

**ESTUDO E PREVISÃO DA QUALIDADE DA
ÁGUA DE AÇUDES DO NORDESTE
SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO**

Série Hidrologia / 26

RECIFE - 1989

MINISTÉRIO DO INTERIOR
SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE

MINISTRO

João Alves Filho

SUPERINTENDENTE

Paulo Ganem Souto

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO GLOBAL

José Luiz Pérez Garrido

DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS NATURAIS

Marcelo José Gonçalves de Barros

GRUPO DE TRABALHO DE HIDROMETEOROLOGIA

Benedito José Zelaquett Seraphim

**SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO GLOBAL
DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS NATURAIS
GRUPO DE TRABALHO DE HIDROMETEOROLOGIA**

**ESTUDO E PREVISÃO DA QUALIDADE
DA ÁGUA DE AÇUDES DO NORDESTE
SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO**

por

Alain Laraque

Pesquisador Convênio SUDENE/ORSTOM

Recife

1989

Série Brasil.SUDENE.Hidrologia, 26.

Trabalho elaborado no âmbito do Convênio SUDENE/ORSTOM.

Laraque, Alain

Estudo e previsão da qualidade da água de açudes do
Nordeste semi-árido brasileiro. Recife, SUDENE/DPG/PRN/
Grupo de Trabalho de Hidrometeorologia, 1989.
95 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 26)

Referências bibliográficas

Convênio: SUDENE/ORSTOM

1. Açudes - Nordeste. 2. Açudes - Qualidade da
água - Nordeste. I.Brasil.SUDENE. ed. II. Série. III.
Título.

CDU 556.56:556.11(812/814)

S U M Á R I O

Página

APRESENTAÇÃO

AGRADECIMENTOS

RESUMO..... 11

INTRODUÇÃO..... 13

1 - PROBLEMÁTICA DA SALINIZAÇÃO DOS PEQUENOS AÇUDES..... 15

1.1 - O problema da salinização dos açudes..... 15

1.2 - Estudos existentes..... 18

2 - METODOLOGIA..... 19

2.1 - Estratégia adotada para o estudo..... 19

2.2 - Principais etapas da metodologia..... 19

2.3 - Descrição dos açudes estudados..... 20

2.4 - Observações de campo..... 23

2.5 - Análises de laboratório..... 25

2.6 - Detalhamento de alguns cálculos específicos..... 26

2.6.1 - Cálculo do estado de saturação da solução em relação a Calcita (CaCO_3) - Utilização do Programa ACTIVE..... 26

2.6.2 - Cálculo do Fator de Concentração (FC)..... 28

2.7 - Programas e logiciais de computação disponíveis..... 29

2.7.1 - O Programa "SISEAU" (Sistema - Água)..... 29

2.7.2 - O Programa Piper..... 30

2.7.3 - Os arquivos "BAS"..... 32

2.7.4 - O Modelo SIMSAL..... 32

3 - RESULTADOS OBTIDOS..... 37

3.1 - Os projetos pilotos de irrigação..... 37

3.1.1 - Caracterização química destes açudes..... 37

3.1.2 - Conclusão sobre os projetos pilotos de irrigação..... 41

3.2 - <u>Os açudes salinizados</u>	43
3.2.1 - Informação disponível.....	44
3.2.2 - Pedologia das bacias hidrográficas.....	45
3.2.3 - Geometria dos açudes.....	45
3.2.4 - Reconcentração no decorrer do tempo.....	45
3.2.5 - Outras características dos açudes salinizados.....	46
3.3 - <u>Estudo mais detalhado de um exemplo</u>	47
3.3.1 - Evolução das concentrações de sais do açude P.4.....	47
3.3.2 - Interpretação das evoluções químicas observadas.....	51
3.3.3 - Recomendações práticas para o açude P4.....	55
3.4 - <u>Simulações do modelo SIMSAL e comentários</u>	56
3.4.1 - Aplicação ao estudo do açude Moquem.....	56
3.4.2 - Comparação com o método clássico.....	58
3.4.3 - Comentários.....	58
3.5 - <u>Correlações entre condutividade elétrica e as diversas concentrações químicas</u>	61
3.5.1 - Seleção e crítica das análises.....	61
3.5.2 - Cálculo das correlações.....	63
3.5.3 - Crítica das correlações.....	69
3.5.4 - Determinação de uma relação regional entre a condutividade elétrica (CE) e a força iônica (I) da solução.....	70
3.6 - <u>Diagrama de PIPER</u>	71
3.7 - <u>Estudo bacteriológico</u>	72
 4 - MÉTODO PRÁTICO DE DETERMINAÇÃO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO DOS AÇUDES	 73
4.1 - <u>Apresentação do método</u>	73
4.2 - <u>Caso de um açude com infiltração e/ou irrigação natural</u>	74
4.3 - <u>Observações</u>	76
4.4 - <u>Exemplo de aplicação prática do método simplificado</u>	76
4.4.1 - Resultados obtidos em um exemplo.....	76
4.4.2 - Conclusões.....	78
 5 - CONCLUSÃO/PERSPECTIVA DE ESTUDO	 79
5.1 - <u>Resultados obtidos</u>	79
5.2 - <u>Estudos e pesquisas que deverão ser desenvolvidas</u>	80

ANEXOS.....	83
ANEXO 1: SUMÁRIO DOS AÇUDES ESTUDADOS.....	85
ANEXO 2: CLASSIFICAÇÃO DOS AÇUDES PERNAMBUCANOS.....	89
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	93

APRESENTAÇÃO

A utilização dos recursos hídricos, armazenados em cerca de 70.000 açudes de pequeno porte existentes no Nordeste Brasileiro, deve se intensificar muito nos próximos anos, função do grande desenvolvimento da irrigação na Região.

É de vital importância, conhecer e controlar os problemas de salinização, que advirão, naturalmente com esse processo.

Neste contexto, convém destacar o trabalho realizado por A. LARAQUE em conjunto com equipes da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE/Diretoria de Planejamento Global - DPG/Departamento de Planejamento de Recursos Naturais - PRN/Grupo de Trabalho de Hidrometeorologia - HME e do Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération - ORSTOM (França).

A SUDENE, juntamente com A. LARAQUE, organizou um dispositivo de monitoramento de qualidade da água, de 30 açudes do Nordeste semi-árido, escolhidos de acordo com a sua representatividade no contexto da distribuição geográfica, grau de salinidade, dados existentes, parâmetros hidrológicos básicos, facilidade e apoio logísticos, ajustando um modelo computacional, que permitiu avaliar a variação da salinização de açudes, sob o efeito da evaporação.

Baseados, nesses estudos teóricos, foram elaboradas normas simples e práticas, as quais permitirão a previsão da evolução da salinidade dos açudes, a partir da condutividade elétrica de suas águas.

JOSÉ LUIZ PÉREZ GARRIDO
Diretor de Planejamento Global

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do convênio assinado entre a SUDENE e o ORSTOM/França, e graças à colaboração das equipes da SUDENE/DPG/PRN (Setores de Bacias Representativas e Manejo de Açudes do HME e Laboratório de Análises Minerais do REM), bem como ao apoio fornecido pelo DPP/RHD e CIN.

O autor agradece a todas as pessoas que participaram ou apoiaram, de alguma forma, este trabalho, referindo-se em particular a:

- responsáveis pela DPG/PRN/HME, isto é, o Dr. Marcelo Barros e o Dr. Benedito José Zelaquett Seraphim, que forneceram um apoio logístico constante.
- Processamento de dados: Paulo Henrique Paes Nascimento, Roberto Doherty e Sinhuée Radjei do Nascimento.
- Análises de laboratório: Dr. Antonio José Figueira Ramos e todos os demais técnicos desse Setor.
- Pedologia: Flávio Hugo Barreto Batista da Silva.
- Tradução e apoio na redação em português: Maria José Cavalcanti; desenho: Edilton Mendes das Mercês; e digitação: Rosana Alves Soares.
- Observadores de campo, que recolheram os dados básicos à elaboração deste trabalho.
- Aos técnicos franceses:
Eric Cadier, Pierre Audry, Jean Claude Leprun, Michel Molinier, Bertrand Millet e Marc Montgaillard do ORSTOM; e François Molle, do Projeto TAPI.

RESUMO

Existem mais de 60.000 açudes no Nordeste Semi-árido, para os quais, se tentou elaborar normas de avaliação e de previsão da qualidade da água e de controle da salinização. Apresentam-se sucessivamente neste relatório: - o dispositivo de medição e de monitoramento, instalado no campo, que integra cerca de 30 açudes; - os modelos e programas de processamento de dados elaborados, acompanhados das considerações teóricas necessárias; - os resultados do ajustamento desses modelos às observações realizadas no campo. Assim, foi possível modelizar e estudar os processos de reconcentração e precipitação dos sais nos açudes submetidos à evaporação, e elaborar algumas normas simples, permitindo prever a evolução da salinização dos açudes.

INTRODUÇÃO

O Nordeste semi-árido brasileiro possui milhares de pequenos reservatórios, denominados açudes.

Face aos poucos estudos específicos realizados sobre a qualidade das águas dos açudes e à importância dos mesmos para a valorização de terras para a irrigação, tornou-se urgente abordar esta questão, a fim de controlar os riscos de salinização futura dos açudes e das zonas irrigadas.

O ponto de apoio, desde 1987, para o desenvolvimento do presente trabalho é o monitoramento da qualidade da água, de aproximadamente trinta açudes. Esses açudes, geralmente utilizados para irrigação, estão distribuídos na zona semi-árida.

Tratar-se-ia, pois, de estudar simultaneamente as características químicas das águas dos reservatórios e de suas bacias de alimentação, para:

- Tentar compreender o funcionamento desses sistemas e descrever a evolução hidroquímica dos açudes e, em particular, a reconcentração dos sais durante a estação seca.
- Sugerir algumas regras práticas de manejo das águas, para evitar sua degradação qualitativa.
- Apresentar perspectivas de trabalho visando melhorar o conhecimento dos problemas de salinização.

Com efeito, negligenciando-se os problemas de salinização, corre-se o risco de provocar um grande número de perdas irreversíveis de terras férteis, após alguns anos de utilização sem controle. Este problema acentua-se cada vez mais com o crescimento rápido do número de açudes utilizados para irrigação, como foi constatado nestes últimos anos.

A presente nota, expõe os primeiros resultados obtidos com o estudo da qualidade das águas dos pequenos açudes do Nordeste brasileiro.

Tentaremos responder às seguintes perguntas:

- quais são as rochas e os solos que provocam a salinização das águas que os percorrem?
- quais são os sais mais comuns nas águas dos açudes?
- qual é a evolução das concentrações químicas durante o ano?

Para isso, definiremos as seguintes linhas de ação:

- a) Aproveitar, ao máximo, os resultados já existentes, tanto no Brasil, como no estrangeiro.
- b) Medir, no campo, as variações da quantidade de sal contida nas águas de determinado número de açudes durante a estação seca (concentração decorrente da evaporação) e úmida (entradas de água e de sal). Esses açudes, são escolhidos para representar situações características em termos de geoquímica da bacia de alimentação, forma do reservatório, tipo de utilização, etc.
- c) Com a ajuda de um modelo de simulação hidroquímico, utilizar esses resultados de campo, a fim de poder prever a quantidade de sais e a evolução das concentrações salinas, em alguns casos simples e, assim, definir as normas de utilização.

Enfim, é necessário frisar que, o presente estudo desenvolveu-se, principalmente, na parte cristalina do semi-árido nordestino, cujo substratum impermeável é geralmente impróprio para a exploração de recursos hídricos subterrâneos, mas permite o armazenamento do escoamento superficial, nos açudes.

1 - PROBLEMÁTICA DA SALINIZAÇÃO DOS PEQUENOS AÇUDES

1.1 - O problema da salinização dos perímetros irrigados

A água de irrigação leva os sais dissolvidos para os perímetros irrigados (Fig. 1). Dependendo da concentração em sais dessas águas e das características dos solos dos perímetros, podem-se temer os riscos de salinização.

Tal salinização pode provocar:

- uma queda do rendimento das culturas irrigadas, por causa da elevação da pressão osmótica, ou pelo efeito tóxico de certos ions sobre os tecidos vegetais;
- uma diminuição da permeabilidade dos solos, pela defloculação das argilas, acima de uma certa taxa de saturação de sódio trocável.

Os perímetros afetados por esse segundo processo de sodização, são quase sempre irre recuperáveis, pois a própria impermeabilização do solo, impede o desenvolvimento das culturas e a sua recuperação, por lavagem ou lixiviação.

O Organograma 1, esquematiza as principais consequências provocadas pelo excesso de sais nos solos.

No Nordeste, a alternância entre estação úmida e estação seca, leva a uma sucessão de fenômenos de diluição e concentração de sais nas águas dos açudes. Durante a estação seca, a concentração de sais dissolvidos aumenta, enquanto as necessidades em água para irrigação são mais urgentes, justamente quando a reserva de água é menor e os teores de sais mais elevados.

Dentro deste quadro, o presente trabalho limitar-se-á ao estudo da qualidade das águas dos açudes e de suas variações no decorrer do ano.

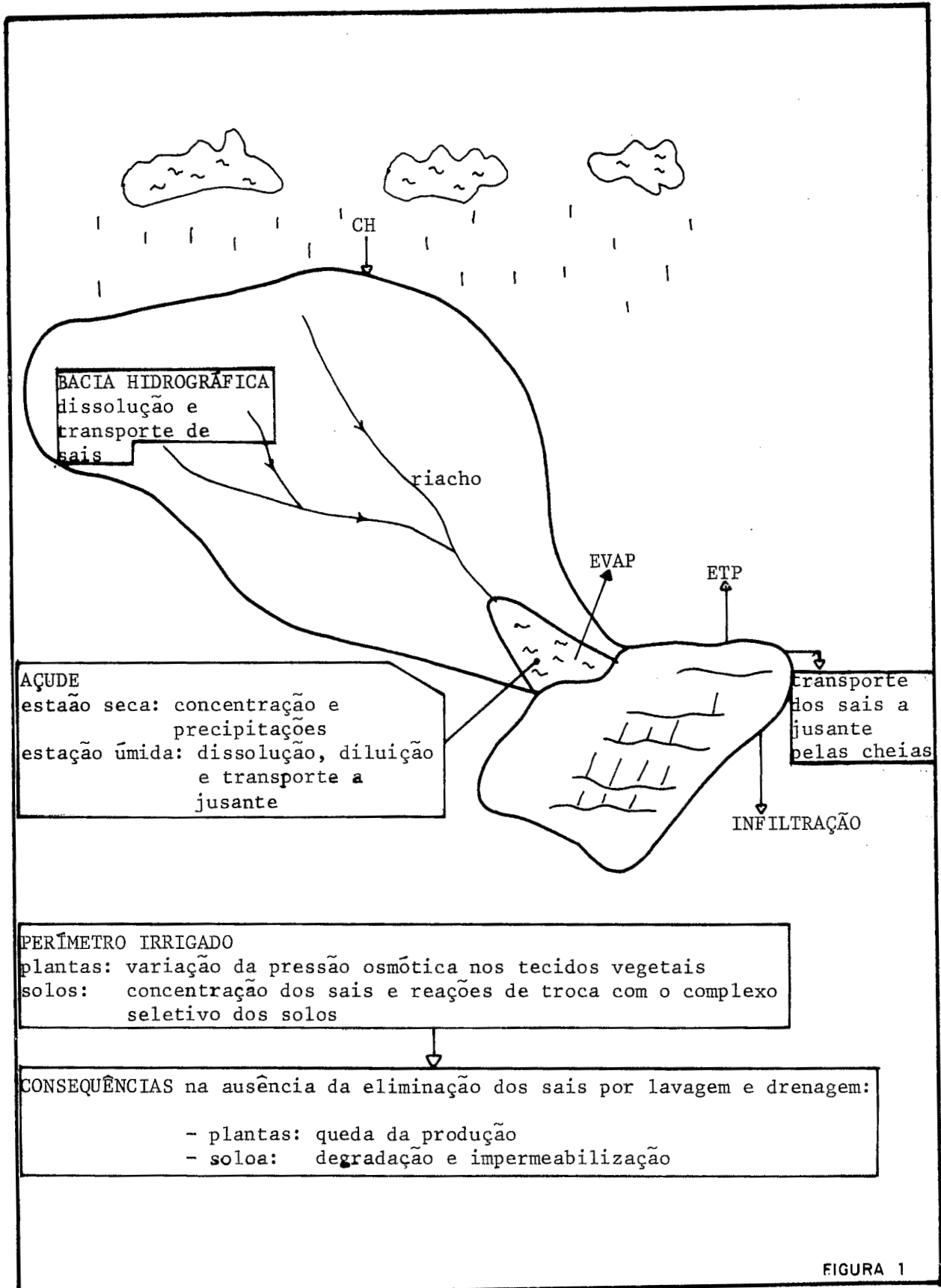
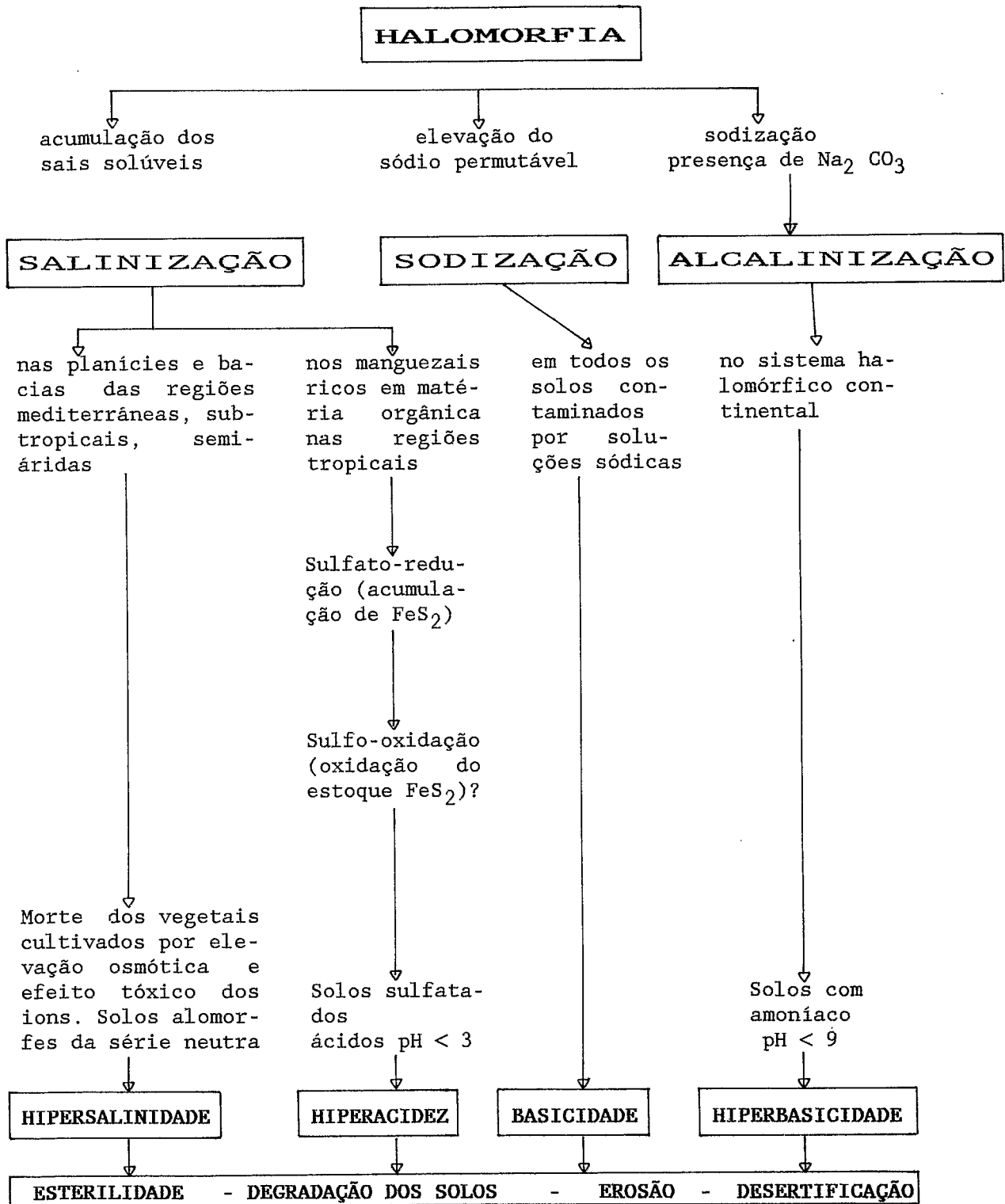


Figura 1 - Processos de salinização no semi-árido

ORGANOGRAMA 1

Tipos de Contaminação dos solos por águas salinizadas



FONTE: SERVAT, (1985)

1.2 - Estudos existentes

Poucos estudos, até o presente momento, foram consagrados à qualidade das águas superficiais dos pequenos reservatórios do Nordeste.

Assinalamos o importante trabalho de síntese efetuado por LEPRUN (1983), fundamentado em 364 análises de água do Nordeste, e que:

- classificou os solos do Nordeste, de acordo com seu grau de incidência na salinização das águas escoadas;
- estabeleceu, para as águas do Nordeste, uma primeira relação entre "a razão de adsorção de sódio" (SAR)¹ e a condutividade elétrica (CE), seja:

$$SAR = 0,036 (CE)^{0,608}$$

- determinou diversas relações entre a condutividade elétrica e diversas concentrações iônicas: resíduo seco, Na, Cl...
- mostrou que, o risco de salinidade conferido às concentrações em sais dissolvidos é maior do que o risco conferido ao sódio;
- aconselhou não utilizar para irrigação, na maior parte dos solos do Nordeste (exceto os Latossolos e areias quartzosas muito permeáveis), águas de classe superior a C₂S₂, isto é, águas que tenham CE > 750 mhos/cm, SAR > 2,05 e resíduo seco > 510 mg/l.

Assinalamos também, a interessante tese de Maria Marlúcia Freitas Santiago, baseada, principalmente, no estudo isotópico das águas de dois açudes do Estado do Ceará. É preciso lembrar que, o método isotópico permite determinar qual é a parte da água que se infiltra, e a parte que se evapora, com uma boa precisão. Pode-se então, efetuar o balanço volumétrico e hidroquímico de um açude que evapora durante a estação seca.

¹ - O SAR é definido pela fórmula:

$$SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})/2}$$

2 - METODOLOGIA

2.1 - Estratégia adotada para o estudo

A zona cristalina semi-árida cobre mais de 500.000 Km² e contém várias dezenas de milhares de açudes.

Evidentemente, é impossível resolver, nessa fase inicial, todos os problemas ligados à qualidade da água dos pequenos açudes, de uma zona tão vasta. Limita-mo-nos, portanto, ao estudo de alguns casos escolhidos de acordo com critérios de representatividade (extensão geográfica, tipo mais comum de açude...) e de gravidade dos problemas de salinização.

Foram realizados o acompanhamento de um total de 33 açudes, disseminados na zona semi-árida dos Estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará.

Foram realizados estudos, de forma mais detalhada, alguns casos que parecem mais simples e interessantes, para os quais está previsto ajustar e explorar o modelo de simulação SIMSAL, descrito mais adiante.

2.2 - Principais etapas da metodologia

Para atingir o objetivo fixado, é necessário cumprir as seguintes etapas:

- Estabelecer as relações entre a química dos solos e das rochas da Bacia Hidrográfica e a hidroquímica de certo número de açudes, escolhidos por sua representatividade.
- Determinar as principais reações químicas, que intervêm no açude, no decorrer do ano, tais como:
 - . concentração e precipitação de sais em período seco, sob a influência da evaporação;
 - . dissolução e diluição em período úmido (interação com os sedimentos do açude).
- Evidenciar as relações quantitativas, e qualitativas existentes entre a salinidade, a condutividade elétrica (CE), o volume do açude e a natureza da bacia (2 açudes idênticos em termos de forma e de volume da represa, com bacias de alimentação de mesma superfície, mas cobertas com solos diferentes, terão, geralmente, salinidades distintas).

