açude (ver figura). A sua geratriz é a corda da geratriz do cone equivalente e sua abertura é definida pelo ângulo θ .

Temos, por definição:

$$\pi R^2 = S_x = \pi H_x^2 \operatorname{tg}^2 \theta_2$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \left(\frac{S_x \cdot H_x^{\alpha-2}}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{\alpha K \cdot H_x^{\alpha-3}}{\pi} \right)^{1/2}$$

A relação entre os volumes do cone corda e do açude é:

$$V_x / V_{\text{cone}} = K \cdot H_x^3 / \frac{1}{3} \cdot H_x \cdot S_x = \frac{3 \cdot K \cdot H_x^3}{\alpha} / K H_x^2 \cdot H_x = \frac{3}{\alpha}$$

- Discussão

Em resumo, o cone médio tem volume e profundidade idênticos aos do açude, mas uma superfície diferente, sendo a sua relação com a superfície do açude $\alpha/3$.

O cone corda tem iguais superfície e profundidade, mas o seu volume difere do volume do açude, sendo a razão dos dois $\alpha/3$.

Os ângulos que definem esses dois cones, ou seja θ_1 e θ_2 , têm uma relação simples entre si.

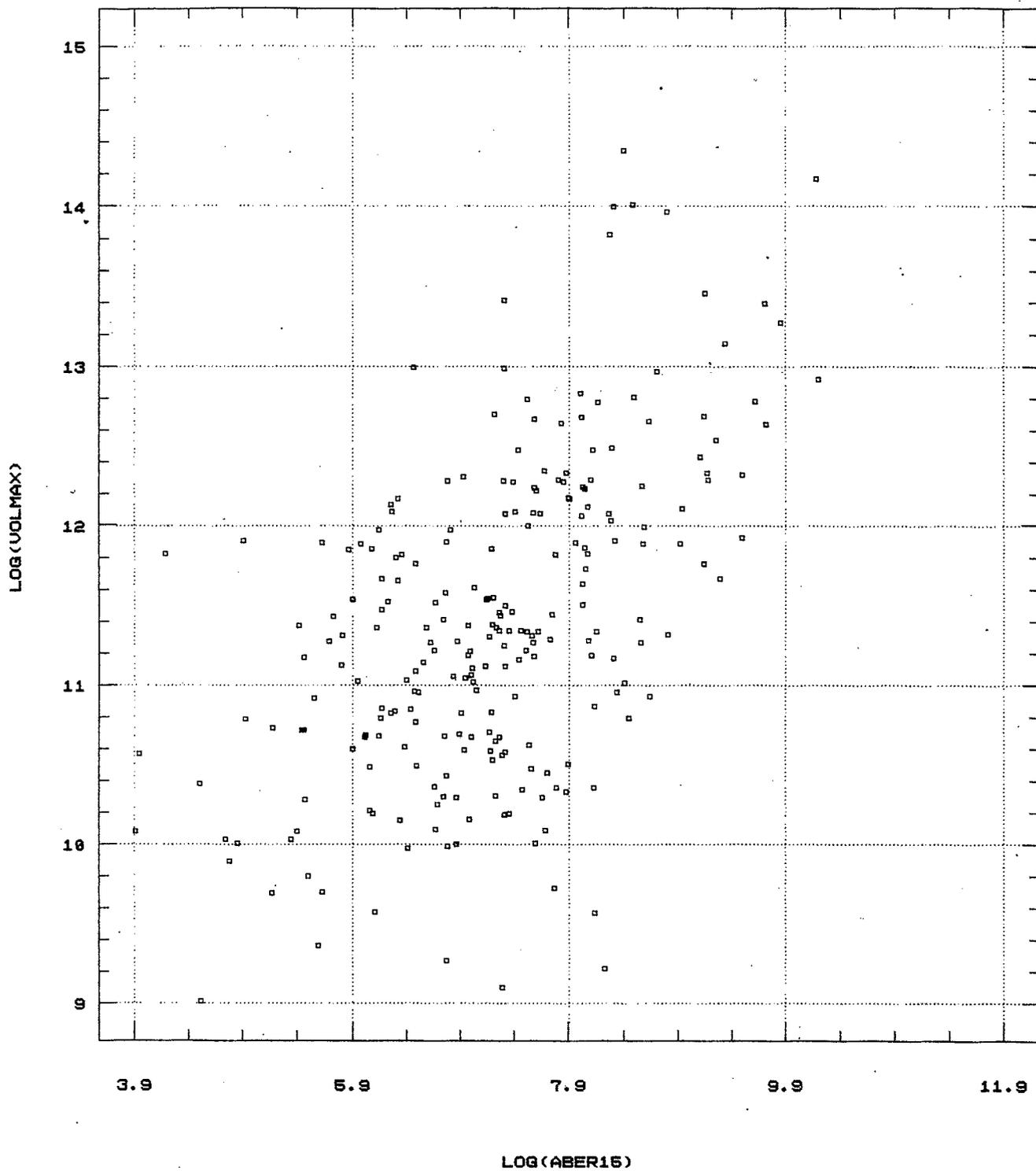
$$\operatorname{tg} \theta_1 / \operatorname{tg} \theta_2 = (3/\alpha)^{.5}$$

Como aparece nos desenhos da figura anexa, o ângulo do cone médio corresponde mais a uma abertura média enquanto o ângulo do cone corda pode se afastar de θ para valores de α extremos.

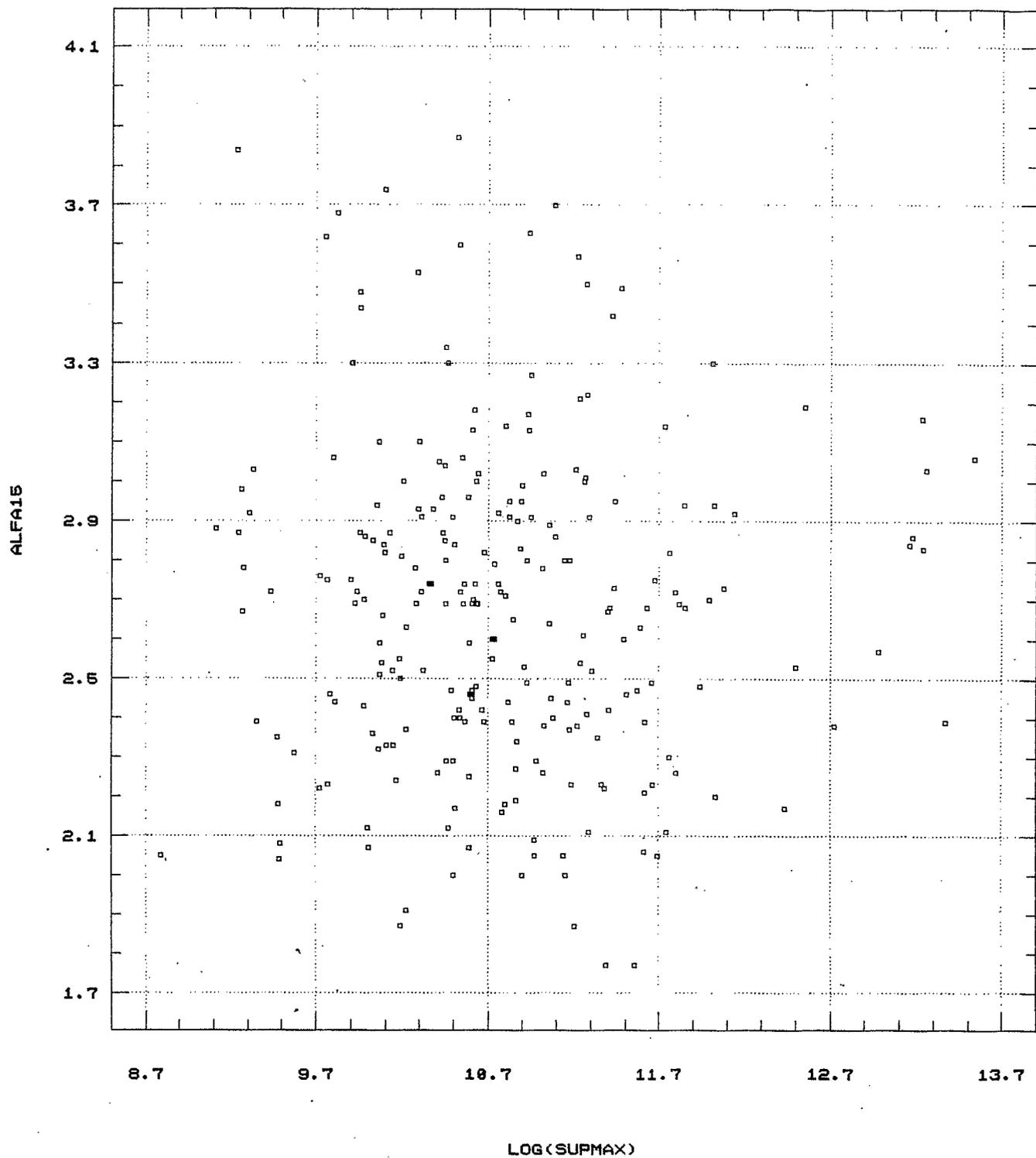
Percebe-se, assim, que a noção de abertura só constitui uma analogia rigorosa para valores de α próximos de 3.