- Criar ou adaptar um modelo de simulação determinista, que permita reproduzir a evolução, no tempo, da qualidade das águas dos açudes, em função das perdas de água dos reservatórios (evaporação e infiltração), e das contribuições das chuvas e da bacia (escoamentos). Este modelo será ajustado às diversas bacias, com diferentes solos.
- Elaborar normas que visem melhorar o manejo das águas para irrigação, levando-se em conta o aspecto qualitativo das águas.

2.3 - Descrição dos açudes estudados

Os açudes estudados podem ser classificados em quatro categorias, que correspondem a tipos de operação e/ou tipo de coleta de dados e/ou localizações diferentes: (Ver Tabela 1, Anexo 1 e Figura 2).

a) Projetos Pilotos

São nove, os açudes cujo manejo é acompanhado pela equipe da SUDENE, a qual assegura um monitoramento da quantidade e qualidade da água estocada e utilizada, do manejo da irrigação e da produção agrícola dos perímetros irrigados.

b) Açudes da região de João Câmara - São João do Potengi(RN)

Estão sendo estudados cinco açudes, representativos dos principais tipos existentes numa microregião escolhida pelo Banco Mundial, a fim de testar as diversas possibilidades de valorização de suas águas.

Eles não são ainda utilizados para irrigação e o monitoramento limita-se, por enquanto, aos termos do balanço hídrico e químico.

c) Açudes da rede "Bacias Hidrográficas Representativas (BHR)" da SUDENE

Assegura-se o monitoramento dos termos do balanço hídrico e químico, de 14 açudes, situados nas Bacias Hidrográficas de SUMÉ(PB) e TAUÁ(CE).

d) Açudes salinizados

Tendo sido constatado que, nenhum dos açudes mencionados acima, apresentava graves problemas de salinização, resolveu-se então, estudar açudes caracterizados por altos teores de sais em suas águas.

TABELA 1

Relação dos açudes monitorados mensalmente
para o estudo da qualidade das águas

CATEGORIA DE AÇUDES	NÚMERO DE AÇUDES	AÇUDES COM MONITORAMENTO COMPLETO	LOCALIZAÇÃO POR ESTADO *	INÍCIO DAS AMOSTRAGENS
Projetos Pilotos de Irrigação	9	7	PE, PB, RN	novembro/86
Açudes salgados	5 selecionados dentro de 18 açudes visitados	3	PE	agosto/87
Açudes das BHR SUDENE/ ORSTOM)	14	8	PB, CE	fevereiro/ 87 para 5 fevereiro/ 88 para 9
Projetos Banco Mundial	5	0	RN	abril/87
TOTAL	33	18		

* PE = Pernambuco; RN = Rio Grande do Norte; PB = Paraíba; CE = Ceará

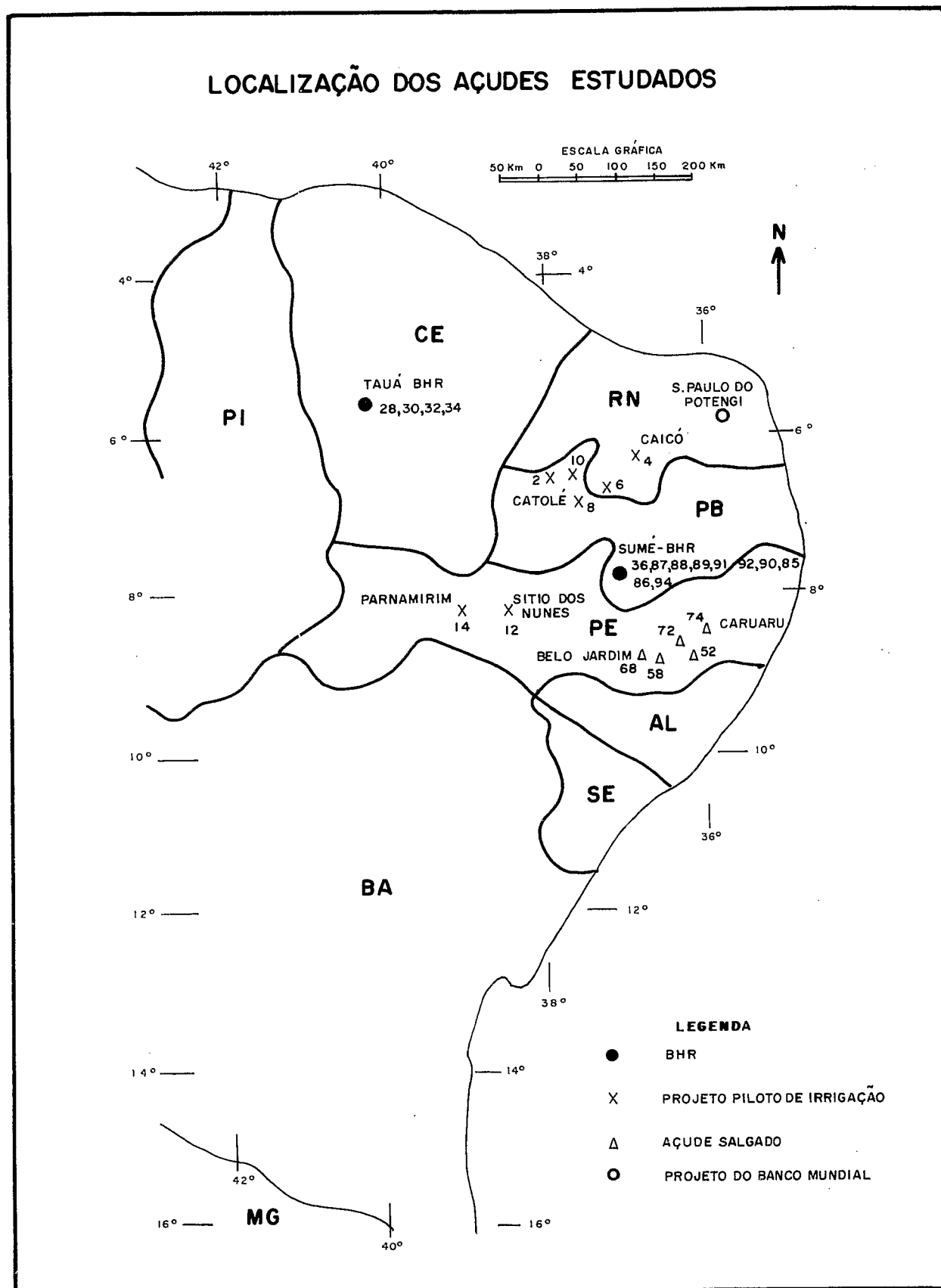


Figura 2 - Localização dos açudes estudados

Foi efetuado, em agosto de 1987, um levantamento preliminar de 18 açudes, em zonas notoriamente salinizadas do Agreste e do Sertão Pernambucano (Ver Anexo 2), dos quais 5, foram finalmente escolhidos para um monitoramento prolongado. Seus comportamentos serão analisados neste estudo.

A Tabela 2, indica os 12 açudes que foram, finalmente, selecionados para apresentação dos resultados no presente trabalho.

Atualmente, somente os açudes dos projetos pilotos de irrigação possuem dados de um ciclo hidrológico completo. Os dados incompletos, dos outros açudes, serão, então, analisados de forma indicativa e provisória.

2.4 - Observações de campo

Cada açude estudado está assim equipado:

- 1 jogo de réguas linimétricas;
- 1 pluviômetro ou pluviógrafo;
- 1 hidrômetro (sobre alguns projetos pilotos de irrigação).

Para cada conjunto "bacia-açude", realizaram-se, no campo, as seguintes tarefas:

- leitura pluviométrica diária;
- coletas mensais de amostras de água dos açudes e medições, no campo, da condutividade elétrica, da temperatura e do pH;
- leitura do nível do açude (semanal no período seco e diária no período de chuvas);
- medição das variações "in situ" da temperatura, pH e condutividade, para diferentes profundidades dos açudes;
- elaboração de mapas pedológicos detalhados da Bacia Hidrográfica, na escala de 1/10.000 ou 1/20.000;
- coleta de amostras dos sedimentos do açude, dos solos e rochas da Bacia Hidrográfica, para análise físico-química;
- pesquisas e observações, no campo, a fim de avaliar com maior precisão, a importância dos diferentes fatores que influenciam a qualidade das águas, e prever, embora de forma muito subjetiva, a futura evolução qualitativa das águas, após a construção dos açudes.

Desde o início de 1987 até 1988, cerca de 250 amostragens de água foram coletadas e analisadas, totalizando mais de 3500 determinações físico-químicas diversas.

TABELA 2

Características geomorfológicas dos açudes
selecionados para o presente estudo

Nº AÇUDES	PROFUNDI- DADE MÁX. (em m)	VOLUME MÁXIMO (em m³) 1	SUPERFÍ- CIE MÁX. (m²) 2	PROFUN- DIDADE MÉDIA (m)	K	α	IDADE (anos)	SUPERFICIE DA BACIA HIDROGRÁFICA (ha)	PEDOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA
P2	4,52	128.000	96.000	1,33	740	3,4	8	234,8	Solo Podzólico Eutrófico + Regossolo
P4	4,75	447.240	254.000	1,76	9090	2,54	61	257,8	Afloramentos graníticos Brunos nao Cálcicos + Aluviões
P6	5,54	68.750	36.400	1,89	1132	2,55	10	340	Solos Litólicos Eutróficos + Afloramentos
P P8	3,8	27.900	12.520	2,23	1327	2,27	8	40,8	Solos Litólicos + Podzólicos Eutróficos
P P12	3,63	14.400	10.600	1,36	403	2,79	10	58,8	Litólicos + Regossolos
I P14	7,09	111.000	58.500	1,9	73	3,74	7	?	Brunos nao Cálcicos + Regos- solos
P16	?	?	130.000	?	?	?	?	329,6	?
P17	?	?	100.000	?	?	?	?	422,4	?
P52	<2	?	10.000	?	?	?	?	?	Podzólicos Eutróficos
P68	2,48	109.400	87.300	1,25	18.278	1,97	30	extensa	Planossolos Sódicos + Regos- solos
A P72	3,01	9.653	9.455	1,02	374	2,95	12	?	Planossolos Sódicos + BNC + Litólicos + Regossolos + Afloramentos
S P74	5,42	30.572	15.548	1,96	322	2,7	80	?	Planossolos Sódicos + Brunos nao Cálcicos

NOTA: K = Coeficiente de abertura do açude

α = Coeficiente de forma do açude

BNC = Bruno não Cálcico

PPI = Projetos Pilotos de Irrigação

AS = Açudes salgados

2.5 - Análises de laboratório

O Laboratório da SUDENE efetuou, em fase de rotina, as análises seguintes:

- análise das amostras de água (análises físico-químicas mensais e análises bacteriológicas trimestrais);
- análise das amostras de solos da bacia hidrográfica (análise físico-química);
- análise química do substrato rochoso e teste de ataque por uma solução-padrão de HCl (para identificar "as bases liberáveis");
- análise nos Raios X dos sedimentos e amostras de solos, para determinar as argilas e os sais presentes (laboratório da UFPE, do ORSTOM, e da Universidade de Strasbourg/França).

As primeiras análises de água foram efetuadas em novembro de 1986, e a frequência das medições de rotina só atingiu um nível constante, em março-abril de 1987.

As dosagens químicas foram efetuadas como segue:

Para os anions:

SO_4^{--} por turbimetria do BaSO_4 (dosagem volumétrica)

Cl^- por precipitação, por intermédio de nitrato de prata (dosagem volumétrica).

HCO_3^- , CO_3^{--} por dosagem com H_2SO_4 , para viragem da fenolftaleína e do metilorange.

Para os cations:

Ca^{++} , Mg^{++} , Pela titulação com solução de EDTA^{2-} 0,02N

Na^+ , K^+ , por fotometria de chama.

² - O complexo EDTA é um indicador para determinar diretamente $\text{Ca} + \text{Mg}$.

2.6- Detalhamento de alguns cálculos específicos

2.6.1 - Cálculo do estado de saturação da solução, em relação à Calcita (CaCO_3) - Utilização do programa ACTIVE

Esse estado de saturação verifica-se, comparando-se o produto das atividades $QC = [\text{Ca}^{++}] \times [\text{CO}_3^{--}]$, ao produto de solubilidade da calcita (K_s), seja:

$$K_s = [\text{Ca}^{++}] \times [\text{CO}_3^{--}] / [\text{CaCO}_3^0] = 4,266 \cdot 10^{-9} \quad \text{com } 25^\circ\text{C (HELGESON, 1969)}$$

no equilíbrio, com $[\text{CaCO}_3] = 1$, porque trata-se de uma espécie neutra.

K_s é uma constante termodinâmica, que depende da temperatura e da pressão.

se $QC = K_s$ a solução está equilibrada com a calcita;

se $QC > K_s$ a solução está supersaturada, o mineral vai precipitar;

se $QC < K_s$ a solução está subsaturada, o mineral pode se dissolver

O problema consiste em calcular as atividades de $[\text{Ca}^{++}]$, $[\text{CO}_3^{--}]$.

Os resultados da análise química, fornecidos pelo laboratório, representam as concentrações totais de cada elemento, isto é, a soma das diversas formas, livres ou complexas, do elemento.

Assim, para o cálcio, temos a seguinte fórmula:

$$\text{Ca total} = \underset{\text{ion livre}}{(\text{Ca}^{++})} + \underset{\text{espécies complexas}}{(\text{Ca HCO}_3^+)} + (\text{CaCO}_3^-) + (\text{CaSO}_4^-) + \dots$$

os parênteses designam as molalidades das diferentes espécies e os $[]$ representam as atividades iônicas.

Ora, são as quantidades de ions livres, que regulam os equilíbrios entre fase sólida e fase líquida.

Sabe-se que, a atividade $[a]$ e a molalidade (m) , de uma espécie, está ligada pela relação:

$$[a] = \gamma \cdot (m)$$

Com γ coeficiente de atividade da espécie, calculada pela lei de DEBYE-HUCKEL. Nessa expressão, aparece a força iônica I, da solução estudada.

$$\text{onde } I = 1/2 \sum m_i \cdot Z_i^2$$

m_i e Z_i = molalidades e valências de todas as espécies não neutras.

A determinação dessas molalidades " m_i " necessita primeiramente do cálculo da distribuição das espécies totais em pares de íons e íons livres. Porém, o cálculo dessa distribuição supõe o conhecimento dos coeficientes de atividade.

Esse cálculo, aparentemente insolúvel, pode ser resolvido por uma série de iterações convergentes, a partir de um valor inicial arbitrário da força iônica. Isto é realizado pelo programa ACTIVE de M. Rieu (1984) que utilizamos. Para uma descrição detalhada do programa dos algoritmos utilizados, ver M. Rieu (1987). Esse programa, funciona para forças iônicas inferiores a 0,1 e calcula a redistribuição das concentrações das principais espécies químicas.

Os dados de entrada são as concentrações totais iniciais resultantes das análises de laboratório, dos 6 principais íons:

K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} e do pH ou pCO_2

Quando não temos séries completas de pH locais, usamos como dado de entrada, para calcular o pH da água, a pressão parcial em CO_2 , ou seja, $pCO_2 = 10^{-3,5}$, isto é, a média atmosférica mundial. Esta hipótese, válida para um sistema aberto, considera que, a pCO_2 dissolvida do açude se reequilibra constantemente com a pCO_2 atmosférica.

Isso pode provocar águas supersaturadas em $CaCO_3$, sem que hajam, obrigatoriamente, precipitações de calcita. Mas, na realidade, não é exatamente assim, e as águas dos açudes apresentam, em geral, uma pCO_2 maior, provavelmente, devido a atividades orgânicas.

Por isso, é muito importante ter um pH medido no campo, que permita, por um sistema de iterações sobre os equilíbrios carbonatados, calcular a pCO_2 real da água e daí, considerando essa pressão constante, podermos avaliar a evolução do pH na evaporação.

2.6.2 - Cálculo do Fator de Concentração (FC)

Chamaremos Fator de concentração FC, relativo a um determinado parâmetro, a relação entre dois valores do parâmetro, medidos em dois estágios da fase de evaporação, observada durante a estação seca. Este parâmetro pode ser, por exemplo, a concentração de sais ou de um determinado ion, ou a condutividade elétrica (FCE), bem como, os volumes armazenados no açude (FCV).

Efetua-se o cálculo, durante a estação seca, quando a variação da concentração dos elementos químicos dissolvidos no açude é devida, principalmente, à evaporação. Utilizaremos o sódio e o cloró como testemunhos da evolução da salinidade. Estes elementos são conservativos, muito solúveis e juntam-se raramente com outros elementos.

Temos:

$$FCNa = \frac{Na_i}{Na_o} \quad (\text{fator de concentração calculado sobre o sódio})$$

com Na_i = concentração em Na no tempo i , durante a estação seca

Na_o = concentração inicial em Na, seja a concentração em sódio, a mais fraca do ano, correspondendo ao mais alto nível do açude, no fim da estação das chuvas.

Teoricamente:

$$FCNa = Na_i/Na_o = V_o/V_i = FCV \quad (1)$$

com V_o = volume inicial do açude, de concentração em sódio Na_o .

com V_i = volume do açude no momento i de concentração Na_i .

com FCV = fator de concentração calculado a partir da evolução dos volumes

$$FCV = \frac{V_o}{V_i}$$

Logo, tem-se:

$$\begin{array}{lclclcl} V_{pi} & = & V_o - V_i & = & VEVP(i) & + & VIRRR(i) & + & VINFI(i) \\ \text{perdas totais em} & & & = & \text{evaporação} & + & \text{irrigação} & + & \text{infiltração no fundo} \\ \text{água do açude} & & & & & & & & \text{do açude no tempo } i. \end{array}$$

No caso de se ter, unicamente, perdas por evaporação, a igualdade $FC_{vol} = FC_{Na}$ seria verificada. Porém, como $V_{pi} > V_{EVP(i)}$ ter-se-á:

$$FCV = V_o / (V_o - V_{pi}) > FC_{Na}$$

Vários autores estabeleceram para o Nordeste, um coeficiente médio (K_a) entre a evaporação de um açude e a evaporação do tanque classe A do Weather Bureau, variando entre 0,7 e 1,0.

O valor mais provável está situado entre 0,8 e 0,85 (por exemplo NOUVELOT e alii (1979), encontrado no Riacho do Navio(PE): Evaporação do açude = 0,83 x Evaporação do tanque classe A).

Recentes trabalhos, feitos por Molle (1989), mostram que esse coeficiente K_a aumenta quando reduz-se o nível (e a superfície) do açude e, varia, com a estação do ano.

Molle aconselha os seguintes valores para K_a , em função da superfície (ha).

Superfície (ha)	0 a 5	5 a 10	10 a 20	20 a 30	Média
K_a	0.95	0.87	0.82	0.75	0.84

Assim, em virtude das incertezas ligadas às estimativas dos volumes evaporados, e diante da falta de conhecimento preciso dos volumes de irrigação e de infiltração, reiteramos que, FC_{Na} integra as perdas em sal devidas às águas de irrigação e de infiltração.

Consequentemente, FC_{Na} será inferior ao que deveria ser, se as perdas de água do açude só forem atribuídas à evaporação, e a mesma coisa acontecerá com FCl .

2.7 - Programas e logiciais de computação disponíveis

2.7.1 - O Programa "SISEAU" (Sistema-Água)

Esta versão em DBase III, por LARAQUE e SINHUÉE (1988), permite:

- a manutenção e atualização dos arquivos de dados hidro-químicos, dos diferentes açudes estudados;
- acompanhar a evolução química das águas de cada açude;

- classificar a água de acordo com as normas do USSSL³ - (US Salinity - Laboratory Staff - 1954);
- proporcionar as razões iônicas: Mg/Na, Ca/Na, etc., os percentuais iônicos, e conseqüentemente, definir o tipo de água;
- apresentar, enfim, os resultados, sob a forma de tabelas e de gráficos, utilizando-se o software LOTUS.

2.7.2 - O Programa PIPER

Esta versão em Pascal, por Laraque e Montgaillard (1989), posiciona, automaticamente, os resultados das análises nos diagramas triangulares de Piper, a fim de determinar os aspectos geoquímicos da água de um açude, acompanhar suas variações nas diversas estações, e daí, deduzir as reações químicas que poderão acontecer (precipitações, etc...).

O rumo da evolução química destas águas, durante o período seco, permite diferenciar o risco de alcalinização do risco de salinização e constatar as conseqüências reversíveis ou irreversíveis sobre o perímetro irrigado.

³ Esse diagrama de classificação das águas para irrigação, em função da condutividade elétrica e do SAR, é o mais usado. Chama-se, também, de diagrama de Wilcox ou diagrama de Riverside.

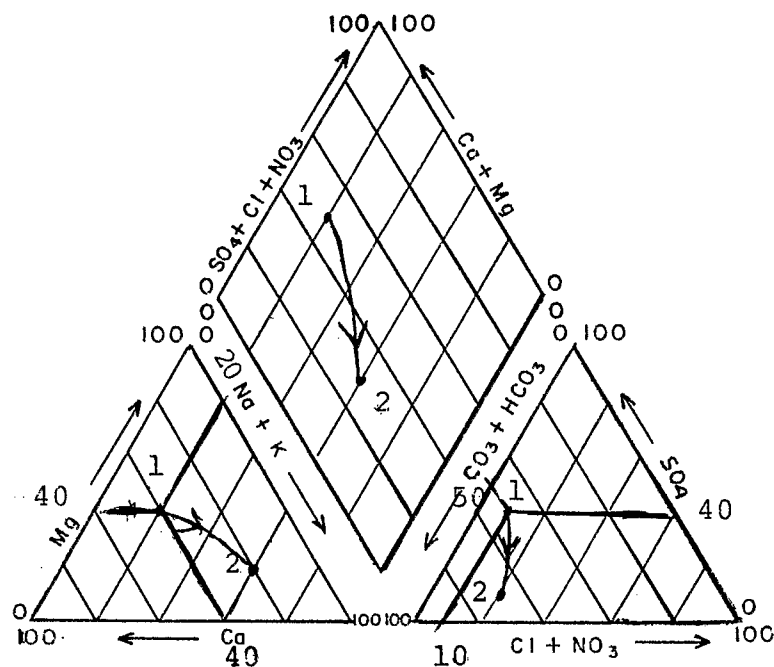


Figura 3 - Exemplo de uso dos diagramas de Piper

. Princípios de utilização do diagrama de PIPER e exemplo de interpretação (Figura 3).

Temos, por exemplo, uma água que tem as concentrações relativas (calculadas a partir das concentrações em meq/l) seguintes:

PONTO 1:

FINAL DA ÉPOCA DE CHUVA Para os cations: 40% Ca, 20% (Na + K), 40% Mg
Para os anions : 10% (Cl + NO₃), 40% SO₄, 50% (HCO₃ + CO₃)

PONTO 2:

FINAL DA ÉPOCA SECA Para os cations: 20% Ca, 60% (Na + K), 20% Mg
Para os anions : 20% (Cl + NO₃), 10% SO₄, 70% (HCO₃ + CO₃)

O somatório das concentrações relativas é de 100%, tanto para os cations como para os anions.

A partir das percentagens de cada sal, anotado nas escalas de cada lado dos triângulos, pode-se posicionar o ponto referente a cada análise.

Utilização

- 1 - O ponto dos cátions e anions posiciona-se como anotado.
- 2 - Conseguiu-se o ponto 1 do losango por projeção dos pontos (1) de cada triângulo.

Interpretação

Os dois diagramas triangulares servem para identificar as características geoquímicas das águas.

A análise (1) no final do inverno mostra, nos dois diagramas triangulares, águas magnesianas e bicarbonatadas.