11.3 - GRÁFICOS COMPLEMENTARES

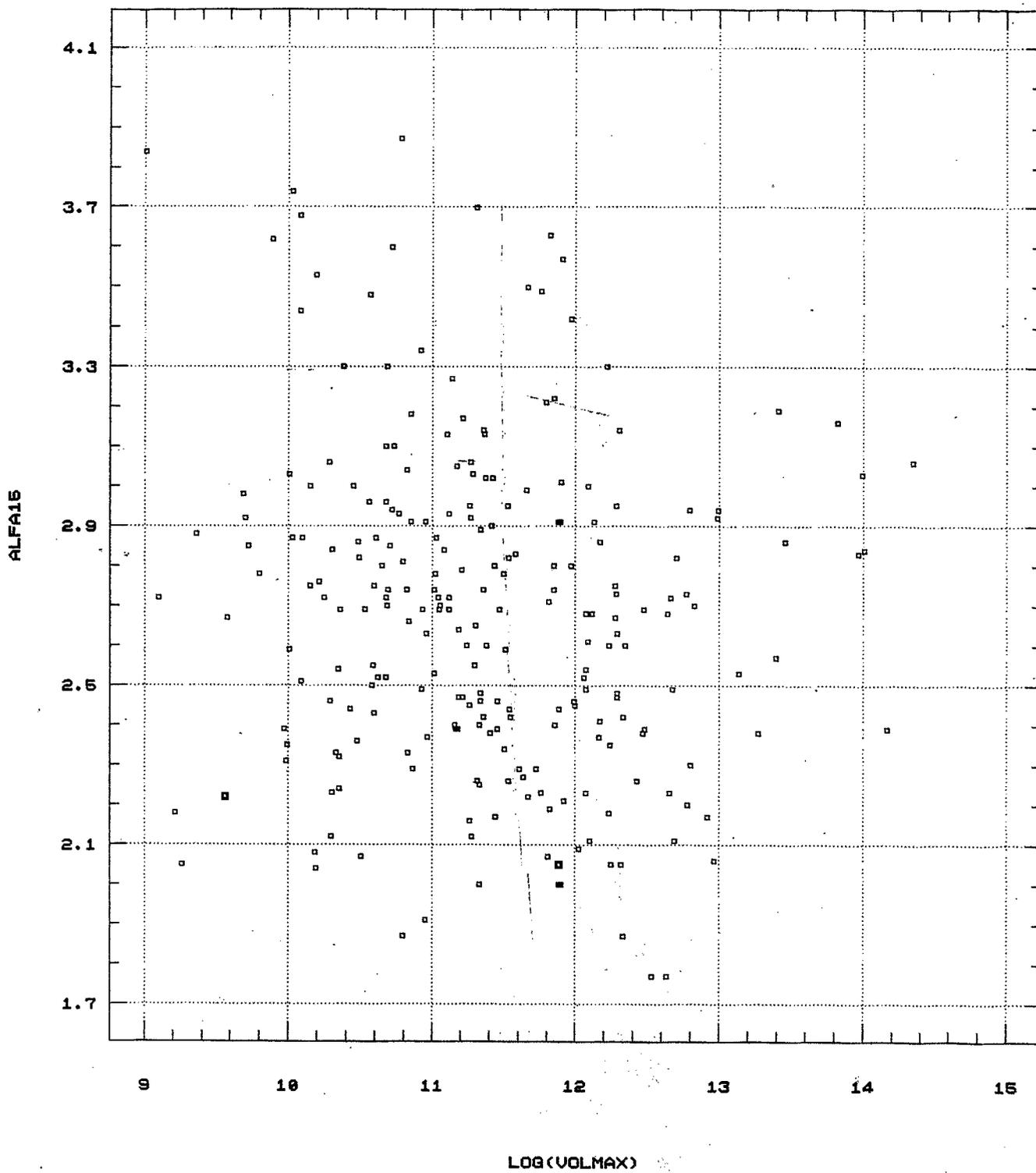
Plot of LOG(VOLMAX) vs LOG(ABER15)



Plot of ALFA15 vs LOG(SUPMAX)