A análise (2) no final do verão, caracteriza águas alcalinas bicarbonatadas.

A projeção dessas duas análises no losango, mostram um enriquecimento relativo em Na + K e HCO_3 , correlativo a uma diminuição relativa dos teores em (Ca + Mg) e ($\text{Cl} + \text{SO}_4 + \text{NO}_3$).

Isso significa que, a evaporação provoca um fenômeno de concentração das águas, que resulta nas precipitações de gipsita CaSO_4 . Essa evolução na via bicarbonatada alcalina é um perigo para a irrigação deixando, no decorrer da evaporação, águas cada vez mais alcalinas.

2.7.3 - Os arquivos "BAS" (de Laraque)

Obtidos graças ao utilitário WORDSTAR, permitem centralizar todos as informações relativas às características de cada bacia hidrográfica e açude estudado.

2.7.4 - O Modelo SIMSAL

O modelo SIMSAL é um modelo determinista, que permite prever a evolução das concentrações de sal dos açudes, durante a estação seca, em função das concentrações iniciais no final da época chuvosa, dos volumes armazenados, das evaporações, das infiltrações e das captações para irrigação.

Este modelo, funciona com intervalo de tempo mensal, ou de dez em dez dias.

Ele possui uma parte que calcula a evolução dos volumes de água de um açude. Esses cálculos são possíveis, a partir do conhecimento da batimetria do açude, da taxa de evaporação (de um valor evaporimétrico de referência: seja Tanque classe A ou ETP Hargreaves), da zona estudada, e dos volumes, tanto aqueles utilizados em irrigação, como os que sofrem infiltração.

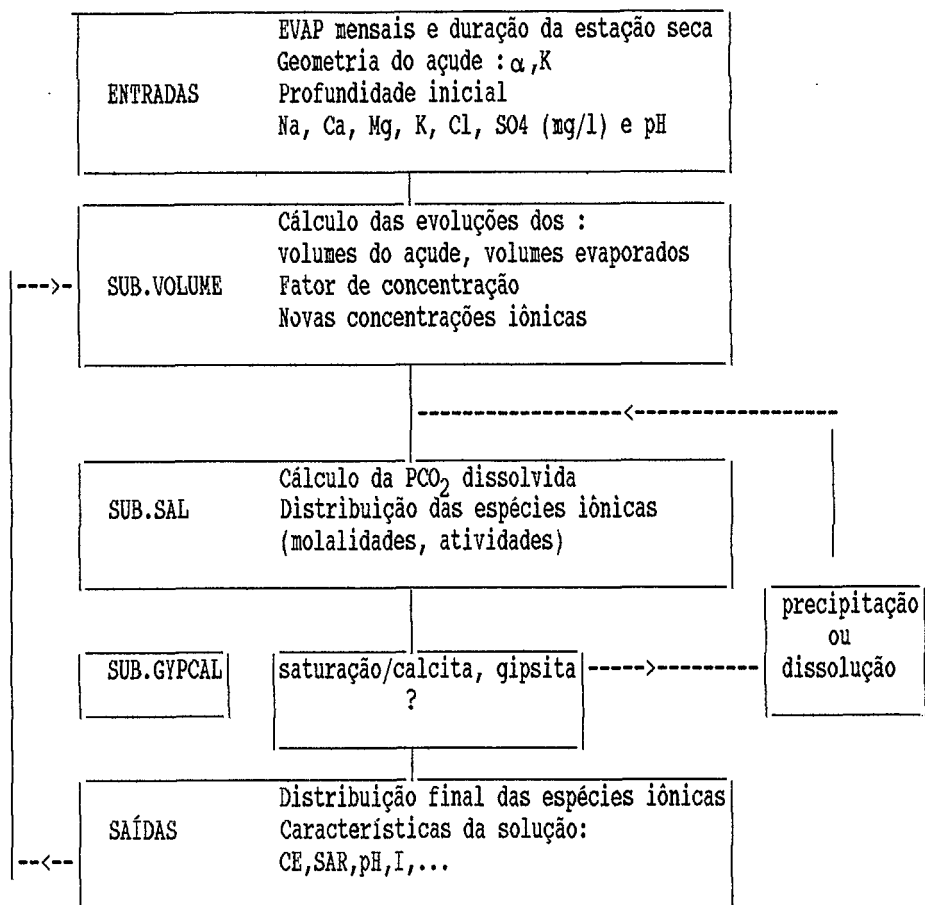
A parte do modelo SIMSAL que calcula os volumes de água disponíveis, escoados, etc... deriva-se dos modelos de simulação quantitativos, já operacionalizados pela equipe SUDENE/ORSTOM/Cooperação Francesa.

A parte química provém da associação do "modelo ACTIVE" (Rieu, 1984), que calcula as atividades iônicas de uma solução aquosa, em função dos equilíbrios termodinâmicos, e da "subrotina Gypcal" do modelo SIMUL (Rieu, 1984), que testa o estado de saturação em relação à calcita e gipsita da água, para quantificar o que precipitará ou o que será dissolvido. O seu fluxograma é apresentado a seguir (Fluxograma 1).

O modelo SIMSAL, está sendo ajustado às observações realizadas nos açudes estudados, e já fornece resultados satisfatórios a respeito da previsão da evolução hidroquímica das águas de alguns açudes, nos períodos sem chuva forte.

FLUXOGRAMA 1

Fluxograma resumido do modelo SIMSAL



O principal interesse dessa modelização é prever com mais rigor, do que o "método clássico"⁴, a evolução da condutividade elétrica (CE) e do risco adsorção de sódio (SAR), que são os dois fatores de maior importância na irrigação.

⁴ O método clássico limita-se a multiplicar os valores iniciais das concentrações químicas, CE, etc. por um fator de concentração, muitas vezes calculado a partir da variação dos volumes de água expostos à evaporação. Enquanto que, na realidade, a partir de um certo grau de concentração, ocorrerão precipitações de sais, e a condutividade elétrica real será então menor, porque a água terá menos sais dissolvidos. O SAR, ao contrário, será maior, devido à eliminação de uma parte dos ions Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺, dissolvidos por precipitação.

A boa precisão na avaliação desses dois fatores, permitirá determinar, com maior exatidão, os volumes necessários para a lixiviação dos perímetros irrigados e a preservação de seus solos, dos riscos de salinização.

O conjunto destes sistemas e programas de modelização hidroquímica, foi devidamente documentado e encontra-se à disposição dos usuários na SUDENE/DPG/PRN/HME.

Essas simulações permitir-nos-ão, por um lado, reproduzir certas condições "padrões" que tornarão possível a comparação dos comportamentos dos diferentes açudes estudados em situações medianas e extremas, e, por outro lado, gerar séries simuladas suficientemente longas, para que possam se constituir objeto de uma análise estatística.

Enfim, conhecendo a evolução da salinidade das águas dos açudes no decorrer do ano, poder-se-ia pensar, no futuro, em um modelo que simularia, simultaneamente, a evolução e a previsão da salinidade em um açude, e nos solos do perímetro irrigado a partir deste mesmo açude.

Um modelo baseado nos equilíbrios químicos, entre os sais da água de irrigação e a composição química dos solos, está sendo desenvolvido no CNPq.

3 - RESULTADOS OBTIDOS

Selecionamos como exemplo, os resultados obtidos:

- em 6 projetos pilotos;
- em 4 açudes salinizados;
- um exemplo de estudo mais completo da variação da qualidade da água (Açude P4 do Sr. CÍCERO BEZERRA - Município de Caicó/RN);
- um exemplo de ajustamento do modelo SIMSAL, no açude MOQUÉM (P28).

3.1 - Os projetos pilotos de irrigação

Tratam-se dos açudes: P2, P6, P8, P12, P14, P16, P17 (Tabela 3 e Figura 2). Os dados vão de fevereiro de 1987 a março de 1988. O açude P4 será estudado no parágrafo 3.3, de forma mais detalhada.

3.1.1 - Caracterização química destes açudes

Os açudes dos projetos pilotos, têm fatores de concentração, calculados sobre o sódio (FCNa) que variam entre 3,2 a 8,2 no fim da estação seca (Tabela 3).

Segundo os açudes, as águas começam a concentrar-se entre fevereiro e maio, e o fator de concentração (FCNa), é máximo entre dezembro/87 e março/88.

A condutividade elétrica evolui entre uma faixa inicial de 75 - 300 μS a 25°C, para chegar no final, a 200 - 900 μS a 25°C. A relação dos SAR extremos variam de 1,8 a 9.

As temperaturas da água variam entre 24 e 31°C.

Os pH ligeiramente básicos, 7 a 8, acidificam-se no final da estação seca.

Os diagramas de Piper (Fig. 4a, 4b, 4c) mostram todas as águas, muito pobres em sulfatos, com aspecto mais alcalino e bicarbonatado-clorinado.

TABELA 3

Fatores de concentração do Na, CE, SAR, e classes extremas das águas durante o ano hidrológico 1987/88, para os 12 açudes estudados.

Nº DO AÇUDE	FCNa	CONDUTI- VIDADE .*		(2)	SAR	SAR	(4)	CLASSE DA ÁGUA (USSS-1954)	
		MIN	MAX	---	MIN	MAX	---	MÍN	MÁX
		(1)	(2)	(1)	(3)	(4)	(3)		
P2	5,91	232	625	2,70	1,25	2,82	2,25	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁
P4	7,79	238	909	3,82	1,11	5,44	4,90	C ₂ S ₁	C ₃ S ₁
P6	5,06	100	370	3,70	0,53	1,55	2,92	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁
P8	8,18	77	416	5,40	0,42	2,51	5,97	C ₀ S ₁	C ₂ S ₁
P12	5,50	109	385	3,54	0,54	4,89	9,00	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁
P14	4,48	77	200	2,60	0,19	0,35	1,84	C ₀ S ₁	C ₁ S ₁
P16	3,24	250	476	1,90	0,83	2,07	2,49	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁
P17	3,58	243	526	2,16	0,88	2,30	2,61	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁
P52	?	?	18500	?	?	13,67	?	?	C ₆ S ₄
P68	41,50	2942	45450	15,45	3,30	23,46	7,10	C ₄ S ₁	C ₆ S ₄
P72	27,50	555	15384	27,72	2,48	16,49	6,65	C ₂ S ₁	C ₆ S ₄
P74	4,24	4348	12200	2,80	5,61	10,39	1,85	C ₄ S ₂	C ₆ S ₄

* Para os açudes salinizados P52, P68, P72 e P74, os dados maiores referem-se ao final da seca de 1987, enquanto, os dados menores correspondem ao começo da época chuvosa de 1988. Estamos aqui diante de uma diluição.

Os diagramas de PIPER das figuras 4a, 4b, 4c e 5 mostram que as concentrações decrescem na ordem:

HC03 > Cl > (Ca, Na) > (Mg, K) (em mg/l)

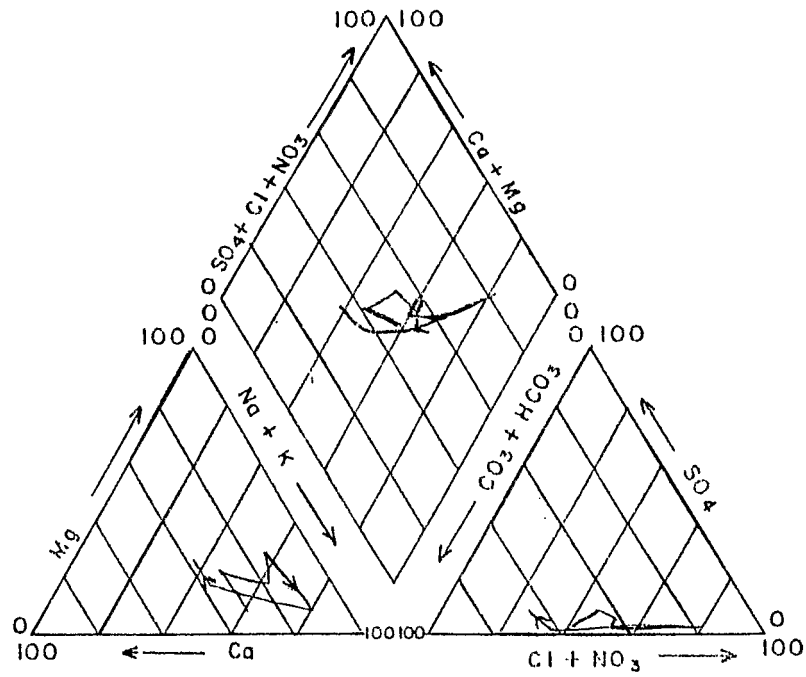
Em miliequivalentes por litro tem-se para os açudes

HC03 > Cl > SO4
Na > Ca > Mg > K

No momento da evaporação, a evolução dominante é na direção da via salina neutra.

Podem também aparecer precipitações de calcita às vezes magnesianas, de argilas magnesianas e algumas vezes de gipsita e de halita.

AÇUDE P2



AÇUDE P6

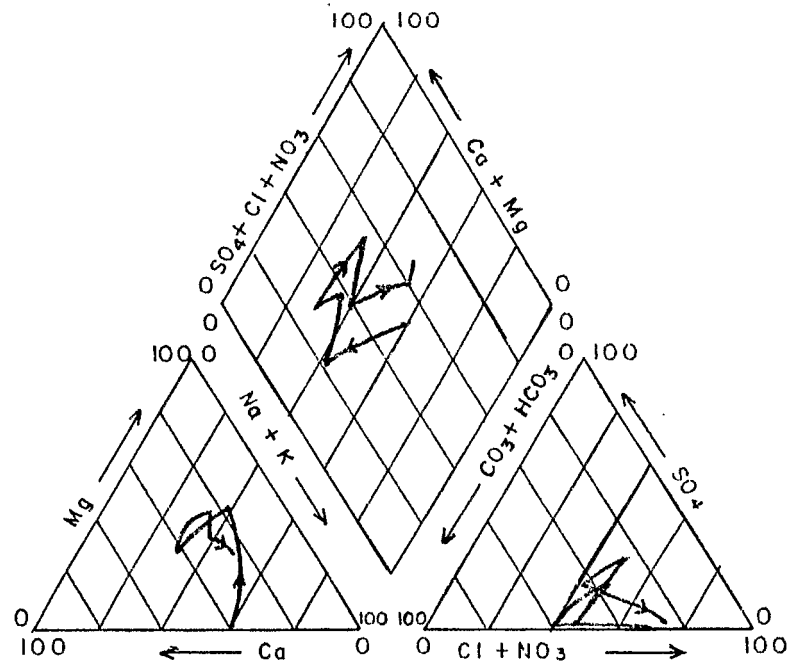


Figura 4a - Evolução das características químicas das águas dos açudes P2 e P6 durante a seca de 1987.

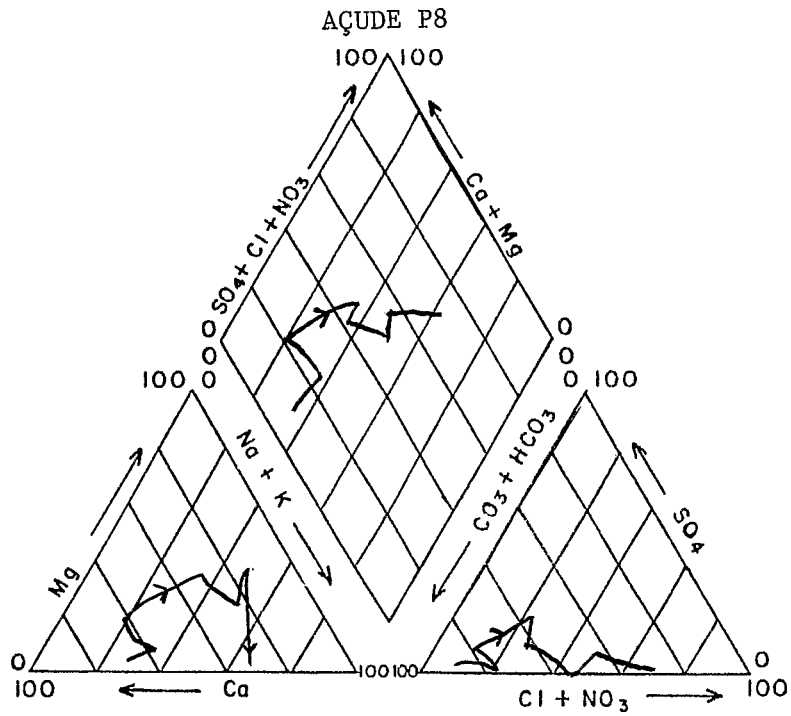


Figura 4b - Evolução das características químicas das águas dos açudes P8 e P16 durante a estação seca de 1987

AÇUDE P17

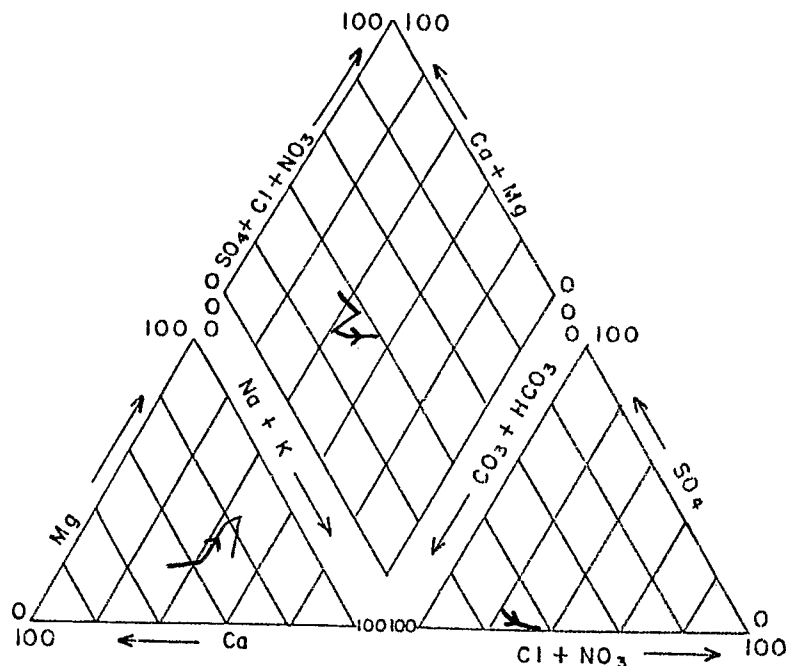


Figura 4c - Evolução das características químicas das águas do açude P17 durante a estação seca de 1987

Observamos duas exceções na Figura 5:

- O projeto 12 que evolui em um meio mais bicarbonatado alcalino no final da estação seca;
- O projeto 14 com um aspecto fortemente carbonatado, cálcico, deficitário em SO_4^{--} e Cl^- que praticamente não evolui.

3.1.2 - Conclusão

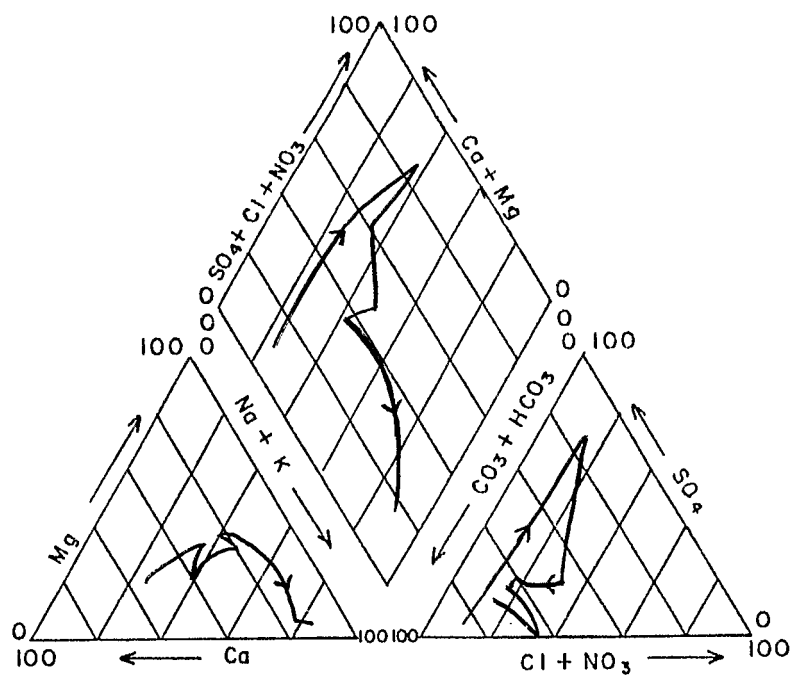
O diagrama do USSS (1954) da Tabela 4 mostra que as águas permanecem circunscritas na classe S_1 que corresponde a um fraco risco alcalinizante. Em compensação, elas evoluem na classe C_1 a C_2 (C_3 para o P_4) e apresentam um certo risco de salinização, no final da estação seca.

Apenas o projeto 14 conserva águas na classe C_1S_1 .

Resumimos aqui as principais conclusões relativas aos açudes dos projetos pilotos:

- As águas destes açudes são aceitáveis para a irrigação (geralmente C_1S_1 no início da estação seca, subindo para C_2S_1 no fim da mesma).
- Os ions mais abundantes são: HCO_3 , Cl , Na , Ca .
- O risco de sódio permanece sempre fraco.

42
AÇUDE P12



AÇUDE P14

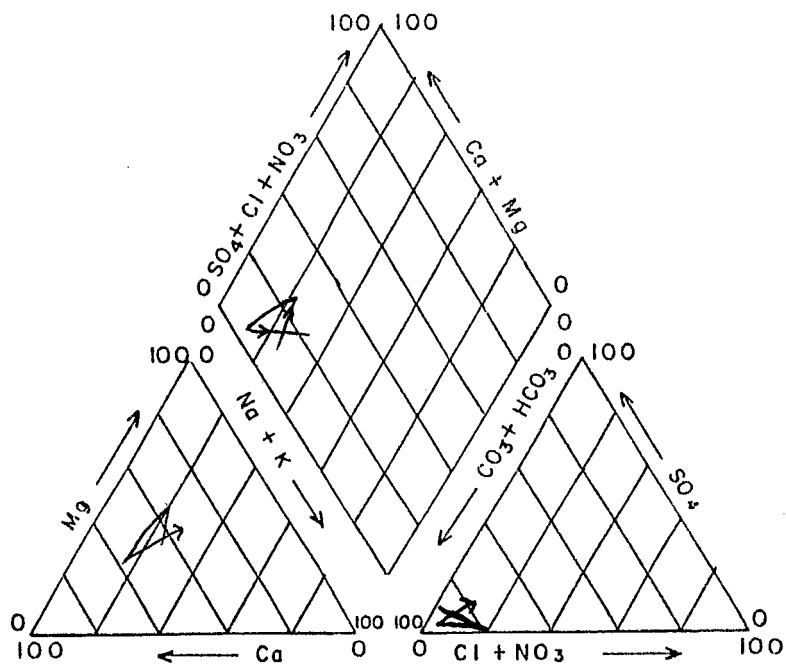
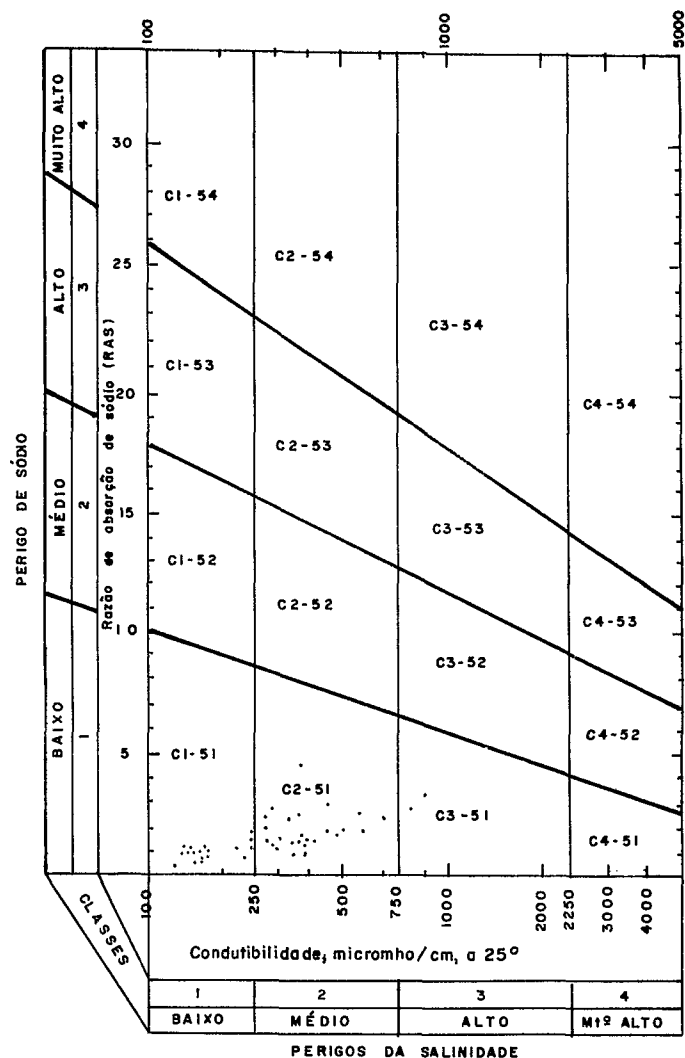


Figura 5 - Evolução das características químicas das águas do çude P12 e P14 durante a estação seca de 1987

TABELA 4

Classificação das águas para irrigação



FONTE: Estados Unidos Salinity Laboratory - USSSL (1954).

NOTA: os pontos representam as amostragens de fevereiro de 1987 até março de 1988, de todos os açudes, com exceção dos salgados.

3.2 - Os açudes salinizados

Na estação seca, esses açudes situados no Agreste e no início do Sertão pernambucano, sobressaem-se na paisagem por seus depósitos resultantes da evaporação, apresentando um resíduo esbranquiçado. Naturalmente, tentaremos encontrar as razões e os processos dessa salinização desastrosa.

3.2.1 - Informação disponível

Os poucos dados de campo, analisados de agosto/87 - janeiro/88 (Tabela 1 e 3) permitem, contudo, selecionar algumas particularidades desses meios.

A condutividade elétrica e os SAR são muito elevados, atingindo respectivamente, no final da estação seca, os valores de 45.000 μ SIEMENS a 25°C, e 25 para P.68.

Essas águas são totalmente inutilizáveis para a irrigação (classe C₅₋₆ do diagrama de USSSL).

A Tabela 5 apresenta as percentagens iônicas de cada açude.

TABELA 5

Evolução das percentagens iônicas dos açudes salinizados (P52, P68, P72, P74) na seca 1987-88

NÚMERO DO AÇUDE	DATA	CÁTIONS			ANIONS		
		Ca	Mg	Na+K	Cl	SO ₄	HCO ₃ +CO ₃
P.52	03/08/87	29.00	41.78	29.21	91.89	6.02	2.07
	02/12/87	34.28	37.37	28.34	95.27	4.20	0.52
	04/12/87	32.83	34.99	32.17	97.18	1.33	1.47
	22/12/87	36.01	37.78	26.20	95.13	4.22	0.64
	26/01/88	23.61	26.72	49.66	89.76	9.29	0.93
P.68	05/08/87	15.08	37.35	47.56	86.26	12.23	1.49
	03/12/87	17.84	44.66	37.49	93.64	5.27	1.07
	22/12/87	14.97	45.91	39.10	97.10	2.37	0.51
	27/01/88	15.66	45.07	39.26	95.10	4.48	0.41
P.72	06/08/87	12.55	19.43	68.00	82.17	14.25	3.56
	24/09/87	12.71	25.87	61.40	94.68	3.38	1.92
P.74	06/08/87	14.16	31.20	54.63	93.28	3.00	3.70
	24/09/87	15.71	42.48	41.80	93.57	2.90	3.51
	02/12/87	15.38	41.31	43.30	95.34	2.30	2.34
	23/12/87	15.91	39.31	44.77	95.74	1.69	2.55
	27/01/88	13.34	40.91	45.74	98.02	0.55	1.41

Durante a estação seca, as águas estão fortemente cloradas, em geral com: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^{--}$ (em meq/l).

Os sulfatos e carbonatos diminuem enquanto o cloro aumenta, com o avanço da estação seca.

Essas águas são alcalinas: $(Na + K) > Mg > Ca$, salvo para P52, onde Mg domina.

As análises realizadas pelo raio X das eflorescências salinas, colhidas nas margens dos açudes, mostram a presença dos principais sais, tais como: gipsita + calcita (P52), gipsita + halita (P72), gipsita (P74).

3.2.2 - Pedologia das bacias hidrográficas

Os projetos P68, P72 e P74 têm, em comum, bacias com predominância de planossolos. O P52 é caracterizado por uma pedologia homogênea, com base de solos podzólicos. A profundidade destes solos corresponde, aproximadamente, à média regional (maior ou igual a 70 cm), permeáveis na superfície, com uma limitação de drenagem, a menos de um metro de profundidade.

Isso, provoca uma infiltração e um escoamento hipodérmico mais lento. Consequentemente, este último enriquece-se em sais dissolvidos por causa de uma maior duração do contato água-solo.

As bacias hidrográficas têm um relevo fraco e são muito extensas.

3.2.3 - Geometria dos açudes

São pouco profundos (2 a 3 metros), salvo o P74 (5,4 metros) e muito amplos, com relações $V_{m\acute{a}x}/S_{m\acute{a}x}$ fracas (1 a 1,25), exceto para P74 (1,96).

Em consequência, nos períodos de estiagem, esses açudes ficam quase secos, o que implica fatores de concentração e de diluição muito elevados (superior a 40 para o P68). Ver Tabela 5.

3.2.4 - Reconcentração no decorrer do tempo

A informação histórica recolhida demonstra que, esses açudes, construídos há mais de 10 anos, tinham em sua origem, uma água de melhor qualidade. Essa água, era largamente utilizada para as necessidades domésticas e para o abastecimento do rebanho.

No período de 3 anos para o P72, 15 anos para o P68, e 40 anos para o P74, pós-construção, as águas desses açudes tornaram-se insalubres e deixaram de ser utilizadas.

Tem-se a assinalar que o P68 e o P72 têm, à montante, na sua bacia hidrográfica, açudes mais novos com, águas de melhor qualidade. As medições de condutividade elétrica, a seguir, ilustram essas diferenças:

em 10/03/88 2.800 μS a 25°C para P68(idade=30 anos)
 145 μS a 25°C para o açude a montante, com idade de 5 anos

em 09/06/88 813 μS a 25°C para P72(idade=12 anos)
 142 μS a 25°C para o açude à montante construído em 1987.

Estas informações demonstram que a salinização de um açude, pode ser a consequência de concentrações sucessivas no decorrer do tempo.

3.2.5 - Outras características dos açudes salinizados:

Presença de estratificação vertical das águas

Para os açudes pouco profundos P52, P68, P72, a condutividade elétrica no fundo do açude é ligeiramente superior à da superfície.

Em compensação, para P74 (profundidade superior a 5m), ela é duas vezes mais forte passando de 7.000 para 14.000 $\mu\text{SIEMENS}$ a 25°C (em 01/06/88), sem que seja evidenciada a presença de uma haloclina bem marcada.

Dimensionamento dos reservatórios

De acordo com testemunhas locais, esses açudes sangram pouco na estação úmida e seriam superdimensionados.

Sedimentos

Os sedimentos depositados nesses 4 açudes, estão profundos (mais de 50 cm), argilosos e ricos em matérias orgânicas e em sais precipitados.

A maior parte dos sais precipitados são concentrados nos primeiros decímetros dos sedimentos assoreados. Isto, sugere a possibilidade de recuperar açudes salinizados, raspando a superfície dos sedimentos depositados.

3.3 - Estudo mais detalhado de um exemplo

3.3.1 - Evolução das concentrações de sais no açude P.4

As características gerais do açude P.4 (açude Pai Bastião, de propriedade do Sr. Cícero Pereira, no Município de Caicó/RN), e de sua bacia hidrográfica estão resumidas nas Tabelas 1 e 3. As características físico-químicas de sua águas, estão reagrupadas na Tabela 6. O mapa do solo da bacia está na Figura 6.

Durante o ano hidrológico (1987-88) e, consequentemente, sob a influência de fatores climáticos (chuvas e evaporação) constatamos (Figuras 7, 8 e 9):

- 1) Aumento do volume de água do açude até abril/87 (estação das chuvas), acompanhado por uma diluição das espécies químicas dissolvidas.
- 2) A partir de maio, observamos uma concentração pela evaporação, das espécies dissolvidas, acompanhada de um aumento da condutividade elétrica, do SAR e da alcalinidade.
- 3) Esse fenômeno de concentração é interrompido em junho, por uma chuva isolada, provocando uma ligeira diluição, continuando depois a se reconcentrar, sem interrupção, até março de 88, quando voltam as chuvas.

Constatamos que, o ano hidrológico 1987-88, foi marcado pelo prolongamento da estação seca (de maio-junho a fevereiro-março 88), e pelo baixo índice de precipitações, com um total pluviométrico de 367 mm, o que corresponde, nessa região, a um ano seco, com período de retorno de uma vez a cada sete anos. Isso corresponde a uma redução notável dos volumes armazenados entre março/87 a fevereiro/88.

O fator de concentração (FCNa), atingiu 7,8 em março de 1988.

TABELA 6

Características físico-químicas do açude P4 durante a estação seca de 1987-88

DATA	VOLUME 1000 m ³	CE mS a 25°C	SAR ¹	CLASSE	pH	ALC ²	Ca	Mg	Na (em milimoles/litro)	K	Cl	SO ₄
04/04/87	343.67	238.10	1.15	C1S1	7.84	0.90	0.259	0.259	0.826	0.117	1.070	0.006
19/05/87	294.00	333.33	1.11	C2S1	8.00	2.06	0.598	0.439	1.130	0.125	1.267	0.000
10/06/87	278.53	263.16	1.25	C2S1	7.28	1.67	0.319	0.479	1.113	0.115	1.014	0.136
09/07/87	245.50	312.50	1.29	C2S1	8.10	2.10	0.528	0.469	1.287	0.122	1.295	0.004
13/08/87	196.00	322.58	1.47	C2S1	8.31	1.96	0.419	0.579	1.469	0.373	1.464	0.207
30/09/87	142.68	434.78	1.84	C2S1	7.54	2.80	0.997	0.400	2.173	0.204	2.112	0.130
26/11/87	77.58	666.67	2.47	C2S1	8.10	3.53	0.773	0.798	3.095	0.266	2.957	0.007
23/12/87	56.82	769.23	2.95	C3S1	8.03	3.83	0.598	1.079	3.826	0.314	3.662	0.000
11/01/88	42.84	909.09	3.69	C3S1	7.60	4.26	0.688	0.991	4.782	0.357	4.225	0.003
10/03/88	?	909.09	5.44	C3S1	7.20	3.54	0.498	0.900	6.434	0.383	5.845	0.115

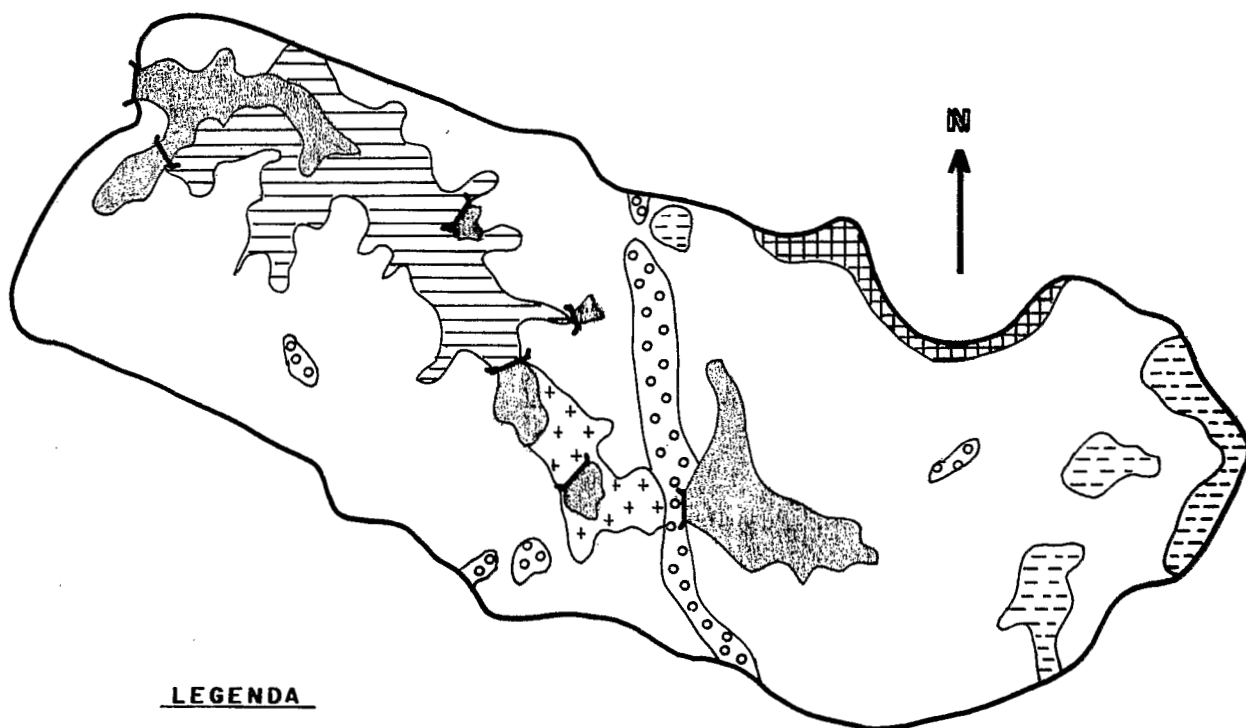
DATA	VOLUME 1000 m ³	I ³	Na/Ca	Na/Mg	Mg/Ca	Cl/HCO ₃	FCvol	FCNa	FCvol/ FCNa
04/04/87	343.67	2.457	3.185	3.181	1.001	1.338	1.00	1.00	1.00
19/05/87	294.00	4.338	1.889	2.570	0.735	0.634	1.17	1.37	0.85
10/06/87	278.53	3.792	3.487	2.320	1.503	0.634	1.23	1.35	0.91
09/07/87	245.50	4.416	2.434	2.743	0.887	0.611	1.40	1.56	0.90
13/08/87	196.00	5.126	3.508	2.534	1.383	0.799	1.75	1.78	0.98
30/09/87	142.68	6.701	2.179	5.435	0.401	0.755	2.40	2.63	0.91
26/11/87	77.58	8.136	4.004	3.878	1.032	0.813	4.43	3.75	1.18
23/12/87	56.82	9.158	6.393	3.543	1.804	0.964	6.05	4.63	1.30
11/01/88	42.84	10.079	6.949	4.822	1.440	1.036	8.00	5.79	1.38
10/03/88	?	10.899	12.900	7.150	1.804	1.461	?	7.79	?

- ¹ O risco de adsorção de sódio : $SAR = Na / \sqrt{1/2(Ca + Mg)}$ com Na, Mg, Ca em meq/l
- ² A alcalinidade : $ALC = Na + K + 2(Ca + Mg) - Cl - 2SO_4$ está calculada com base em meq/l
- ³ A força iônica : I está calculada a partir da condutividade elétrica CE (em mS a 25 °C) com a fórmula de Griffin e Jurinack (1973):
 $I = 0.0127 \times CE + 0,0003$

BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PAI BASTIÃO CAICÓ - RN

MAPA DE SOLO

ESCALA GRÁFICA
300 m 0 300 600 900 m



LEGENDA

-  Associação de BRUNO NÃO CÁLCICO vértico e não vértico fase relevo suave ondulado
-  GLEY POUCO HÚMICO relevo plano
-  SOLO ALUVIAL EUTRÓFICO textura indiscriminada relevo plano
-  VERTISOL relevo plano
-  SOLO LITÓLICO DISTRÓFICO textura arenoso relevo ondulado substrato granito
-  AFLORAMENTOS DE ROCHAS GRANÍTICAS

CONVENÇÕES

-  AÇUDE
-  LIMITE BACIA HIDROGRÁFICA

Figura 6 - Bacia Hidrográfica do açude Pai Bastião

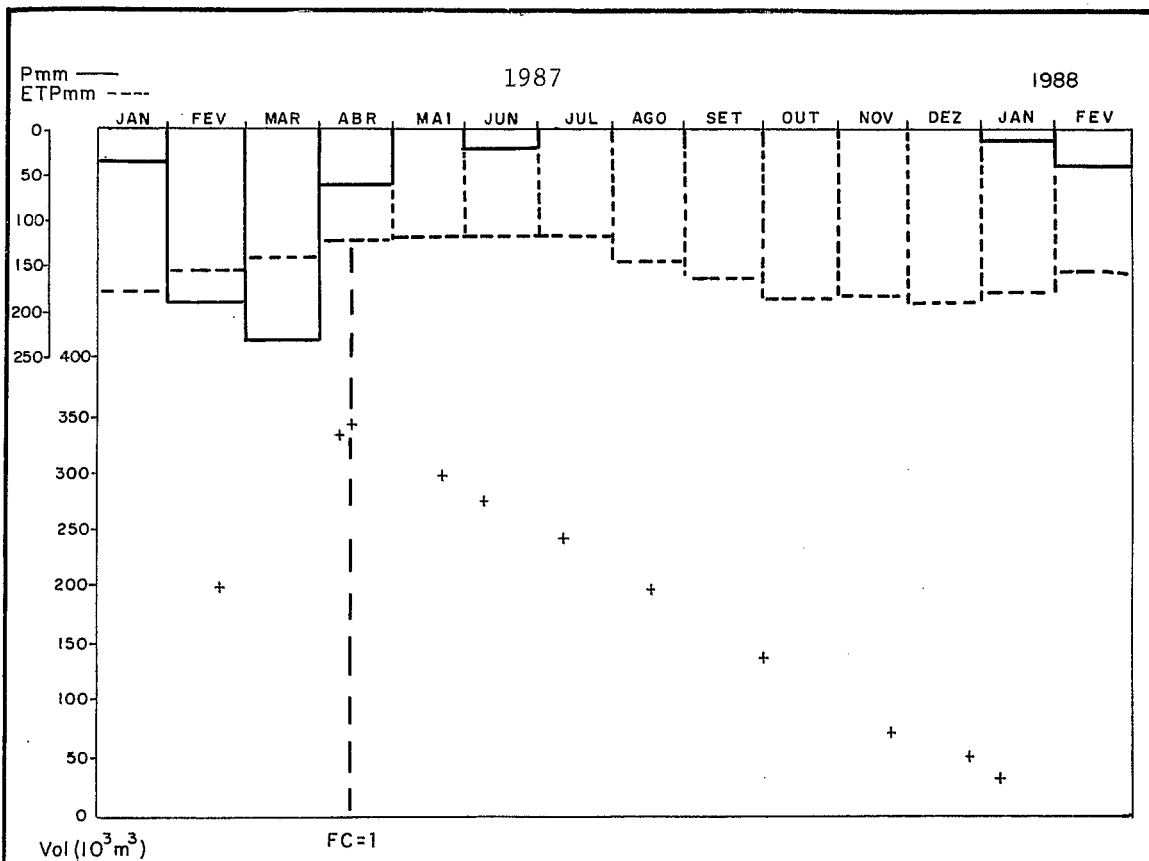


Figura 7 - Chuvas, ETP e evolução do volume do açude P4 durante o ano hidrológico, 1987/88

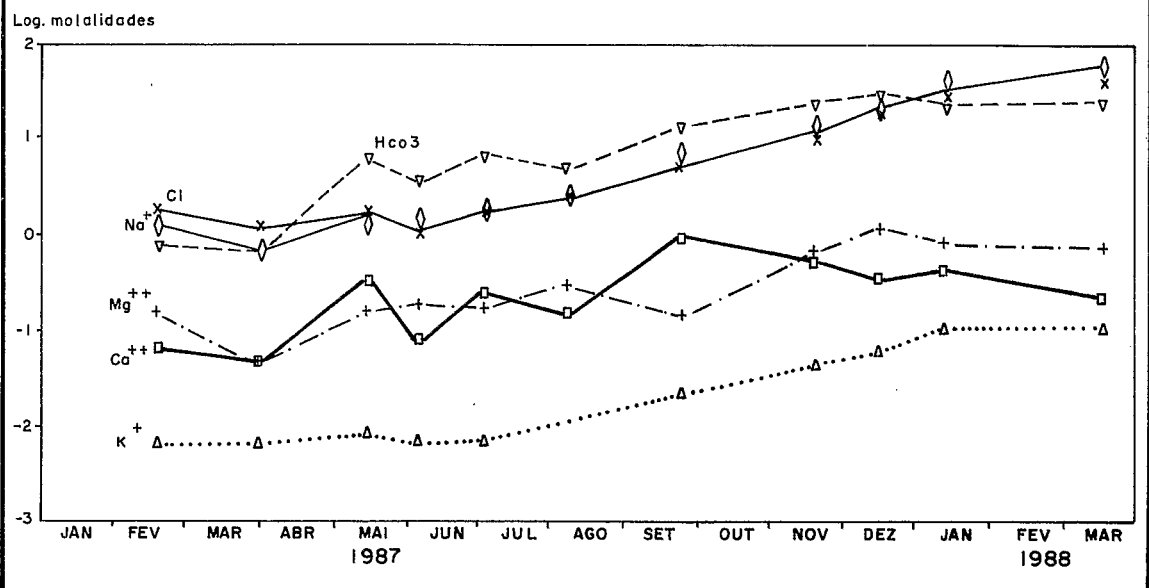


Figura 8 - Evolução da composição química das águas do açude P4 de fevereiro de 1987 até março de 1988

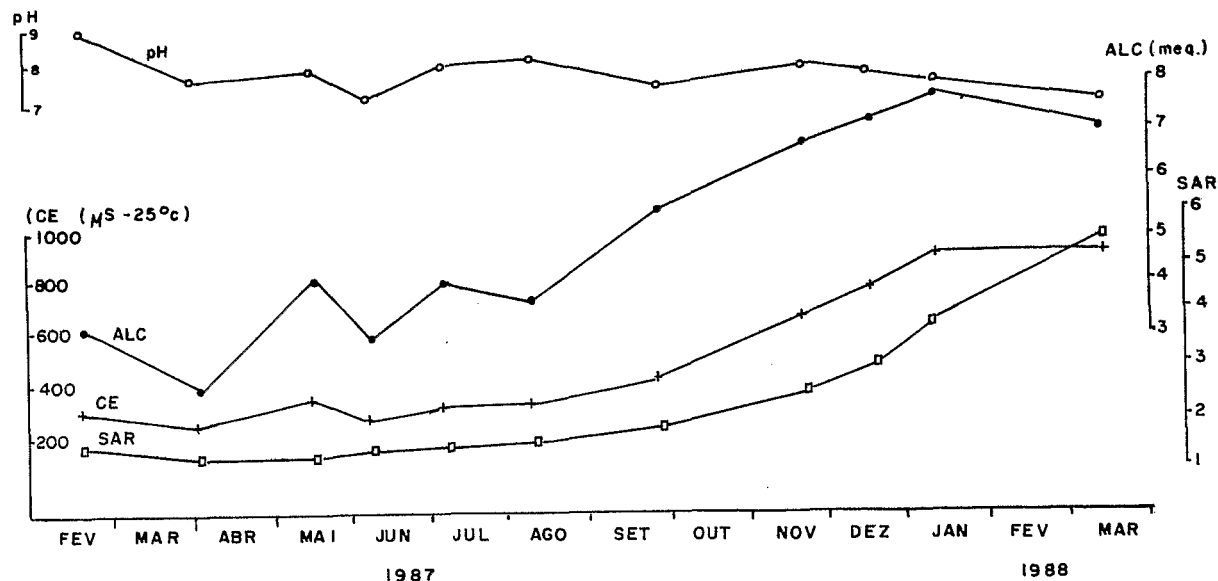


Figura 9 - Evolução do pH, alcalinidade, condutividade elétrica e SAR do açude P4 de fevereiro de 1987 até março de 1988

3.3.2 - Interpretação das evoluções químicas observadas

A diferença entre FC_{Vol} e FC_{Na} (Tabela 8), pode ser parcialmente atribuída a erros de estimativa do volume do açude, proveniente de coeficientes e K aproximados (eles foram obtidos a partir de um levantamento topográfico simplificado com, unicamente, dois espelhos de água).