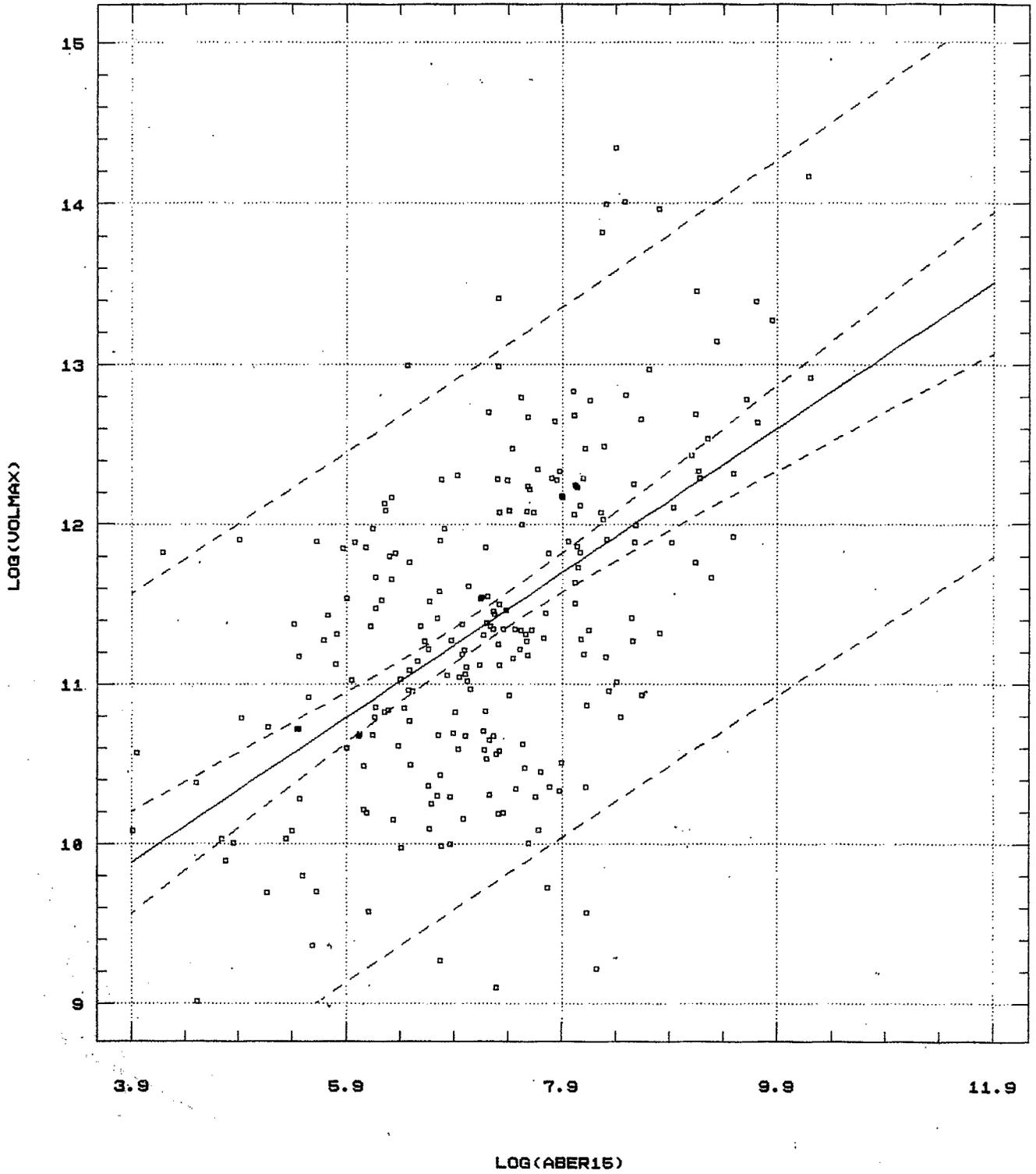


Plot of ALFA15 vs LOG(VOLMAX)

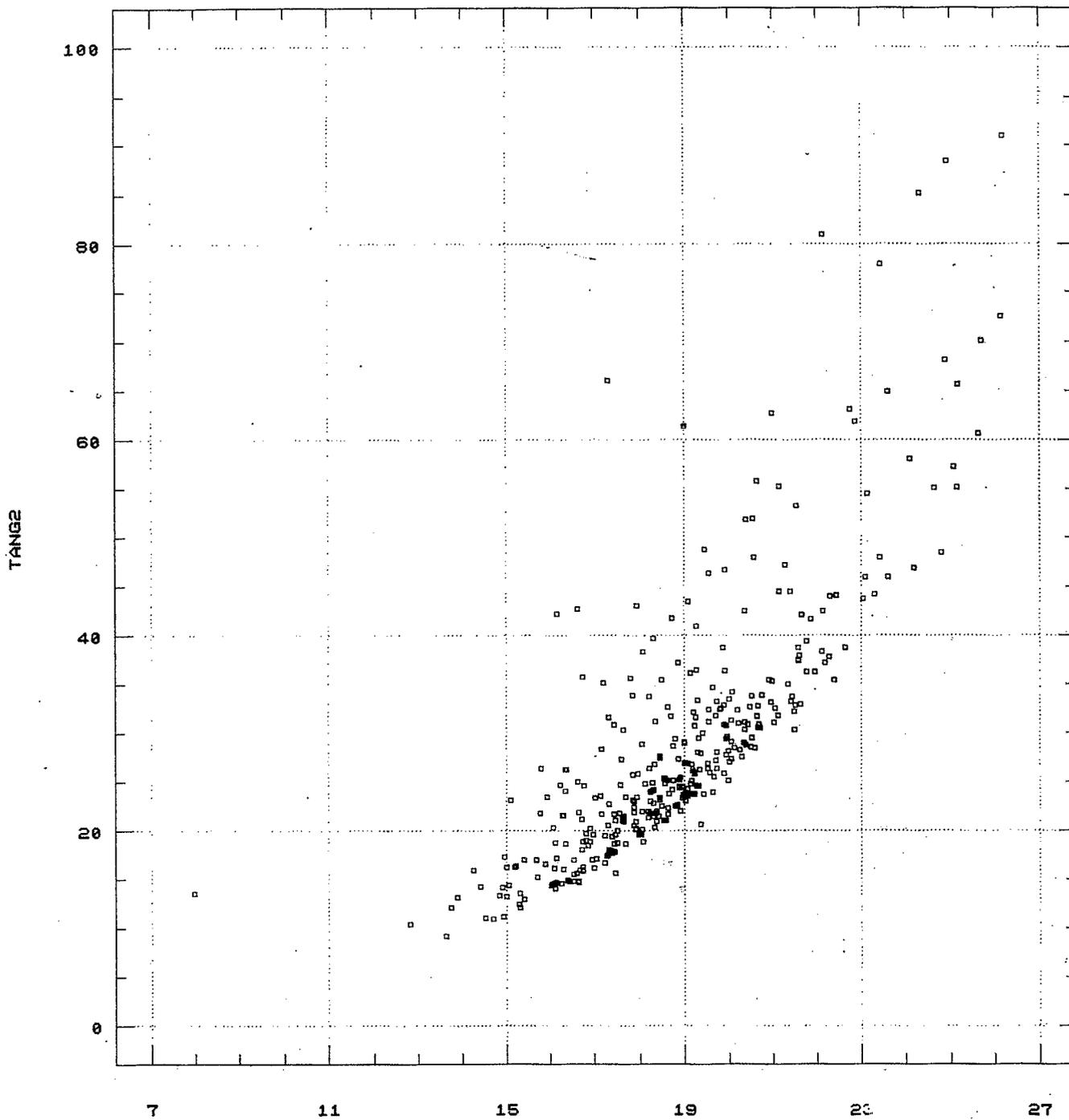


Regression of LOG(VOLMAX) on LOG(ABER15)

$Y = .811 + .45 * X$ $R^2 = .29$



TETA2 vs LOGK15*ALFA15



LOGK15*ALFA15 SELECT ALFA15>0

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

(continua)