Outros fenômenos, dificilmente mensuráveis, devem ser considerados, tais como, o abastecimento por escoamentos subterrâneos. Em geral, estes escoamentos são quantitativamente pouco importantes, mas muito carregados em sais. Isto, poderia explicar o valor de FC_{Vol} inferior a FC_{Na} , até o mês de setembro.

Depois desse mês, observam-se, como se esperava, valores de FCNa inferiores a FC_{Vol} . Isso indica que, uma parte do sódio dissolvido deve ser, então, levada pelas infiltrações e/ou ser incorporada aos sedimentos.

A Figura 10 mostra, durante a estação seca (junho-março), um aumento regular das concentrações em Na, Cl, e K; com efeito, estes elementos não contribuem para precipitações de sais no início da reconcentração, e constituem bons indicadores para o cálculo do fator de concentração.

No início de agosto, observa-se uma diminuição das concentrações em HCO_3 e Ca. No entanto, é a começar de setembro (para $FC = 2,63$), que Ca indica uma baixa contínua, enquanto Mg, apesar de uma queda no mesmo mês, começa a diminuir regularmente em dezembro.

A partir de $FC = 2,63$ (em setembro), a alcalinidade e os teores em HCO_3 estão em alta, com um aumento menos pronunciado no fim da estação seca. O pH diminui ligeiramente, em direção à neutralidade.

No início de agosto, observa-se uma diminuição das concentrações em HCO_3 e Ca. No entanto, é a partir de setembro (para $FC = 2,63$) que Ca indica uma baixa contínua, enquanto Mg, apesar de uma queda no mesmo mês, começa a diminuir, regularmente, em dezembro.

EVOLUÇÃO DAS MOLALIDADES, DO pH E DA ALCALINIDADE DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO FC_{Na} PARA O AÇUDE P4

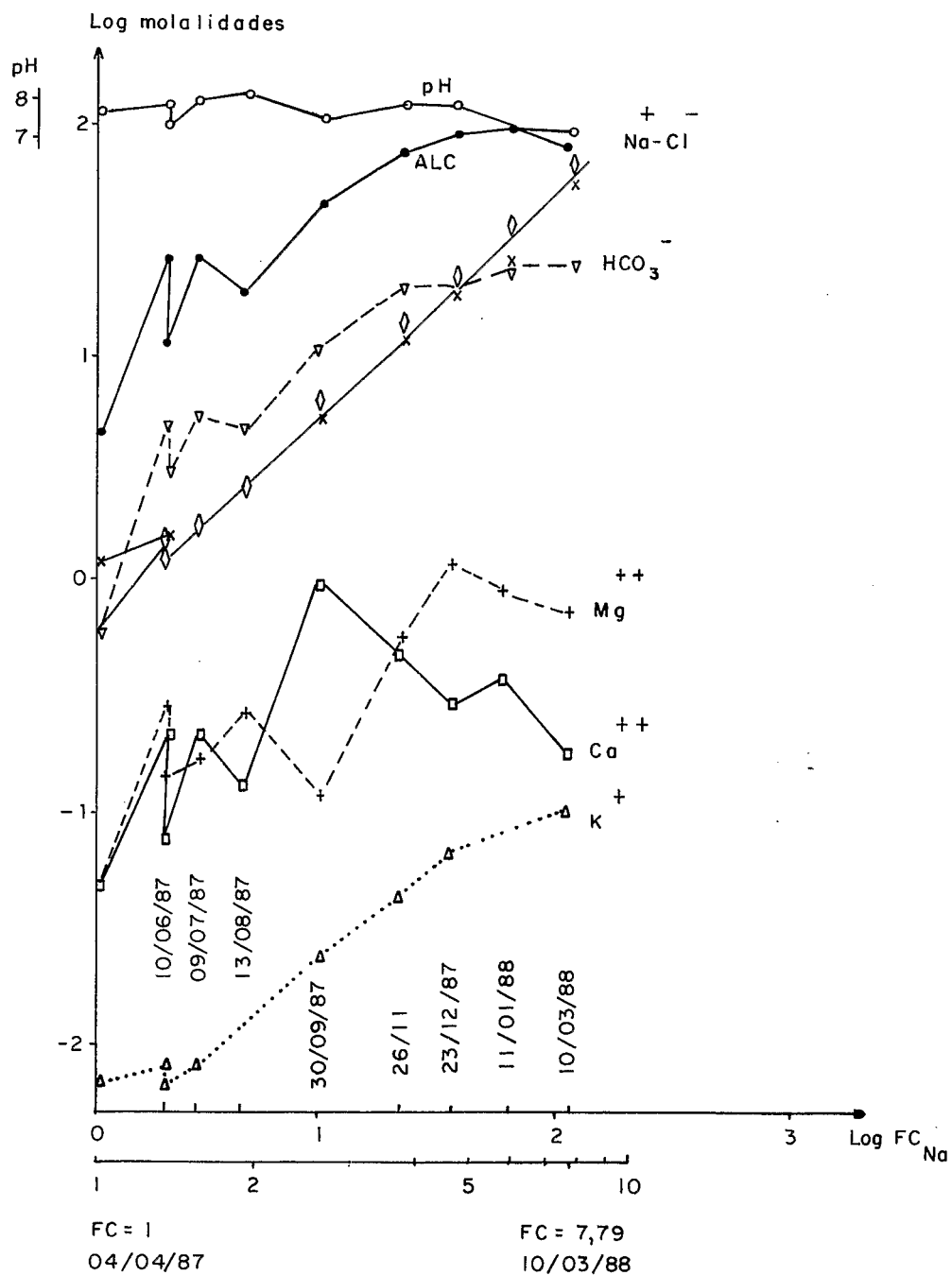


Figura 10 - Evolução das molalidades, do pH e da alcalinidade do fator de concentração FC_{Na} para o açude P4

Com $FC = 2,63$ (em setembro) a alcalinidade e os teores em HCO_3 estão em alta, com um aumento menos pronunciado no fim da estação seca. O pH diminui ligeiramente em direção à neutralidade.

Nas mesmas épocas, a Figura 11 confirma com o brusco aumento da relação molal Na/Ca e Na/Mg , uma diminuição dos teores em Ca e Mg dissolvidos.

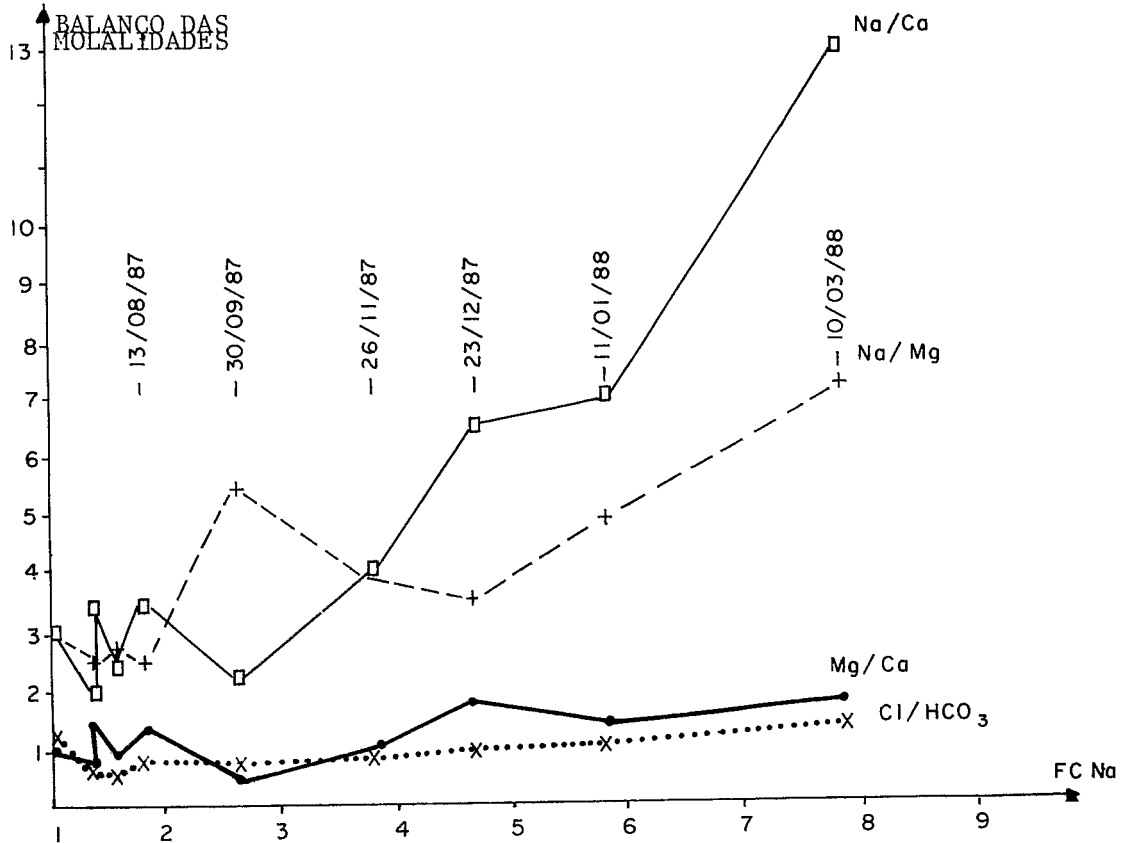


Figura 11 - Evolução das razões iônicas em função do fator de concentração FC_{Na} para o açude P4.

As relações em Mg/Ca e Cl/HCO_3 , elevam-se lentamente, indicando um consumo do Ca ligeiramente mais forte do que o de Mg , assim como um fraco consumo de bicarbonatos.

Estamos aqui, num sistema aberto; o sistema está em equilíbrio com uma reserva de gás carbônico com pressão parcial constante.

A força iônica da água evolui de $2,4 \times 10^{-3}$ a $1,1 \times 10^{-2}$.

A alcalinidade positiva aumenta com a evaporação.

Enfim, os diagramas de Piper (Fig. 12), mostram águas mais alcalinas, muito pobres em sulfatos, evoluindo em fins da estação seca, para aspectos cloretado sódico, por diminuição relativa dos teores em Ca, Mg e carbonatos.

Estamos aqui em meio salino neutro, o que está de acordo com uma ligeira baixa do pH, caminhando para a neutralidade a partir de novembro.

Para concluir, no diagrama de Riverside, as águas passam da classe C_1S_1 à C_3S_1 , isto é, com fraco risco alcalinizante, porém com forte risco de salinização.

3.3.3 - Recomendações práticas para o açude P4

A salinidade deste açude chega à classe C_3S_1 . Por este motivo, além da drenagem do perímetro irrigado, será necessário aumentar as doses de irrigação na estação seca.

São aconselhadas culturas resistentes aos sais.

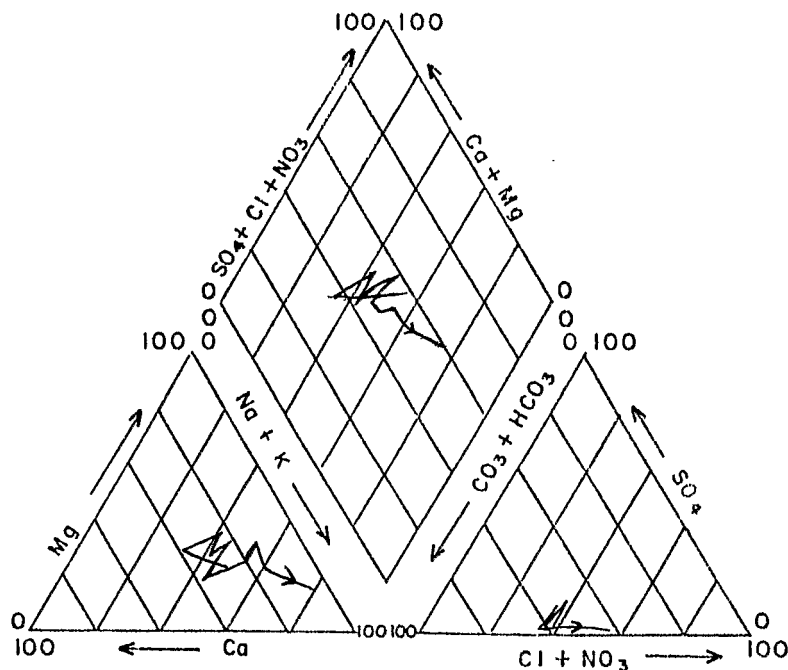


Figura 12 - Evolução das características químicas das águas do açude P4 durante a estação seca de 1987

3.4 - Simulações do modelo SIMSAL e comentários

O Modelo SIMSAL foi ajustado sobre os açudes P4 (Pai Bastião) e P28 (Moquem) e está sendo ajustado, atualmente, a 4 outros açudes.

Dificuldades práticas, devidas à imprecisão na avaliação dos volumes infiltrados e utilizados para irrigação no período de ajustamento, conduziram-nos a escolher o açude P28 (Moquem), como exemplo, para ilustrar o ajustamento do Modelo SIMSAL, no lugar do P4.

3.4.1 - Aplicação ao estudo do açude Moquem.

- Apresentação: esse açude faz parte da Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá (CE), monitorada pela SUDENE. Tem um volume de quase 1 milhão de m³ para uma profundidade máxima de 10,6 m.

Não é usado pelo homem, e as suas infiltrações podem ser consideradas como desprezíveis; não existe, por exemplo, uma zona úmida no pé da parede, portanto, pode-se considerar que, a quase totalidade das perdas de água provêm da evaporação.

- Climatologia: a estação seca do ano hidrológico (1987-88), teve uma duração de 10 meses (10 abril 87 - 14 fevereiro 88).

A Tabela 7, mostra os dados do posto meteorológico da BHR de Tauá (equipado de um tanque classe A), referentes à estação seca 1987-88.

TABELA 7

Evaporações e chuvas medidas, no posto de Tauá/CE,
durante a estação seca 1987-88

MÊS	ABR 1	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV 2	TOTAL
EVA	130	245	215	211	245	228	283	273	250	255	91	2426
CHUVA	30,2	16,4	47,5	9,6	0	0	0	0	0	7	0	111

¹ A partir do dia 10. ² Até o dia 14.

A Tabela 8, mostra a evolução hidroquímica do açude, obtida a partir das análises de Laboratório; quanto à Tabela 9, apresenta o resultado da simulação da evolução das características hidroquímicas, a partir do modelo SIMSAL.

A Tabela 10, compara as características hidroquímicas observadas, no começo e no fim da estação seca, com as simulações do modelo SIMSAL.

TABELA 8

Características físico-climáticas do açude Moquêm
durante a estação seca 1987-88

DATA	VOLUME 1000 m ³	CE uS a 25°C	SAR	pH	ALCALI- METRIA	Ca	Mg	Na (em miligramas/litros)	K	Cl	SO4	Resíduo FCCl* seco	
09/04/87	443.09	330.00	0.96	7.40	2.19	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	261	1
18/05/87	398.47	367.00	1.01	7.44	2.43	24.91	16.23	26.02	8.00	50.04	0.11	289	1.11
17/06/87	364.65	401.00	1.06	7.48	2.65	27.22	17.74	28.43	8.75	54.68	0.12	314	1.21
15/07/87	335.20	436.00	1.10	7.51	2.88	29.61	19.30	30.93	9.52	59.48	0.13	341	1.32
16/08/87	306.14	477.00	1.16	7.55	3.14	32.42	21.13	33.87	10.42	65.13	0.14	372	1.45
15/09/87	277.53	526.00	1.22	7.59	3.45	35.76	23.31	37.36	11.49	71.84	0.16	409	1.60
14/12/87	195.68	654.00	1.59	7.65	4.03	33.01	33.06	52.99	16.30	101.90	0.23	504	2.26
13/01/88	174.28	713.00	1.73	7.68	4.31	32.82	37.12	59.49	18.30	114.41	0.25	547	2.54
12/02/88	152.79	764.00	1.93	7.70	4.47	28.10	42.34	67.86	20.88	130.50	0.29	584	2.89

* FCCl = Fator de concentração baseado no cloro

TABELA 9

Simulação pelo Modelo SIMSAL da evolução hidroquímica
do açude Moquêm na estação seca 1987-88

DATA	VOLUME 1000 m ³	CE uS a 25°C	SAR	pH	ALCALI- METRIA	Ca	Mg	Na (em miligramas/litros)	K	Cl	SO4	Resíduo FCCl* seco	
09/04/87	443.09	330.00	0.96	7.40	2.19	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	261	1
18/05/87	398.47	367.00	1.01	7.44	2.43	24.91	16.23	26.02	8.00	50.04	0.11	289	1.11
17/06/87	364.65	401.00	1.06	7.48	2.65	27.22	17.74	28.43	8.75	54.68	0.12	314	1.21
15/07/87	335.20	436.00	1.10	7.51	2.88	29.61	19.30	30.93	9.52	59.48	0.13	341	1.32
16/08/87	306.14	477.00	1.16	7.55	3.14	32.42	21.13	33.87	10.42	65.13	0.14	372	1.45
15/09/87	277.53	526.00	1.22	7.59	3.45	35.76	23.31	37.36	11.49	71.84	0.16	409	1.60
14/12/87	195.68	654.00	1.59	7.65	4.03	33.01	33.06	52.99	16.30	101.90	0.23	504	2.26
13/01/88	174.28	713.00	1.73	7.68	4.31	32.82	37.12	59.49	18.30	114.41	0.25	547	2.54
12/02/88	152.79	764.00	1.93	7.70	4.47	28.10	42.34	67.86	20.88	130.50	0.29	584	2.89

* FCCl = Fator de concentração baseado no cloro

TABELA 10

Comparação dos dados de laboratório com os dados da simulação SIMSAL e o método clássico, entre o início e o fim da estação seca (1987-88) para o açude Moquém

	ANÁLISES DE LABORATÓRIO	SIMULAÇÕES (SIMSAL)	MÉTODO CLÁSSICO
Fatores de concentração	1 -----> 2,89	1 -----> 2,89	1 -----> 2,89
Condutividade elétrica (μS a 25°C)	333 -----> 769	330 -----> 764	333 -----> 963
S.A.R	0,94 -----> 1,82	0,96 -----> 1,93	0,94 -----> 1,60
Resíduo seco (mg/l)	242 -----> 484	261 -----> 473	242 -----> 699,38
Na (mg/l)	23,4 -----> 63	23,4 -----> 67,86	23,4 -----> 67,63
Cl (mg/l)	45 -----> 130	45 -----> 130,50	45 -----> 130,05

3.4.2 - Comparação com o método clássico

As Figuras 13 e 14, mostram que, para o açude estudado, o método clássico superestima a salinização da água em 25%, para um fator de concentração de 2,90, calculando, depois da estação seca, uma condutividade elétrica de 963 em vez de 769 μS à 25°C , o que tem como resultado, supervalorizar as doses de lixiviação.

Por enquanto, esse método clássico subestima o SAR da água em 12%, resultando de 1,60 em vez de 1,82, o que tem o efeito de subvalorizar os problemas de sodificação e, portanto, as doses de lixiviação.

As previsões do método geoquímico (SIMSAL), levando-se em conta os fenômenos de precipitações, conduzem a diferenças de 4,5% para a CE e de 1,5% para o SAR, para a média dos três últimos meses. Essas previsões estão mais próximas da realidade observada, que as do método clássico. Isso permite calcular, com maior adequação, as doses de irrigação e lixiviação necessárias para conservar um bom rendimento dos cultivos e uma preservação dos solos dos perímetros irrigados.

3.4.3 - Comentários

Os cálculos realizados com o modelo SIMSAL estão coerentes com os resultados das análises químicas de laboratório. Isso mostra o bom funcionamento do modelo SIMSAL, nestes dois açudes.

CE observado e previsto pelo método clássico e pelo Simsal.

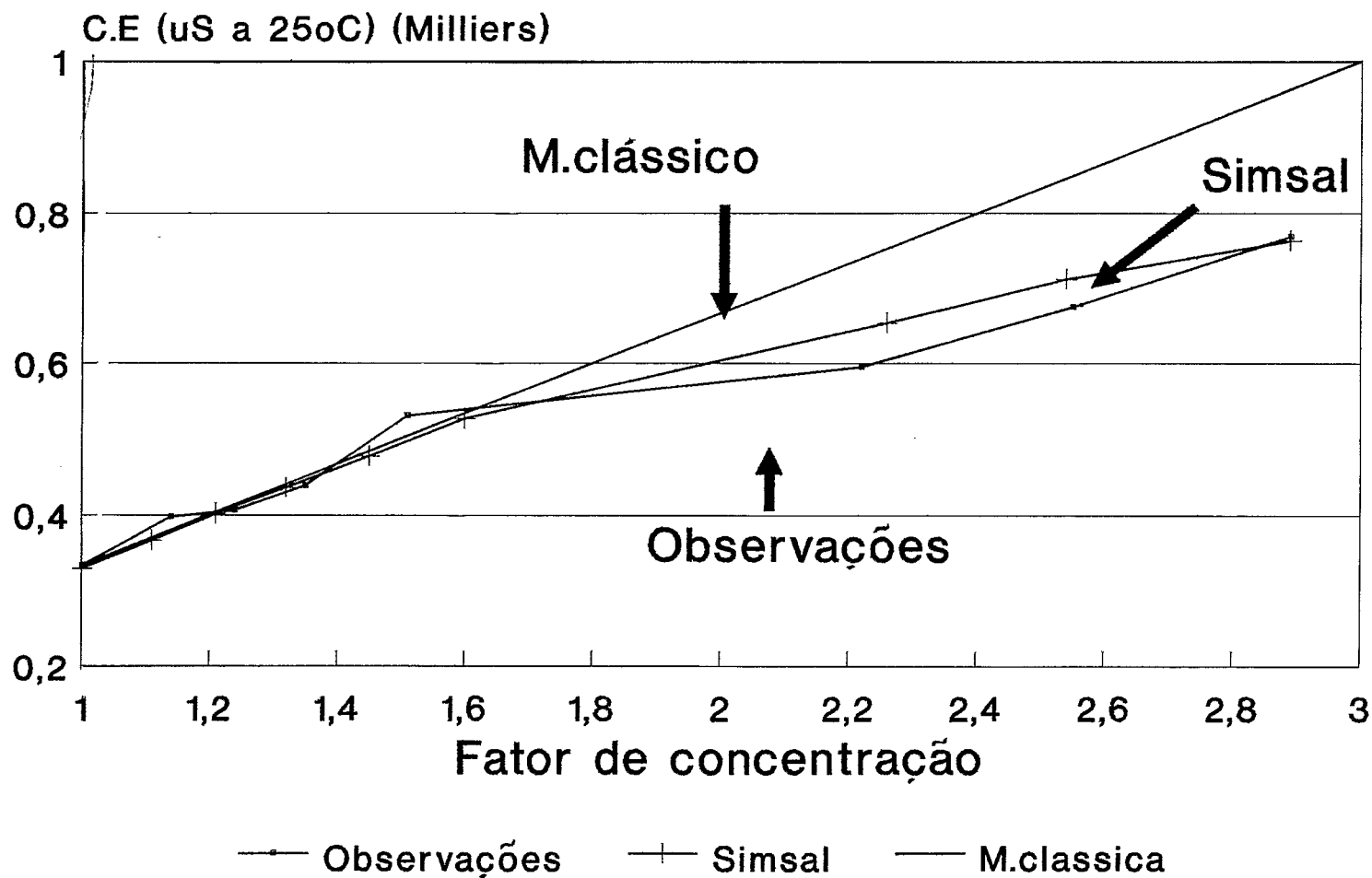


Figura 13 - Condutividade elétrica observada e prevista pelo método clássico e pelo modelo SIMSAL.