Nº	TÍTULO	PÁG.
Fig. 01	Algumas geometrias simples.....	10
Fig. 02	Reservatório piramidal.....	11
Fig. 03	Caracterização geométrica de (K).....	11
Fig. 04	Açude cônico.....	13
Fig. 05	Variação do perfil das encostas.....	13
Fig. 06	Levantamento topo-hidrográfico. Açude São Gonçalo - Catolé do Roacha/PB.....	18
Fig. 07	Cálculo do volume por planimetragem da curva cota/superfície.....	19
Fig. 08	Cálculo dos volumes a partir das profundidades e das superfícies.....	19
Fig. 09	Exemplo de determinação de alfa e (K) por regressão linear sobre os pares (HI,VI).....	20
Fig. 10	Tipos de erro sobre a cota do fundo.....	23
Fig. 11	Variação de (alfa, K) em função do erro sobre a cota do fundo.....	26
Fig. 12	Variação da estimativa de alfa em função do erro sobre a cota do fundo.....	27
Fig. 13	Um açude e sua caixa após construção.....	30
Fig. 14	Variação da geometria. Novo perfil após assoreamento do açude.....	31
Fig. 15	Variação da geometria. Novo perfil após construção do açude.....	31
Fig. 16	Exemplo de determinação de alfa para regressões simples e ponderada.....	33
Fig. 17	Distribuição geográfica de uma amostra de 420 pequenos açudes.....	48
Fig. 18	Inspectoria de Obras Contra as Secas. Açudes particulares - Lago do Mato.....	49
Fig. 19	Distribuição da amostragem em função do tipo do projeto.....	41
Fig. 20	Distribuição da amostragem em função da profundidade (420 açudes).....	41
Fig. 21	Distribuição da amostragem em função da superfície do espelho d'água.....	42
Fig. 22	Distribuição da amostragem em função do volume (420 açudes).....	43
Fig. 23	Distribuição do comprimento da barragem. Amostra de 376 açudes.....	45

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

(continuação)

Nº	TÍTULO	PÁG.
Fig. 25	Distribuição da amostragem em função da largura do sangradouro.....	48
Fig. 26	Distribuição da amostragem em função do tipo de sangradouro.....	48
Fig. 27	Distribuição da amostragem em função da lâmina máxima de projeto.....	49
Fig. 28	Distribuição da amostragem em função da revanche: cota cororamento - cota sangria.....	49
Fig. 29	Distribuição da amostragem em função do número de riachos.....	49
Fig. 30	Distribuição da amostragem em função do número de braços.....	49
Fig. 31	Relação ALFAT/ALFA15.....	57
Fig. 32	Diferença entre o volume real e o ajustamento.....	58
Fig. 33	Distribuição frequencial.....	62
Fig. 34	Distribuição frequencial de (K).....	63
Fig. 35	Relação alfa - LOG(K).....	65
Fig. 36	Relação alfa-LOG(K). 96 barragens do Burkina/Faso.	66
Fig. 37	Relação alfa * LOG(K)/declive médio.....	69
Fig. 38	Média dos coeficientes geométricos (K) e (α) para cada núcleo.....	71
Fig. 39	Distribuição do volume para H = 4 metros.....	75
Fig. 40	Distribuição da superfície para H = 4m.....	75
Fig. 41	Aproximação do volume do maciço.....	76
Fig. 42	Avaliação do volume do aterro em função da altura e do comprimento da barragem.....	77
Fig. 43	Relação Vagua/Vterra.....	79
Fig. 44	Relação volume de terra/volume de água. amostra de 273 açudes.....	81
Fig. 45	Relação Vterra/Vcutoff. 135 açudes do projeto Sertanejo.....	83
Fig. 46	Relação volume máximo/superfície máxima.....	88
Fig. 47	Volume do açude em função de DM*Leito*SX.....	90
Fig. 48	Coefficiente de escoamento anual necessário para encher o açude.....	96
Fig. 49	Relação entre as superfícies das bacias hidráulicas e hidrográficas (156 açudes).....	97
Fig. 50	Razão cheia admissível/cheia centenária. Distribuição para 27 açudes.....	99
Fig. 51	Razão cheia admissível/cheia centenária. Distribuição para 55 açudes com variação da folga.....	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

(Fim da lista de ilustrações)

Nº	TÍTULO	PÁG.
Fig. 52	Razão cheia admissível/cheia centenária. Distribuição para 112 açudes.....	99
Fig. 53	Levantamento de dois espelhos d'água.....	103
Fig. 54	Levantamento simplificado.....	104
Fig. 55	Uso mais adequado do açude em função de sua geometria.....	112
Fig. 56	Fluxograma do GEOPAC.....	116
Fig. 57	Correspondências geométricas para um açude de lei cota/volume $V = KH^2$	118
Fig. 58	LOG(VOLMAX) x LOG(ABER15).....	121
Fig. 59	ALFA15 x LOG(SUPMAX).....	122
Fig. 60	ALFA15 x LOG(VOLMAX).....	123
Fig. 61	LOG(VOLMAX) x LOG(ABER15).....	124
Fig. 62	TETA2 x LOG15*ALFA15.....	125

LISTA DE TABELAS

(continua)

Nº	TÍTULO	PÁG.
TABELA 1	Variações decorrentes de um erro sobre a cota do fundo.....	24
TABELA 2	Variações decorrentes de um erro sobre a cota do fundo Cálculos feitos com primeiro volume parcial corrigido....	25
TABELA 3	Variação decorrente de um erro sobre H_0 para $H_1 = 4m$	28
TABELA 4	Variação decorrente de um erro sobre H_0 para $H_x = 4m$	28
TABELA 5	Distribuição da Amostragem em função da origem.....	36
TABELA 6	Repartição da Amostragem por Estado.....	37
TABELA 7	Distribuição dos projetos por Municípios.....	40
TABELA 8	Valores freqüenciais de H_x , S_x , V_x	40
TABELA 9	Distribuição da profundidade da fundação.....	46
TABELA 10	Relação entre os valores de α obtidos pelos 3 tipos de regressão.....	56
TABELA 11	Diferenças entre valores observados e calculados.....	58
TABELA 12	Médias de α sob várias condições.....	60
TABELA 13	Parâmetros estatísticos da distribuição de α e K	61

LISTA DE TABELAS

(Fim da lista de tabelas)

Nº	TÍTULO	PÁG.
TABELA 14	Intervalo de confiança da média de α segundo o município....	70
TABELA 15	Distribuição da razão CUTOFF/ATERRO.....	78
TABELA 16	Distribuição da razão Vágua/Vterra.....	82
TABELA 17	Distribuição da razão Vágua/Vterra para Vágua < 120000 m ³	82
TABELA 18	Correspondências médias entre V _{terra} /V _{agua} e o custo da obra	85
TABELA 19	Volume sobrando em fim de estação seca (% V _x)(EVINF = 1.70m)	92
TABELA 20	Volume sobrando em fim de estação seca (% V _x)(EVINF = 2.20m)	92
TABELA 21	Valores freqüenciais do volume sobrando em fim de período seco (%V _x).....	92
TABELA 22	Erro na estimativa do volume decorrente de um erro sobre H _o	106
TABELA 23	Erro na estimativa do volume decorrente de um erro sobre H _o (açude de 4 metros).....	107
TABELA 24	Erro na estimativa do volume decorrente de um erro sobre as superfícies.....	107
TABELA 25	Distribuição da razão VOL2/VOLMAX.....	108

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. BAHIA.SEPLANTEC. Acúdes Públicos da Bahia. Salvador, 1985. 286 p.
02. CADIER, E. Dimensionamento de pequenas barragens no Nordeste semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1990 93 p. il. "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
03. _____. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 75 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
04. DNOCS. Roteiro para projeto de pequenos açúdes. ed. ampl., Fortaleza, 1983 , 107 p.
05. DUBREUIL, P. Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans les petits réservoirs d'une région. In: SYMPOSIUM DE GARDA AIHS.. Hydrologie des lacs et des réservoirs, 70. Garda, AIHS, 1966. v. 2. p. 551-59.
06. GILARD, O. Petits barrages en Terre au Burkina-Faso. Montpellier, 1985. CIEH-ENGREF. 140 p.
07. MACÊDO, M.V.A. Características físicas e técnicas dos açúdes públicos do Estado do Ceará. Fortaleza, 1977. 131 p. "Convênio SUDENE/DNOCS - DRN 013/76".
08. MINISTÉRIO DE VIAÇÃO E OBRAS PÚBLICAS/INSPETORIA DE OBRAS CONTRA AS SECAS. Acúdes particulares na 2a. seção (Rio Grande do Norte e Parahyba). Rio de Janeiro, 1912. (Memórias de Açudagem, 17).
09. _____. Acúdes públicos e particulares (Piauí e Ceará). 1912. (Memórias de Açudagem, 22).
10. MOLLE, F. Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. Recife, SUDENE-DPP, 1990. 170p. "Convênio SUDENE/Cooperação Francesa".
11. _____. Nota Técnica 2. Geometria dos açúdes. Recife, SUDENE-DPG/PRN/HME, 1987. 30 p (Publicação interna).
12. _____. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açúdes. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1989. 172p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

13. _____ . Potencialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier, 1985. 142 p.
14. RIBEIRO, R.T. Manejo de água no Nordeste semi-árido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4, Fortaleza, 1981. Anais do..., Fortaleza, ABRH, 1981, v. 23.
15. SUDENE. Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil, Fase I, Recursos hídricos III, Disponibilidades hídricas atuais, T(I/II.II/II), Recife, DRN, 1980, 205p.
16. _____ . Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil, Fase I, Recursos hídricos II, Águas de superfície. Potencialidades, Recife, DRN, 1980, 165p.
17. SUDENE.SERETE. Projeto Sertanejo. Hidrologia, Recife, 1990, Vol. C-1. 67p.