SAR observado e previsto pelo método clássico e pelo Simsal.

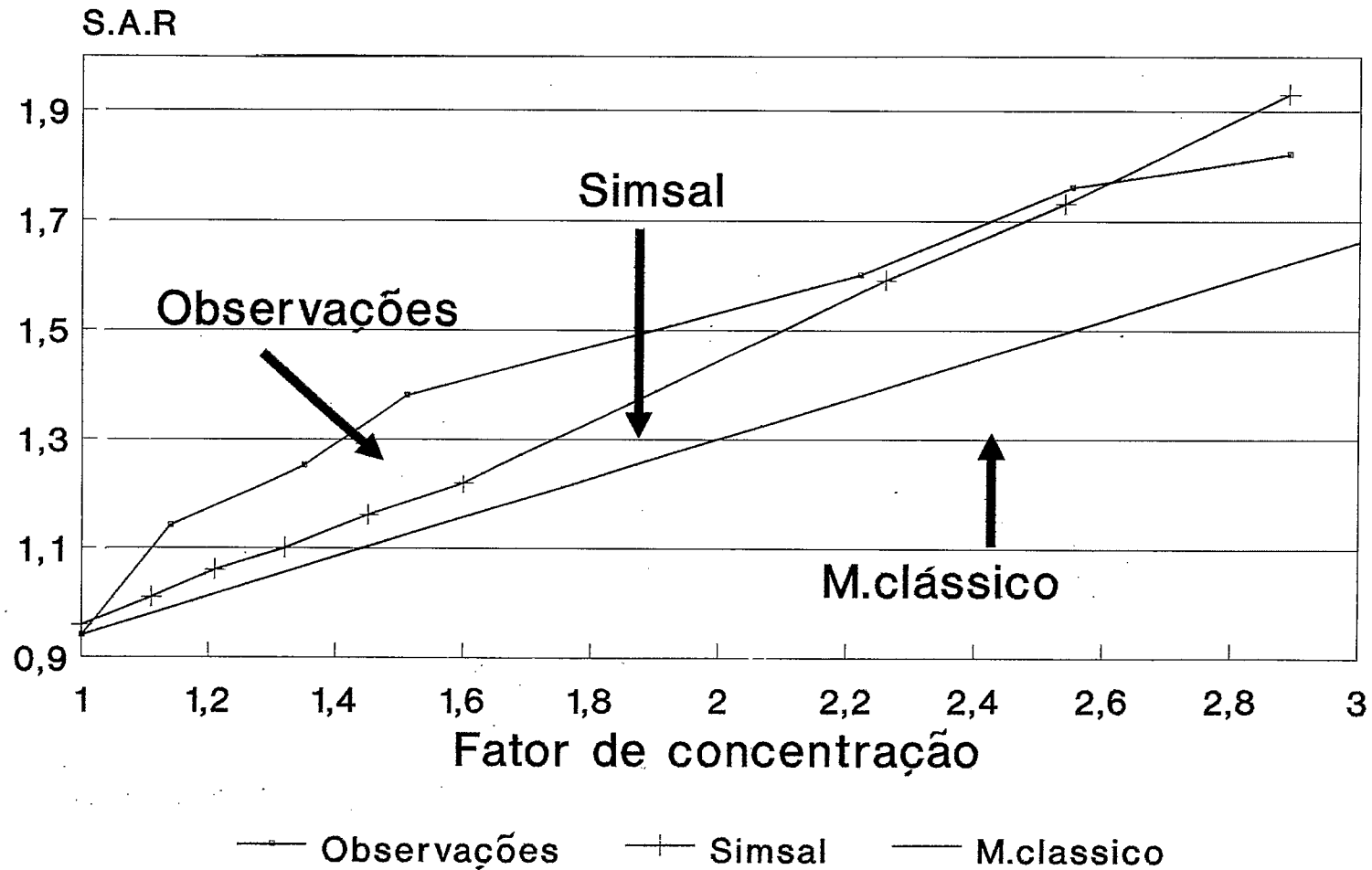


Figura 14 - SAR observado e previsto pelo método clássico e pelo modelo SIMSAL

Uma análise mais detalhada destes resultados, mostra que, com relação às análises de laboratório, as simulações apresentam uma diminuição mais rápida e mais regular dos teores em Ca, quando tem início a precipitação de calcita; em compensação, os teores em magnésio simulados, aumentam um pouco mais do que na realidade (deve-se formar calcitas magnesianas).

De qualquer modo, esse aumento do magnésio contrabalança a perda, talvez excessiva, de Ca e permite encontrar um SAR calculado, pouco diferente do que foi observado, o que, na prática, é o mais importante.

Note-se, igualmente, que os resultados de laboratório nem sempre constituem uma referência absoluta para ajustar o SIMSAL, assim, além da imprecisão e dos inevitáveis erros de laboratório, assinalamos que as análises são geralmente realizadas, mais de um mês após a amostragem, enquanto que, as condições de colheita, de transporte e de conservação nem sempre são ideais.

Poder-se-ia obter uma melhor qualidade dos resultados do modelo SIMSAL, mediante a consideração de eventuais variações da pCO_2 durante o fenômeno evaporatório e o estudo de outras precipitações, entre elas as magnesianas.

Concluindo, o modelo SIMSAL está sendo, atualmente, testado, usando-se dados de outros açudes, a fim de verificar seu bom funcionamento e generalizar sua utilização, através de aplicações práticas para a irrigação e o cálculo das doses de lixiviação dos solos.

3.5 - Correlações entre condutividade elétrica e as diversas concentrações químicas

É possível medir, diretamente no campo, a condutividade elétrica (CE) de uma água, com um condutivímetro portátil.

As correlações entre a condutividade elétrica e as diversas características químicas da água, apresentam um grande interesse prático.

Com esta finalidade, analisemos então os dados disponíveis.

Cerca de 240 amostras de água foram colhidas e analisadas, entre fevereiro de 1987 e setembro de 1988, em 33 açudes diferentes, situados em zona semi-árida dos seguintes Estados: PE, PB, RN, CE.

3.5.1 - Seleção e crítica das análises

As análises que apresentam uma percentagem de erro no balanço iônico, superior a 5%, são sistematicamente eliminadas. Utilizamos o método preconizado por Schoeller, para calcular o grau de imprecisão de uma análise, tendo por base a fórmula:

$$ER = \frac{CT - AN}{CT + AN} \times 100$$

com ER = erro de análise

e CT, AN = respectivamente, soma dos cátions e soma dos ânions (em meq/l).

Também verificamos a boa adequação entre a condutividade elétrica, o resíduo seco e a carga total dissolvida, assim como, a regular e lógica evolução das diversas concentrações iônicas no decorrer do tempo.

Uma vez realizada esta triagem inicial, nossa amostra fica reduzida a 216 análises, isto é, 90% do total.

Essa quantidade de análises de boa qualidade servirá para o cálculo das correlações entre diferentes concentrações e a condutividade elétrica. Na prática, esta condutividade é facilmente mensurável no local, com a ajuda de um condutivímetro de campo.

Os valores extremos, das principais características das amostras colhidas, são apresentadas na Tabela 11.

TABELA 11

Valores extremos de CE, SAR, Na, Cl, resíduo seco

	CONDUTIVIDADE (μ S a 25°C)	SAR	Na (mg/l)	Cl (mg/l)	RESÍDUO SECO (mg/l)
Mínimo	52,63	0,14	2,5	0,01	29
Máximo	45.455,00	23,46	9.960,0	39.500,01	97.172

A condutividade elétrica varia de 50 a 45.000 μ S a 25°C, para o conjunto de amostras, porém, somente 22 análises (ou 10%), têm condutividades elevadas superiores a 5.000 μ S a 25°C.

O restante (90%), isto é, 194 análises, têm condutividades inferiores a 5.000 μ S a 25°C.

Informamos na Tabela 12, a seguir, a composição padrão da água do mar, definida pelo Laboratório Hidrográfico de Copenhague (Dinamarca):

TABELA 12

Composição padrão da água do mar.

CÁTIONS			ÂNIONS		
	mg/l	meq/l		mg/l	meq/l
Na ⁺	11.035	479,8	Cl ⁻	19.841	559,6
Mg ⁺⁺	1.330	109,4	SO ₄ ⁻	2.769	57,6
Ca ⁺⁺	418	20,9	HCO ₃ ⁻	146	2,5
K ⁺	397	10,2	Br ⁻	68	0,9
Sr ⁺	13,9	0,3	F ⁻	1,4	

NOTA: salinidade total: 36,047 g/l
 alcalinidade total: 119,8 mg/l

Constatamos que, excepcionalmente, no final da estação seca, algumas águas podem estar mais carregadas em sais que a própria água marinha.

3.5.2 - Cálculo das correlações

Estabelecemos dois conjuntos de correlações:

O primeiro conjunto refere-se às 216 análises escolhidas (série A), enquanto o segundo conjunto limita-se a 194 análises, que têm condutividades inferiores a 5.000 μ S a 25°C (série B).

Esta separação é necessária, em consequência da diferença existente entre as relações típicas dos açudes pouco e muito salinizados.

O limite de 5.000 μ S a 25°C, foi adotado por duas razões:

- a maioria das águas estudadas situa-se entre 0 - 5000 μ S a 25°C (90%).
- No diagrama do USSL (Handbook nº 60, 1954), 5000 μ S a 25°C, é o limite, a partir do qual as águas apresentam salinidade excepcionalmente elevada (classe C5) e são, em geral, inutilizáveis para a irrigação.

As correlações obtidas são apresentadas na Tabela 13:

$$\text{com } Co = \frac{\text{cations} + \text{anions}}{2} = \text{carga iônica (em meq/l)}$$

com as concentrações em Na, Cl, resíduo seco (RS) em mg/l

as condutividades elétricas (CE) em μ S a 25°C

A relação entre a carga iônica e a condutividade, depende do tipo de salinização considerada.

TABELA 13

Correlações diversas com a condutividade elétrica (CE)

SÉRIES DE DADOS	Nº DE ANÁLISES	CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r)	DESVIO PADRAO	VEJA FIGURA Nº:
A	216	Na(mg/l) = 0.181 * CE - 101	0,87	605	
B	194	Na(mg/l) = 0.101 * CE - 2,51	0,97	18,82	44
A	216	Cl(mg/l) = 0.615 * CE - 365	0,93	1368	
B	194	Cl(mg/l) = 0.345 * CE - 66,69	0,98	48,58	46
A	216	Ca(mg/l) = 0.056 * CE - 8,20	0,96	97,44	
B	194	Ca(mg/l) = 0.04 * CE + 7,60	0,95	10,37	
A	216	Mg(mg/l) = 0.04 * CE + 34,62	0,67	378	
B	194	Mg(mg/l) = 0.047 * CE - 4,58	0,94	13,42	
A	216	Co = 0.0098 * CE ^{1,017}	0,99	0,09	
B	194	Co = 0.012 * CE ^{0,971}	0,99	0,06	48
A	216	RS(mg/l) = 1.277 * CE - 649	0,90	3620	
B	194	RS(mg/l) = 0.723 * CE + 12,18	0,99	94,34	50
A	216	SAR = 0.028 * CE ^{0,634}	0,88	0,213	52
B	194	SAR = 0.014 * CE ^{0,748}	0,85	0,20	

DISTRIBUIÇÃO : Na — CE

(194 análises, $0 < CE < 5000 \text{ uS}$)

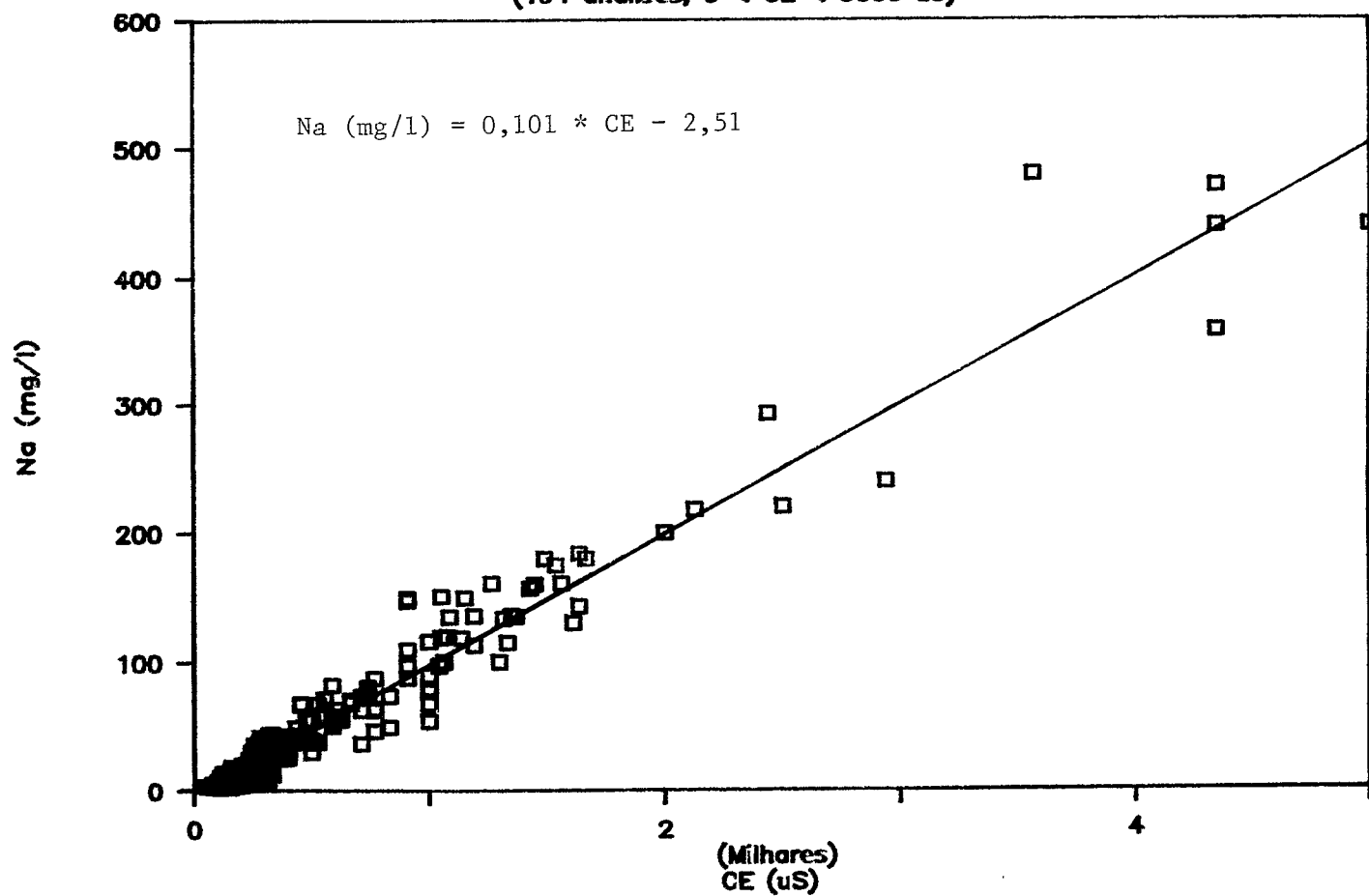


Figura 15 - Distribuição: Na - CE

DISTRIBUIÇÃO : Cl - CE

(194 análises, $0 < CE < 5000 \text{ uS}$)

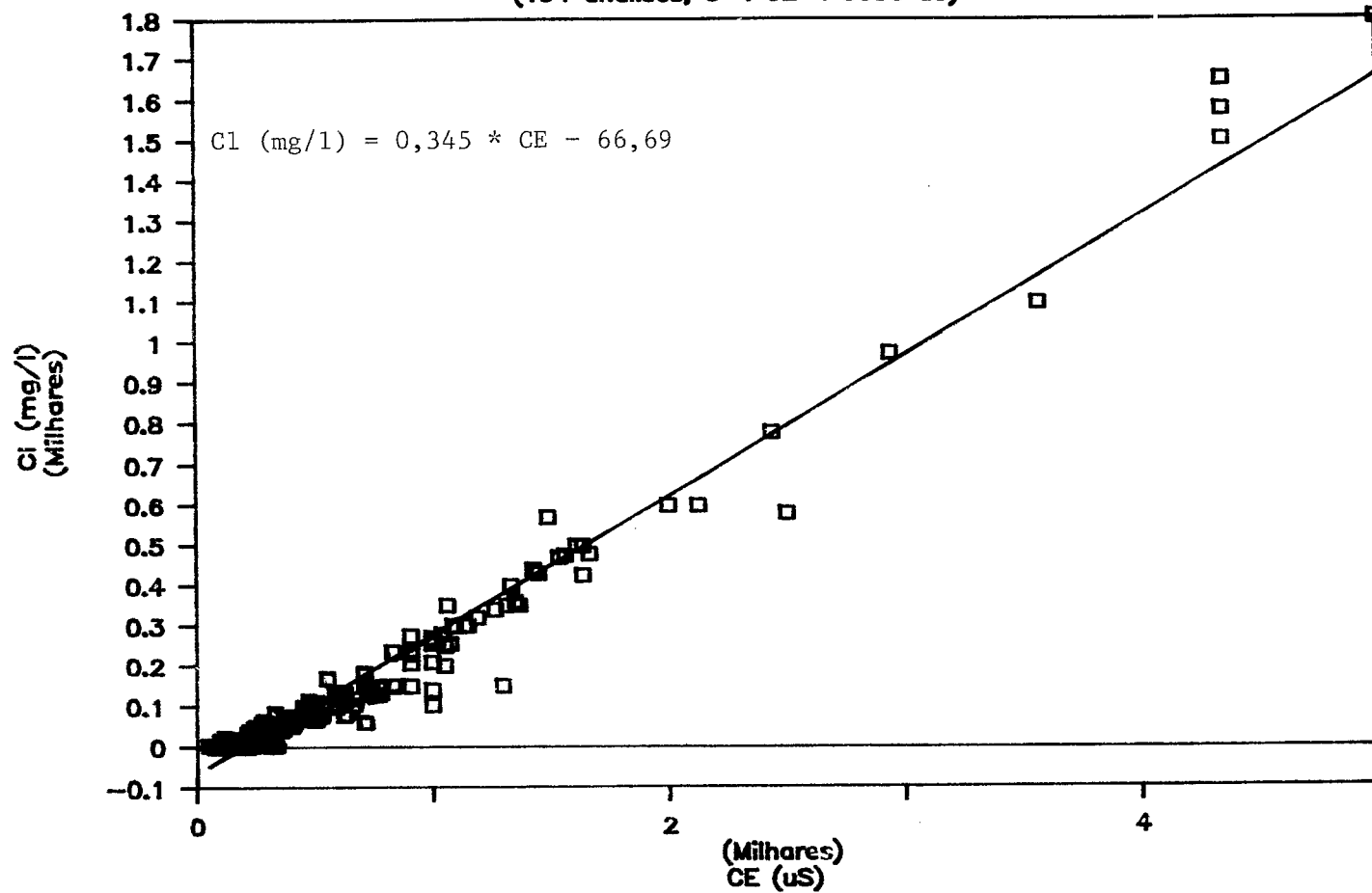


Figura 16 - Distribuição Cl - CE

DISTRIBUIÇÃO : LOG Co - LOG CE

(194 análises, 0 < CE < 5000 uS)

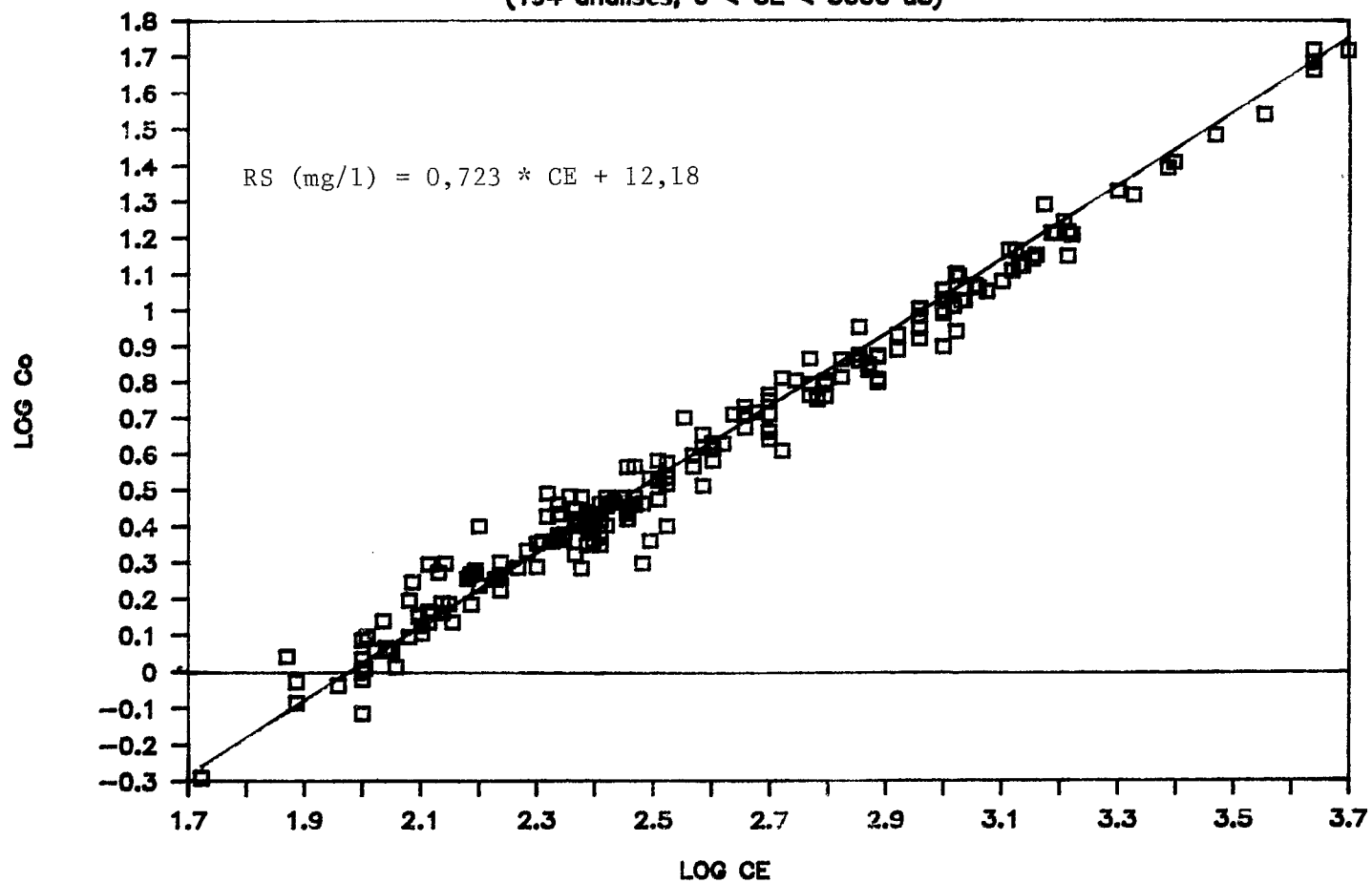


Figura 17 - Distribuição: Log Co - Log CE

DISTRIBUIÇÃO : RS - CE

(194 análises, $0 < CE < 5000 \text{ uS}$)

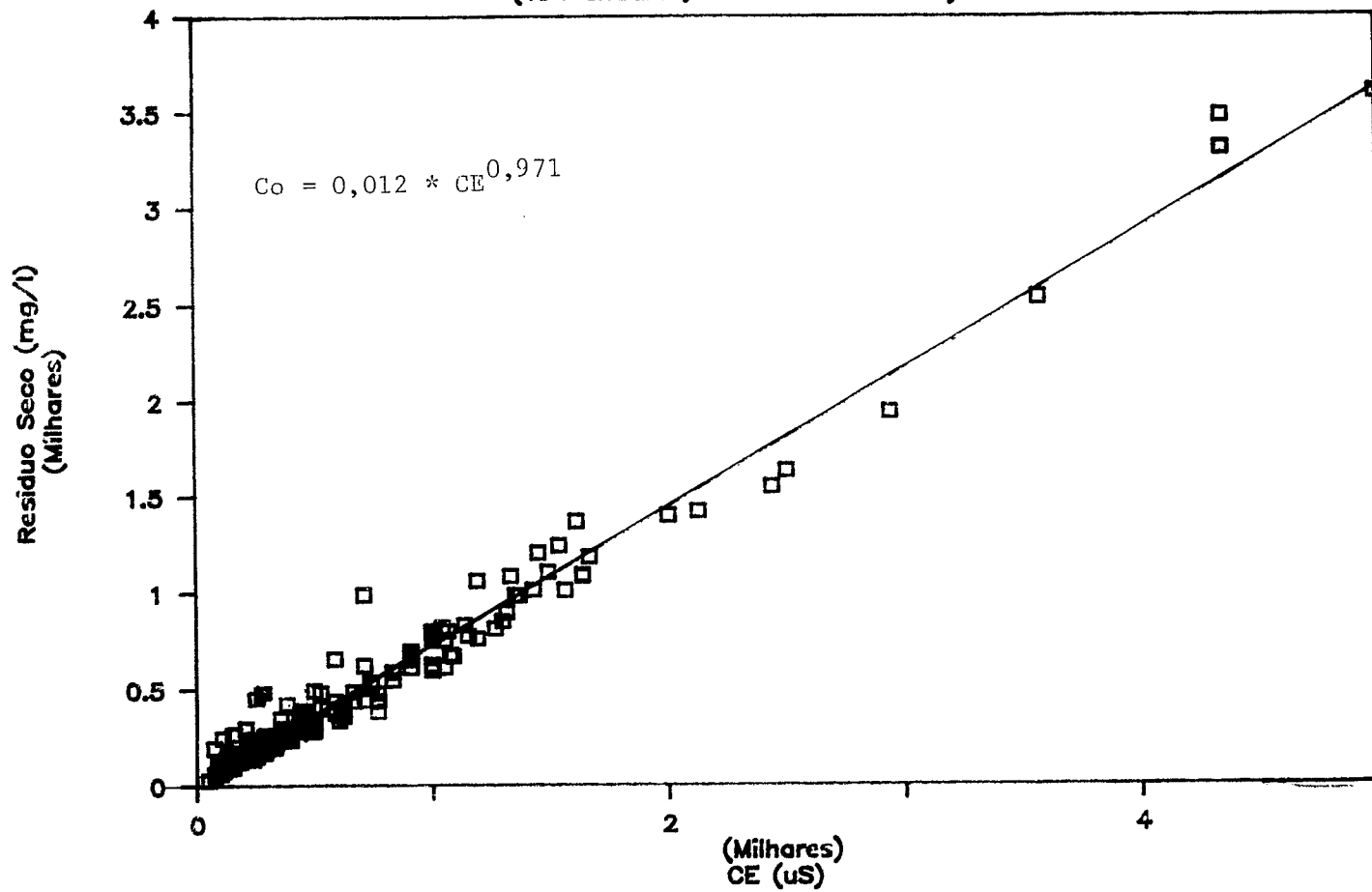


Figura 18 - Distribuição: RS - CE

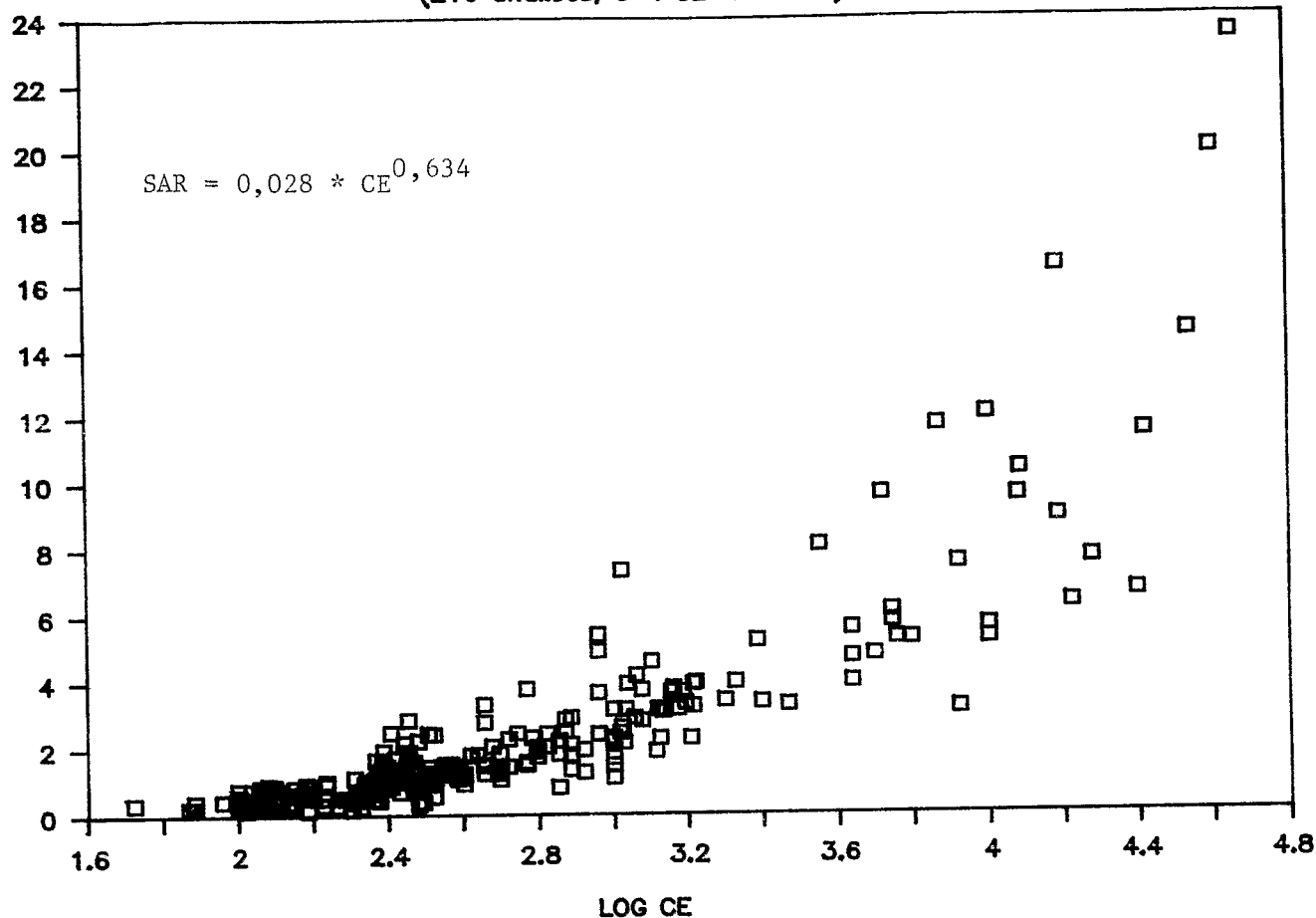
(216 análises, $0 < CE < 50000$)

Figura 19 - Distribuição: SAR - Log CE

3.5.3 - Crítica das correlações

Os coeficientes de correlação são geralmente elevados (entre 0.94 e 0.99 para a série B, salvo para a relação $SAR = f(\log CE)$). Isso indica que, a condutividade elétrica, medida no campo pode fornecer, imediatamente, uma boa estimativa das principais características químicas da água.

As relações que se referem à série B ($CE < 5.000 \mu S$ a $25^{\circ}C$), têm coeficientes de correlação superiores à amostragem total (série A), e desvios-padrão bem mais fracos.

As correlações menos precisas, obtidas no conjunto da totalidade das 216 amostras (série A), deve-se, por uma parte, à distribuição irregular das séries das condutividades; $CE < 5000 \mu S$ a $25^{\circ}C$, para 90% dentre eles, e $CE > 5000 \mu S$ a $25^{\circ}C$, para somente 10% (ver o gráfico da repartição das águas, em função das classes de condutividade do USSL, Fig. 20).

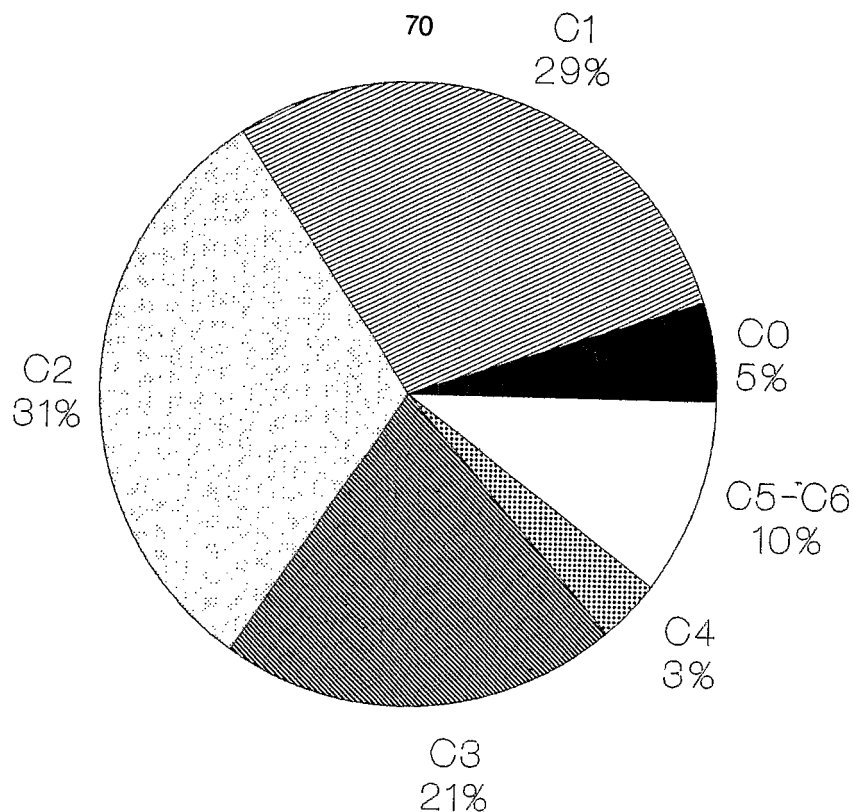


Figura 20 - Repartição das águas em função das classes de condutividades do diagrama do USSL

As altas condutividades, apesar de serem pouco representadas, têm um peso suficiente para desviar as retas de regressão, que se afastam de uma forma significativa da origem dos eixos x e y. (Isso indica uma relação não linear).

As correlações da série A, poderiam, portanto, ser aperfeiçoadas, levando-se em consideração um maior número de análises, sobretudo de águas muito carregadas.

A correlação SAR-log CE fica melhor com a maior amostragem (Série A).

3.5.4 - Determinação de uma relação regional entre a condutividade elétrica (CE) e a força iônica (I) da solução

Ressalta-se aqui, que, o modelo SIMSAL calcula a condutividade elétrica a partir da força iônica da água, por meio da seguinte equação:

$$CE = 77,85 \times I \exp(1,0162) \quad (\text{Laraque, 1988})$$

com CE em mS a 25°C

Essa correlação, foi obtida a partir da amostra "A" de 216 análises, que pode ser considerada como característica das águas dos açudes do Nordeste brasileiro semi-árido, em zona cristalina. Pode-se, certamente, aperfeiçoá-la, usando-se um processamento estatístico de amostragem maior, o que está previsto para o próximo ano de 1990, quando estarão disponíveis cerca de 500 análises de água de açudes.

Atualmente, é comum utilizar-se a fórmula de Griffin e Jurinack (1973), que foi estabelecida a partir de uma amostragem de 124 águas de rios, e 27 extratos de saturação de solo de UTAH (USA): $CE \text{ (mS a } 25^{\circ}\text{C)} = 78,74 \times I + 0,0236$.

Como se vê, é interessante regionalizar esse tipo de equação, para obter resultados mais adequados às zonas geográficas estudadas, os quais dependem do aspecto geoquímico das águas estudadas.

3.6 - Diagrama de PIPER

Aqui, igualmente, as amostras foram subdivididas em dois grupos:

- os açudes chamados comuns, cuja CE é inferior a $5000 \mu\text{S}$ a 25°C , apresentam, quanto aos cátions, águas indiferenciadas e são, do ponto de vista aniônico, bicarbonatadas cloretadas e muito pobres em sulfatos; (Fig. 21)

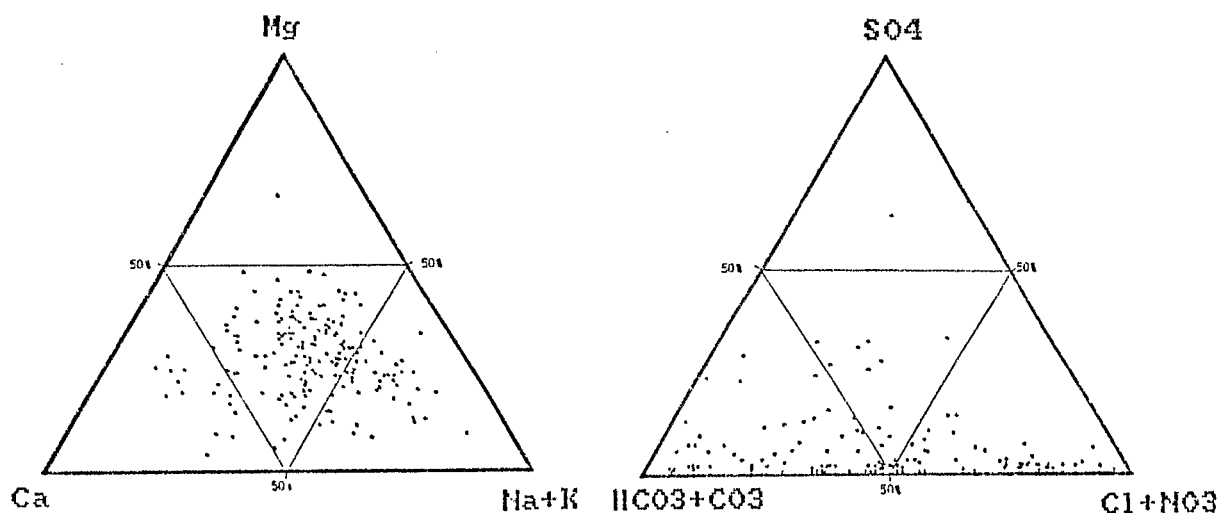


Figura 21 - Diagramas de Piper dos açudes pouco salgados (CE < $5000 \mu\text{S}$ a 25°C).

- os açudes salinizados, cuja CE é superior a $5000 \mu\text{S}$ a 25°C , têm águas alcalinas mais magnesianas do que cálcicas, muito cloretadas e muito pobres em sulfatos. (Fig. 22)

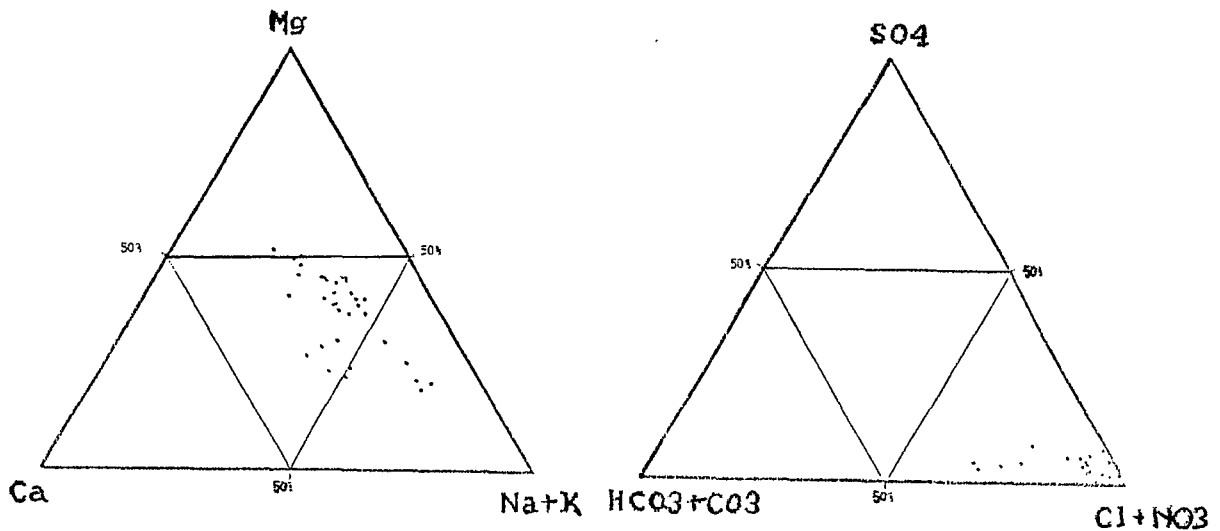


Figura 22 - Diagramas de Piper dos açudes salgados
(CE < $5000 \mu\text{S}$ a 25°C)

3.7 - Estudo bacteriológico

Todas as águas estudadas são "não potáveis", em consequência da presença, em grande número, de coliformes fecais (*Escherichia Coli*) oriundos dos rebanhos.

Todavia, pode-se recomendar o seguinte:

- construção dos bebedouros à jusante dos açudes, para tentar evitar que o gado se aproxime do açude (construção de cerca, vigia, etc.);
- orientar as populações, para efetuar uma filtragem, ou mesmo ebulição da água que será utilizada na alimentação humana.

4 - MÉTODO SIMPLIFICADO DE DETERMINAÇÃO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO DOS AÇUDES

Propomos um método simples para determinar o risco de salinização dos açudes. Este método, foi concebido para ser utilizado, no campo, pelos técnicos responsáveis pela extensão rural.

4.1 - Apresentação do método

Para avaliar a evolução das principais características químicas de um açude submetido à evaporação, devem ser cumpridas as etapas seguintes:

- a) Medir, em uma determinada data, no campo, a profundidade inicial H_i , no lugar mais profundo do açude estudado, e a sua condutividade elétrica CE_i .
- b) Calcular EVP, a lâmina de água que será evaporada até o fim da estação seca, com a ajuda, por exemplo, de estudos climatológicos regionais existentes.
- c) Calcular a condutividade elétrica CE, no final do período seco, usando um dos métodos descritos no Capítulo c.2:

Os dois métodos, utilizam o fator de concentração volumétrico da água do açude, definido por:

$$FCV = \left(\frac{H_i}{H_i - EVP} \right)^\alpha$$

sendo o coeficiente de forma do açude - (adota-se o valor de 2,7 quando não existe levantamento topográfico).

c.1) Método Clássico

Aplicar a fórmula:

$$CE_f = CE_i \times FCV$$

- c.2) Quando CE_f , obtido através do método clássico, é superior a 2000 μS , o seu valor deve ser corrigido para levar em conta eventuais precipitações e/ou absorções de sais:

- seja utilizando as equações seguintes:

$$CE_f = 184 \times FCV + 380 + 1,54 CE_i$$

com a condição

$$CE_f < CE_i \times FCV$$

- seja usando o ábaco da Figura 23 que permite aplicar graficamente estas equações. Este ábaco permite calcular o fator de concentração das condutividades elétricas

$$FCE = \frac{CE_f}{CE_i} \quad \text{a partir de } CE_i \text{ e de FCV.}$$

- d) Calcular as diversas características da água no fim do período seco, com as equações da Tabela 15 do capítulo 3.5.2.

4.2 - Caso de um açude com infiltração e/ou irrigação natural

Pode-se utilizar o mesmo método, quando se conhece com precisão, os valores dos volumes de água evaporado, infiltrado e utilizado.

Neste caso, o fator de concentração FCV, deve ser calculado da seguinte forma:

$$FCV = \frac{(\text{Vol.inicial} - \text{Vol.utilizado} - \text{Vol.infiltrado})}{(\text{Vol.inicial} - \text{Vol.utilizado} - \text{vol.infiltrado}) - \text{Vol.evaporado}}$$

Quando são desconhecidos os valores destes volumes, pode-se tentar comparar, numa primeira aproximação, a ordem de grandeza do rebaixamento real do açude com o rebaixamento teórico que deveria ter, se este açude fosse submetido unicamente à evaporação (admite-se geralmente que o rebaixamento de um açude submetido à evaporação é de 80 a 85% o valor da evaporação do Tanque classe A na mesma região - NOUVELOT e alii, 1979; MOLLE, 1989).

Em pequenos açudes, as infiltrações e/ou a utilização, podem levar a dividir por 2 ou 3, os fatores de concentrações volumétricas e, por consequência, o perigo de salinização.

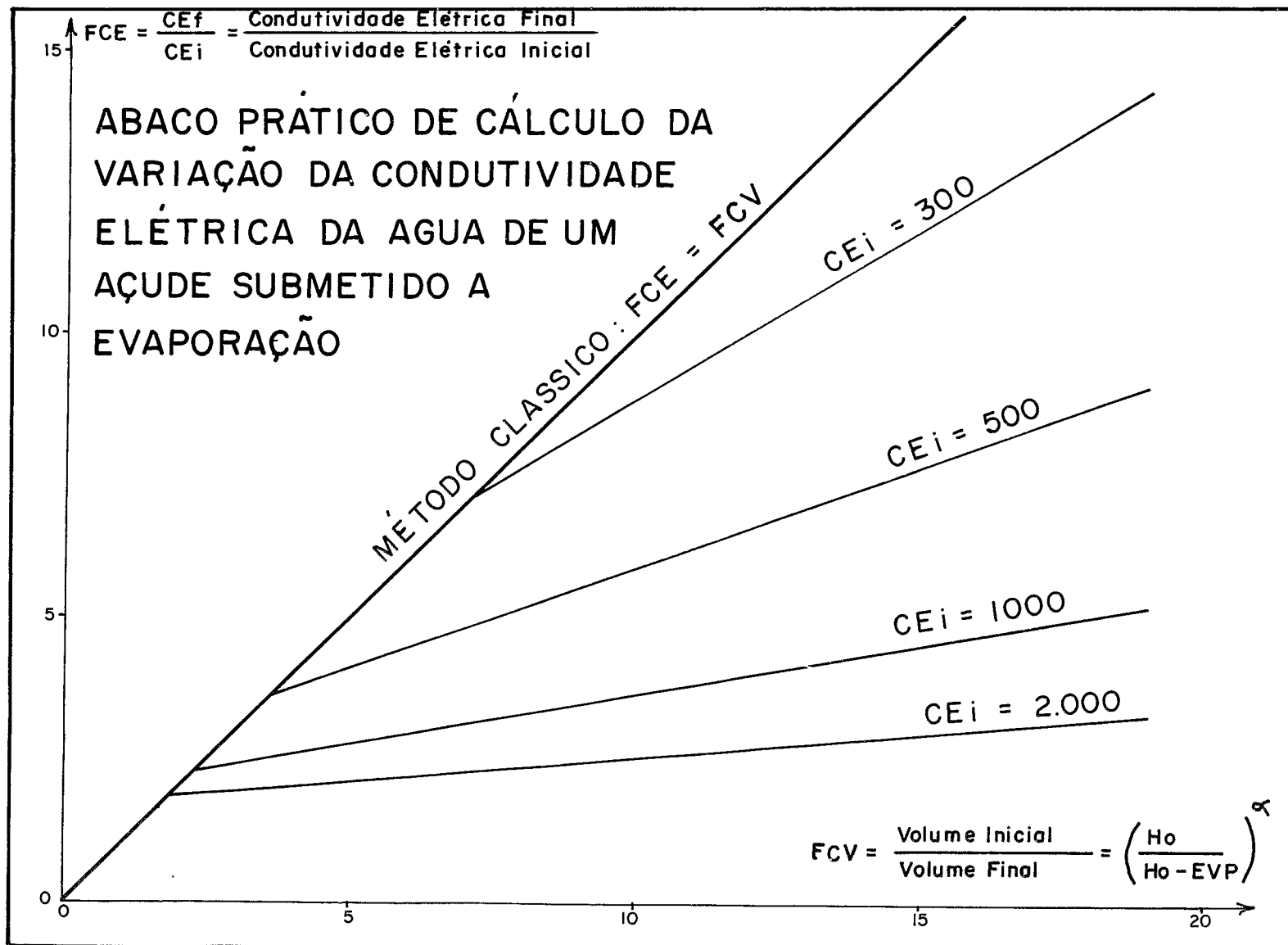


Figura 23 - Âbaco prático de cálculo da variação da condutividade elétrica da água de um açude submetido a evaporação

4.3 - Observações

A complexidade das interações entre os diversos elementos geoquímicos presentes no açude, que dependem, também de outros fatores, tais como, pH, PCO_2 , atividades orgânicas, etc. que regem as precipitações dos sais, bem como a pequena amostra de açudes monitorados, leva-nos a considerar o método prático apresentado, como um esboço de um método mais completo a ser desenvolvido.