Relação das Publicações editadas da Série:
SUDENE.Hidrologia

01. VIEIRA, Humberto José Pires. Bacia Representativa de Escada; campanha 1975. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1976. 70 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 1) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
02. _____. Bacia Representativa de Escada; campanha 76. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1977. 35p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 2) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
03. PEREIRA, Francisco das Chagas. Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 1976/1977. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1978. 31p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 3) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
04. NOUVELOT, Jean-François, FERREIRA, P.A.S. Bacia Representativa do Riacho do Navio; primeira estimativa dos recursos de água. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1977. 28p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 4) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
05. _____, & PEREIRA, F.C. Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1977. 28p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
06. _____, FERREIRA, P.A.S., CADIER, E. Bacia Representativa do Riacho do Navio; relatório final. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1979. 193p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 6) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
07. MAIA, Breno Valter Batista. Bacia Representativa de Escada; campanha 1977. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1979. 62p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 7). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
08. ZELAQUETT, Gisnaldo José. Bacia Representativa de Ibipeba; relatório de campanha 1977/1978 e complementação do relatório de instalação. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1980. 99p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 8). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
09. GALINDO, Carlos Alberto P. M. Bacia Representativa de Tauá; campanha 78/79. Recife, 1980. 75p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 9). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
10. LINS, Maria José A. Bacia Representativa de Tauá; campanha 79/80. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1981. 60p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 10). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

11. ZELAQUETT, Gisnaldo José. Bacia Representativa de Açú: relatório de instalação e campanha 1978/79/80. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1981. 85p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 11). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
12. LINS, Maria José A. Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 78/79. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1982. 59p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 12). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
13. ASSUNÇÃO, Moisés S. de Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 79/80. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1982. 59p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 13). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
14. CADIER, E.; FREITAS, B.J. Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanha 73/80. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1983. 180p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
15. LEPRUN, J.C.; ASSUNÇÃO, M.S.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1983. 70p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 15). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
16. CADIER, E.; FREITAS, B.J.; LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1983. 87p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 16) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
17. ASSUNÇÃO, M.S. de Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1980/81. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1984. 71p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 17). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
18. CARTER, R.E.; DAVIDIAN, J. Relação cota-descarga em estações fluviométricas (Discharge Ratings at Gaging Stations). U.S. Geological Survey. Tradução de Sylvio Campello. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
19. LINS, M.J.A. Bacia Representativa de Tauá. Relatório de Campanha 1980/82. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1984. 81 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
20. DALRYMPLE, T. Análise de frequência de cheias (Flood - Frequency Analyses) - Tradução Gilberto Falcão. Supervisão Técnica; Sylvio Campello. Recife, SUDENE.DRN. HME, 1984. 87p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 20).

21. CADIER, E. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE.DRN.HME, 1984. 75p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
22. ASSUNÇÃO, M.S. de; LEPRUN, J.C.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Açú, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). Recife, SUDENE.DRN.HME, 1984. 52p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 22). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
23. PUNGS, J. P.; CADIER, E. Manual de utilização dos sistemas BAC e DHM - Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE. Recife, SUDENE.DRN-Coordenadoria de Recursos Hídricos. HME, 1985. 137 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 23).
24. HERBAUD, J.J.M.; MAGALHÃES, F.X. de; CADIER, E.; CAVALCANTE, N.M. da C. Bacia Representativa de Juatama. Relatório Final. Recife, SUDENE.DPG.PRN, 1989. 153p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 24). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
25. MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE.DPG.PRN.HME, 1989. 172p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
26. LARAQUE, Alain. Estudo e previsão da qualidade da água de açudes do Nordeste Semi-árido brasileiro. Recife, SUDENE.DPG.PRN.GT.HME, 1989. 91p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 26). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
27. HERBAUD, J.J.M.; LINS, M.J.A; ASSUNÇÃO, M.S. de & CADIER, E. Bacia Hidrográfica Representativa de Ibipeba. Relatório Final. Recife, SUDENE.DPG.PRN, 1989. 219p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 27). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
28. CAVALCANTE, N.M. da C., DOHERTY, F.R., CADIER, E. Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá. Relatório Final. Recife, SUDENE.DPG.PRN, 1990. 330p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 28). "Convênio SUDENE/ORSTOM".



Flamar Editora Indústria e Comércio Ltda.

Av. Visconde de Suassuna, 440

Santo Amaro - Recife - PE

Fone: (081) 222.2315 / Fax: (081) 221.1962