Entretanto, o método prático apresentado, traz uma melhoria sensível em relação ao método clássico, uma vez que, corrige a superestimação das condutividades elétricas para os fortes valores da Condutividade elétrica do Fator de Concentração (FC). A imprecisão deste "método prático" é menor que a do "método clássico", mas ainda permanece elevada, e com efeito, pode conduzir, por exemplo, a erros de 30 a 40% para fatores de concentração de 2.

Entretanto, este método pode ser utilizado, para proporcionar uma ordem de grandeza da evolução provável da qualidade da água aos irrigadores, que precisam somente conhecer a classe da água, ou seja, a ordem de grandeza de CE e de SAR.

A utilização do modelo SIMSAL, mais complexa, pode diminuir esta imprecisão sem eliminá-la totalmente.

4.4 - Exemplo de aplicação prática do método simplificado

Imaginamos dois açudes fictícios (açude São Lourenço e açude da Serra) com características idênticas, a saber:

- um coeficiente de forma $= 2,7$
- uma condutividade elétrica medida no campo, no fim da estação das chuvas: $\text{CE}_i = 400 \text{ uS a } 25^\circ\text{C}$
- uma evaporação média mensal de $\text{EVPm} = 250\text{mm}$.

Esses dois açudes diferem entre si, apenas pela profundidade inicial da água, no fim da estação das chuvas:

- açude São Lourenço: $H_i = 8\text{m}$
- açude da Serra : $H_i = 4\text{m}$

4.4.1 - Resultados obtidos em um exemplo

Quais serão as principais características hidroquímicas que interessam à irrigação desses dois açudes, no fim dos 6(seis) primeiros meses da estação seca? Admitamos aqui, que os açudes não foram utilizados durante esse período.

Tendo como ponto de partida as informações , H_i , EVPm e CE_i determinaremos para cada açude, no fim de 6(seis) meses, seu fator de concentração, condutividade elétrica, SAR, concentração (em mg/l) em Na, CL, resíduo seco, e a concentração iônica da água em meq/l.

Considera-se uma lâmina evaporada de 1,50 metros, em 6 meses de estação seca: obtemos a partir do ábaco (Fig. 23) (curva = 2,7), e a partir das correlações desenvolvidas no capítulo 3.5.2 (série B para as condutividades inferiores a 5.000 uS a 25°C), a Tabela seguinte:

TABELA 14

Avaliação da evolução hidroquímica dos açudes
São Lourenço e da Serra, depois de 6 meses de seca.

FÓRMULAS	VALORES INICIAIS	VALORES FINAIS	
		Açude São Lourenço	Açude Serra
H_i inicial(m)		8	4
H_f final		6,5	2,5
$FCV = \frac{H_i}{H_i - EVP}$		1,75	3,56
$CE_f = FCV \times CE_i^*$ (uS a 25°C)	400	700	1424
$SAR = 0,014 \times CE_f^{0,748}$	1,23	1,88	3,20
$Na = 0,101 \times CE_f - 2,513$ mg/l	37,89	68,19	141,31
$Cl = 0,345 \times CE_f - 66,69$ mg/l	71,31	174,81	424,60
$RS = 0,723 \times CE_f + 12,28$ mg/l	301,48	518,38	1041,83
$Co = 0,012 \times CE_f^{0,971}$ mg/l	4,03	6,95	13,84
Classe (diagrama USSS, 1954)	C2S1	C3S1	C3S1

* CE_f sendo inferior a 2000 uS, não será necessário aplicar as correções do parágrafo 4.1/c.2.

4.4.2 - Conclusões

O açude da Serra, com nível inicial duas vezes maior que o açude São Lourenço, terá um risco de salinização global, aproximadamente, 2 vezes mais elevado, no fim de 6(seis) meses de estação seca, sem a utilização de suas águas.

Para o mesmo açude, o risco de alcalinização (SAR) será de 70,21% mais elevado.

Após 6 (seis) meses de seca, as águas do açude da Serra passam para a classe C_3S_1 e as do açude São Lourenço permanecem na classe C_2S_1 .

Esses riscos de salinização seriam, certamente, menores, se a água fosse utilizada desde o fim da estação das chuvas, exportando sais à jusante do açude.

Daí, o interesse de construir açudes nos talvegues profundos, o que terá como consequência, aumentar o seu poder de resistência à salinização.

5 - CONCLUSÃO/PERSPECTIVA DE ESTUDO

Depois do trabalho sintético efetuado por LEPRUN (1983), sobre a qualidade das águas de mais de 300 amostras de águas de açudes, o presente estudo, mais detalhado, tem por objetivo, abranger as características hidroquímicas das águas, sua evolução espaço-temporal e, também, identificar os fatores que influem em sua qualidade.

Resumimos, a seguir, os principais resultados e conclusões do presente estudo que, lembramos, tinha como objetivo principal, a elaboração, a curto prazo, de regras práticas de dimensionamento e de manejo de pequenos açudes, do ponto de vista da qualidade da água e dos riscos de salinização:

5.1 - Resultados obtidos

- a) A amostragem dos açudes observados permite cobrir, praticamente, todo o acervo de variações existentes;
- b) os modelos de simulação desenvolvidos, funcionam de maneira satisfatória e permitem reconstituir e, portanto, prever, a evolução das concentrações em sal dos açudes sob a influência da evaporação.
- c) Propomos um método simples para determinar o risco de salinização dos açudes. Para utilizar este método é necessário medir, no campo, a condutividade elétrica da água e a profundidade do açude, no início ou durante o período seco, e conhecer a lâmina de água que será evaporada. Um conjunto de equações permite determinar, depois, as principais características hidroquímicas das águas, necessárias para conduzir corretamente a irrigação: classe da água, SAR, CE, resíduo seco, concentração em Na, Cl, etc., para qualquer data ulterior. Este método, de utilização simples, foi concebido para ser utilizado, no campo, pelos técnicos responsáveis pela extensão rural.
- d) As relações entre a química dos solos e das rochas da bacia de alimentação e a qualidade das águas do açude, são complexas e necessitariam pesquisas complementares (tais como o estudo da qualidade das águas de escoamento, em diferentes tipos de solo e o relacionamento da qualidade da água com o dimensionamento da parede, o uso dessa água e a presença do sedimento no fundo do açude). No entanto, certo número de classes de risco, já podem ser evidenciadas.

e) Apresentamos conselhos práticos para o manejo e o dimensionamento dos açudes e perímetros irrigados:

- evitar superdimensionar os reservatórios, em relação às superfícies das Bacias Hidrográficas de drenagem (o superdimensionamento favorece as concentrações salinas plurianuais), quando existem problemas de salinização, recomendam-se açudes de volume inferior ao escoamento mediano (ou seja, aproximadamente a metade do escoamento médio anual); estes açudes sangrarão um ano sobre dois;
- evitar as bacias hidrográficas cobertas com solos dos tipos Planossolos solodizados, Solonetz, Podzólicos, Eutróficos, que produzem muito sal;
- antes de qualquer projeto de irrigação, sempre levar em conta a salinidade da água, através da medição, "in situ", da condutividade elétrica;
- efetuar análises de solo dos perímetros de irrigação para conhecer sua sensibilidade ao risco de alcalinidade (SAR), assim como sua permeabilidade, a fim de poder dimensionar a rede de drenagem;
- drenar sempre os perímetros irrigados e administrar periodicamente doses de irrigação suplementares, para lixiviar os solos e assegurar um fluxo de água permanente para o sub-solo e a rede de drenagem;
- utilizar o máximo de água possível no início da estação seca, quando as concentrações são ainda fracas;
- instalar "descargas de fundo", sobretudo quando os açudes têm mais de 5 metros de profundidade e já estão salinizados, para eliminar, preferencialmente, as águas do fundo desses açudes que estão mais carregadas de sais.

5.2 - Estudos e pesquisas que deverão ser desenvolvidas

Esse estudo, iniciado em 1987, sobre trinta açudes, mostrou a complexidade do fenômeno de transferência de sais dentro do sistema "Bacia Hidrográfica + açude + perímetro irrigado" e revelou, também, um certo número de lacunas e questionamentos, que limitaram a precisão dos métodos propostos.

Respostas parciais sobre estas questões, poderão ser encontradas graças a programas de pesquisa específicos, a serem desenvolvidos sobre alguns açudes bem equipados, e tratarão de:

- A Bacia Hidrográfica

Embora seja difícil encontrar as coberturas pedológicas homogêneas, em uma só bacia hidrográfica, seria interessante procurar, e estudar, pequenas bacias homogêneas, algumas delas situadas em cada um dos principais solos existentes no Nordeste. Isso permitirá a quantificação, mais precisa, de suas influências específicas sobre a qualidade da água de escoamento.

No laboratório pode-se pensar em filtração de coluna de solo por água destilada, para avaliar o papel do solo sobre as águas de infiltração.

Um estudo sobre um grande conjunto de açudes, poderia permitir, através de uma análise estatística, uma estimativa do papel da geomorfologia da bacia hidrográfica (superfície, relevo, vegetação, rede de drenagem, solo, etc.) e seu manejo (cultivos), sobre o risco de salinização do açude.

- O Açude

É importante tentar medir, com maior precisão (graças aos isótopos, por exemplo), a parte infiltrada de cada açude, e de ter uma boa identificação dos volumes de entrada e saída de água do açude (com a ajuda de um linígrafo no riacho principal na entrada do açude e um outro colocado no sangradouro).

Também, precisa-se definir a importância dos fatores que provocam a salinização (geometria do açude, dimensionamento, histórico, interação dos sedimentos com a água, pedologia, geologia, morfologia da bacia de escoamento, etc.).

No laboratório, pode-se estudar a condutividade hidráulica dos sedimentos e as variações físico-químicas, provocadas pela percolação da água do açude.

Seria necessário estudar, também, a carga sólida e a sedimentação nos açudes, para avaliar seu tempo de vida e aperfeiçoar o modelo SIMSAL, calibrando-o sobre um número maior de açudes.

Parece oportuno, continuar o estudo começado em 1987, para ampliar a amostragem de açudes estudados e conhecer melhor as variações interanuais da evolução hidroquímica dos açudes. Essas observações, dentro de um maior espaço de tempo, permitiriam, provavelmente, evidenciar alguns fatores que influem sobre a qualidade da água e que são, dificilmente, detectáveis em observações a curto prazo (como a influência dos sedimentos, etc.).

Acima de tudo, revela-se importante uma colaboração multilateral entre geólogos, pedólogos, hidroquímicos e hidrólogos.

A N E X O S

A N E X O 1

SUMÁRIO DOS AÇUDES ESTUDADOS

Sumário dos açudes estudados

Nº	PROJETO	LOCAL		UF	CATE- GORIA
12*	Pedro Alcântara	- Faz. Cachoeira	Sítio dos Nunes	PE	
14*	Raimundo A. muniz	- Faz. Almas	Terra Nova	PE	
2*	Manoel A. Arruda	- S. São Gonçalo	Catolé do Rocha	PB	
10*	Pedro Alves da Costa	- Sta. Isabel	Catolé do Rocha	PB	
8*	José Alves da Silva	- Saco do André	Jericó	PB	PP
16	Fazenda Tamanduá	- Açude Conceição	Sta. Terezinha	PB	
17	Fazenda Tamanduá	- Açude Tamanduá	Sta. Terezinha	PB	
4*	Cícero Bezerra da Costa	- Pai Bastião	Caicó	RN	
6*	Cícero Pereira	- Sítio Bonito	Caicó	RN	
18	Paulo Gomes Barreto	- Fazenda Ramada	Barcelona	RN	
20	Pedro F. Campos	- Faz. Riacho Fundo	Barcelona	RN	
22	Geraldo Suassuna	- Faz. Campos Novos	S.P. do Potengi	RN	BM
24	Aroldo de Sá Bezerra	- Faz. Bonanças	S.P. do Potengi	RN	
26	Candido B. Cavalcanti	- Faz. Divisão	Riachuelo	RN	
36*	Açude Novo		Sumé	PB	
87*	Marmeleiro Velho	- Faz. Firmeza	Sumé	PB	
88*	Marmeleiro Novo	- Faz. Firmeza	Sumé	PB	
89*	Açude B.R. 412		Sumé	PB	
91*	Açude Sacada		Sumé	PB	
92*	Jaçana	- S.Posto do Boi	Sumé	PB	
90	Riacho Jatobá		Monteiro	PB	BHR
85	Açude Jatobá		Monteiro	PB	
86	Açude Uruçú		Monteiro	PB	
94	Riacho do Meio		Monteiro	PB	
28*	Açude Moquem		Tauá	CE	
30	Açude Luzimar		Tauá	CE	
32	Açude Chico		Tauá	CE	
34*	Açude Açudinho		Tauá	CE	
74*	Sítio Riacho do Boi		Cumaru	PE	
72*	Sítio Lagoa da Esmera		Bezerros	PE	
52	Faz. São Pedro		Caruaru	PE	AS
58	Rio Batinga		Belo Jardim	PE	
68*	Faz. Caianinha		Sanharó	PE	

* 18 açudes totalmente equipados e estudados.

Legenda das Categorias de Projetos:

PP	=	Projetos Piloto de Irrigação	:	9 açudes
BM	=	Projetos do Banco Mundial	:	5 açudes
BHR	=	Bacias Hidrográficas Representativas da SUDENE	:	14 açudes
AS	=	Açudes Salinizados	:	5 açudes
TOTAL GERAL = 33 açudes; vistoriados em agosto de 1988.				

A N E X O 2

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇUDES PERNAMBUCANOS

Classificação dos açudes Pernambucanos
levantados em agosto de 1987

CLASSIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE em uS a 25°C)				CLASSIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DA PEDOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA			
CE	Clas -se	Município	Pedologia da bacia hidrológica	Pedologia da bacia hidrológica	CE	Clas -se	Município
107	C1	Sítio dos Nunes	RE + Re		600	C2	Caruaru
145,1	C1	Sertânia	NC + Re	Re + AF	030	C3	Caruaru
230	C1	Cruz. do Norte	RE + Re		11.080	C6	Sanharó
600	C2	Caruaru	Re + AF		107	C1	Sit. Nunes
830	C3	Caruaru	Re + AF	Re + RE	230	C1	Cruz. Norte
1112	C3	Limoeiro	PL		1.600	C3	Cruz. Norte
1343	C3	São Caetano	PL		9.000	C5	Pesqueira
1582	C3	Pesqueira	RE + Re + PL	Re + RE + PL	1.582	C3	Pesqueira
1600	C3	Cruz. do Norte	RE + Re		14.100	C6	Belo Jardim
1820	C3	Altinho	PL + Re + AF		1.820	C3	Altinho
2160	C3	São Caetano	PL + Re + AF	Re + PL + AF	2.160	C3	S. Caetano
3830	C4	Pesqueira	PL + Re + AF		3.830	C4	Pesqueira
8200	C5	Bezerros	PL + AF		11.420	C6	Belo Jardim
9000	C5	Pesqueira	RE + Re		9.400	C5	Cumaru
9400	C5	Cumaru	PL + PE + Re	PL	1.112	C3	Limoeiro
11.080	C6	Sanharó	RE		1.343	C3	S. Caetano
11.420	C6	Belo Jardim	PL + Re		8.200	C5	Bezerros
14.100	C6	Belo Jardim	RE + PL + Re	NC	145	C1	Sertania
15.780	C6	Caruaru	PE	PE	15.780	C6	Caruaru

Legenda : AF . Afloramento de rocha PL . Planossolo
 NC . Bruno-não-cálcico RE . Regossolo
 PE . Solo Podzólico Re . Solo Litólitico

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARDINO, J. de C. & MILLO, H.L. Dados climatológicos básicos do Nordeste. Recife, SUDENE. 1984. 56 p. il.
- CADIER, E. - & FREITAS, B.J. Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanha 73/80. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 180 p. il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 14) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- _____. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN, 1984. 75 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- _____. : FREITAS, B.J.; LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 87 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 16) "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
- CARMOUZE, J.P. La régulation hydrogéochimique du Lac Tchad. Paris, Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 58. 1976. 418 p.
- ESTADOS UNIDOS Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of Saline and alkali soils. Utah, 1969. 169 p. (Agriculture Handbook, 60).
- GALINDO, Carlos Alberto P.M. Bacia Representativa de Tauá: campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN, 1980. 75 p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 9). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- GRIFFIN, R.A. & JURINACK, J.J. Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soils extracts. Logan, Soil Science, Utah State University. Vol. 110 (126):30, 1973.
- HELGESON, H.C. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, Evanston, Illinois 60201, Department of Geology, Northwestern University (267):, 720 - 801, 1969.
- LEPRUN, J.C. Primeira avaliação das águas superficiais do Nordeste Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE, 1983. 91 - 141 p. Convênio SUDENE/ORSTOM.
- _____. ; ASSUNÇÃO, M.S.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-químicas. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 70 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 15) "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
- LARAQUE, A. SIMSAL: Um modelo de previsão da salinização dos açudes do Nordeste brasileiro. Recife, 1989. Trabalho que será apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 1989.

- LINS, M.J.A. Bacias Representativas de Tauá. Relatório de campanha 1980/82. Recife, SUDENE-DRN, 1984. 81 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 19) "Convênio SUDENE/ORSTOM"
- MATSÚI, E. Origem e dinâmica de salinização da água do Nordeste brasileiro. Bacia do Rio Pajeú - PE. Piracicaba, ESALQ. 1977. 122 p. Tese de doutorado.
- MOLLE, F. Potencialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier, França, 1985. 142 p..
- _____. Evapotranspiração - Evaporação do tanque classe A - Evaporação nos pequenos açudes: Variações e correlações. Recife, 1989. Trabalho que será apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Irrigação. Foz do Iguaçu, 1989.
- _____.; MEDEIROS, R.D.; DOHERTY, R.; LARAQUE, A. & OLIVEIRA, S.A. de. Perdas por infiltração nos pequenos açudes. Recife, 1989. Trabalho que será apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 1989.
- MONTOROI, J.P.; RIEU, M. Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse. Programme Active pour IBM-PC et compatibles. Paris. Cahiers ORSTOM, série pédologie, vol. XXIII, n° 2. 1987.
- NOUVELOT, Jean-François, FERREIRA, P.A.S., CADIER, E. Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE-DRN, 1977. 28 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- PIOGER, R. Ressources en eau du Nord-Est du Brésil. Les eaux pluviales. Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du NordEst. FAO. Epta Programme. Recife, SUDENE. 1964. 185 p.
- RIEU, M. Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. Paris. H.S. ORSTOM. 1983. 161 p.
- SALATI, E.; LEAL, J. de M.; CAMPOS, M.M.; Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrológico do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE/DRN. 1979. 55 p.
- SANTIAGO, M.M.F. Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. Piracicaba, ESALQ. 1984. 176 p. Tese de Doutorado.
- STOFF, R. Balanço de água e cloro no açude Quebra-Unhas(PE) utilizando as variações naturais das concentrações 180, D e CL-. ESALQ. Piracicaba - São Paulo, 1977. 122 p.

- MATSÚI, E. Origem e dinâmica de salinização da água do Nordeste brasileiro. Bacia do Rio Pajeú - PE. Piracicaba, ESALQ. 1977. 122 p. Tese de doutorado.
- MOLLE, F. Potencialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier, França, 1985. 142 p..
- _____. Evapotranspiração - Evaporação do tanque classe A - Evaporação nos pequenos açudes: Variações e correlações. Recife, 1989. Trabalho que será apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Irrigação. Foz do Iguaçu, 1989.
- MOLLE, F.; MEDEIROS, R.D.; DOHERTY, R.; LARAQUE, A. & OLIVEIRA, S.A. de. Perdas por infiltração nos pequenos açudes. Recife, 1989. Trabalho que será apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 1989.
- MONTOROI, J.P.; RIEU, M. Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse. Programme Active pour IBM-PC et compatibles. Paris. Cahiers ORSTOM, série pédologie, vol. XXIII, n° 2. 1987.
- NOUVELOT, Jean-François, FERREIRA, P.A.S., CADIER, E. Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE-DRN, 1977. 28 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- PIOGER, R. Ressources en eau du Nord-Est du Brésil. Les eaux pluviales. Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du NordEst. FAO. Epta Programme. Recife, SUDENE. 1964. 185 p.
- RIEU, M. Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. Paris. H.S. ORSTOM. 1983. 161 p.
- SALATI, E.; LEAL, J. de M.; CAMPOS, M.M.; Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrológico do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE/DRN. 1979. 55 p.
- SANTIAGO, M.M.F Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. Piracicaba, ESALQ. 1984. 176 p. Tese de Doutorado.
- STOFF, R. Balanco de água e cloro no açude Quebra-Unhas(PE) utilizando as variações naturais das concentrações $180, D$ e Cl^- . ESALQ. Piracicaba - São Paulo, 1977. 122 p.

Publicações da série: Brasil.SUDENE.Hidrologia*

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

* Estas publicações encontram-se à disposição dos usuários na Biblioteca da SUDENE.

- 11 - ZELAUQUETT, Gisnaldo José. Bacia Representativa de Açu: relatório de instalação e campanha 1978/79/80. Recife, SUDENE-DRN, 1981. 85 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 11). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 12 - LINS, Maria José A. Bacia Representativa de Ibipeba: campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN, 1982. 59 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 12). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 13 - ASSUNÇÃO, Moisés S. de Bacia Representativa de Ibipeba: campanha 79/80. Recife, SUDENE-DRN, 1982. 59 p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 13). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 14 - CADIÉ, E. & FREITAS, R.J. Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanha 73/80. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 180 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 15 - LEPRUN, J.C.; ASSUNÇÃO, M.S.; CADIÉ, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 70 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 15). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 16 - CADIÉ, E.; FREITAS, B.J.; LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 87 p. 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, 1984. 71 p. (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, 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, 1984. 87 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 20).
- 21 - CADIÉ, E. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN, 1984. 75 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "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, 1985. 137 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 23).
- 24 - HERBAUD, J.J.M.; MAGALHÃES, F.X. de; E. CADIER & CAVALCANTE, N.M. da C. Bacia Hidrográfica Representativa de Juatama-CE. Relatório Final. Recife, SUDENE/DPG/PRN; 1989. 163p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 24) . "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- 25 - MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE/DPG/PRN, 1989. 175p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 25). "Convenio SUDENE/ORSTOM".

GRAFSET – Gráfica e Editora Ltda.
Praça da Independência, 109 - Tambiá - Fone: (083) 241.1210 - João Pessoa – PB

