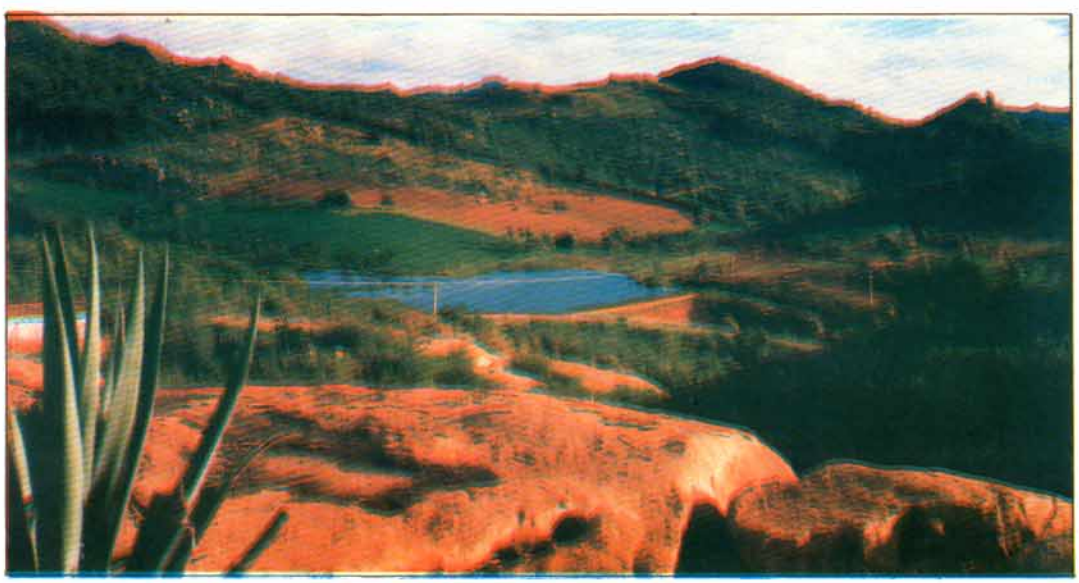
Sudene

ORSTOM

HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE SEMI-ÁRIDO

TRANSPOSIÇÃO HIDRÓLOGICA

Eric Cadier



Série Hidrologia / 31

RECIFE - 1994

GOVERNO DO BRASIL
MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO REGIONAL
SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE

Ministro Chefe
Aluizio Alves

Superintendente
Gen. Nilton Moreira Rodrigues

Superintendente Adjunto
Leonides Alves da Silva Filho

Diretoria de Planejamento
Telúrio Homem de Siqueira Cavalcanti (Diretor)

Departamento de Recursos Naturais
Geraldo de Azevedo Gusmão (Coordenador)

Divisão de Hidrometeorologia
Aldemar de Araujo Santos (Chefe)
Benedito José Zelaquett Seraphim (Coordenador do Projeto)

Coordenadoria de Cooperação Internacional
Isabel Favero (Coordenadora)

Apoio Administrativo:

Diretoria de Administração
José Luiz de Oliveira Azevedo Júnior (Diretor)

Ministério da Integração Regional

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

Diretoria de Planejamento
Departamento de Recursos Naturais
Divisão de Hidrometeorologia

Coordenadoria de Cooperação Internacional

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

Missão ORSTOM do Recife

HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE SEMI-ÁRIDO

"TRANSPOSIÇÃO HIDROLÓGICA"

Eric Cadier

Recife, 1994

Série: Brasil SUDENE. Hidrologia Nº. 31
Publicação elaborada no âmbito do convênio SUDENE/ORSTOM - França

Cadier, Eric.
Hidrologia das Pequenas Bacias do Nordeste Semi-Árido: Transposição Hidrológica/ Eric Cadier. Recife: SUDENE, DPG. PRN. HME, 1994.
448p. (Hidrologia, 31)

Convênio SUDENE/ORSTOM

1. HIDROLOGIA - PEQUENAS BACIAS - NORDESTE I. Série - II. SUDENE, ed. III. Título.

CDU 551.579 (812/813)

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

HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE BRASILEIRO

SUMÁRIO

Resumo 5
Agradecimentos 9
Prefácio 11
Introdução 13

1. **Contexto natural e história da hidrologia das pequenas bacias** 15
   1.1 Contexto natural do nordeste do brasil 15
   1.2 Histórico da hidrologia das pequenas bacias do nordeste 33

2. **Técnicas hidrológicas utilizadas** 50
   2.1 Poblemática e especificidade da hidrologia das pequenas bacias 50
   2.2 Conceitos e esquemas atuais da hidrologia das pequenas bacias. resumo bibliográfico. 58
   2.3 Técnicas utilizadas no Nordeste brasileiro 63

3. **Descrição das bacias hidrográficas representativas implantadas no Nordeste brasileiro** 87
   3.1 Bacia representativa de TAUÁ 88
   3.2 A Bacia representativa de SUMÉ 109
   3.3 A bacia representativa do RIACHO DO NAVIO 134
   3.4 A Bacia representativa de JUATAMA 154
   3.5 Bacia representativa de IBIPEBA 167
   3.6 Conclusão da terceira parte: 181

4. **Transposição dos escoamentos anuais** 185
   4.1 Objetivos e estratégia 185
   4.2 Modelização hidrológica das pequenas bacias hidrográficas representativas do nordeste 189
   4.3 Escolha dos pluviômetros para a transposição espacial 211
   4.4 A Redução das chuvas 233
   4.5 Tipologia das bacias 239
   4.6 Utilização dos dados da rede geral 274

5. **Transposição das características das cheias** 317
   5.1 Compilação bibliográfica correspondente às cheias 318
   5.2 Método, objetivo e estratégia 321
   5.3 Informação disponível 323
   5.4 Fórmulas propostas para a transposição das cheias nas zonas cristalinas 326
   5.5 Discussão: os fatores corretivos das cheias 335

Conclusão geral 347

ANEXOS
Anexo 1 Dimensionamento dos açudes 375
Anexo 2 Informações existentes a respeito das outras bacias representativas 401
Anexo 3 Funcionamento do modelo SUDENE/ORSTOM com séries pluviométricas da África 417
Anexo 4 Glossário 421

Bibliografia 423

Sumário detalhado 440

Relação das Figuras 441

Relação das Tabelas 442

HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE BRASILEIRO

RESUMO

O conhecimento e a utilização dos recursos em água é de importância vital em toda a região semi-árida do Nordeste brasileiro, que cobre mais de 800.000 km^2. Por isto, há cerca de trinta anos, que se vem procedendo ao monitoramento e análise do comportamento hidrológico de várias dezenas de pequenas bacias experimentais, escolhidas para representar os principais tipos de bacias.

Constata-se uma grande diversidade de regimes das diferentes bacias, agravada por uma irregularidade climática extrema.

Uma modelização hidrológica sistemática permitiu identificar duas grandes zonas climáticas, Sertão e Transição, no interior das quais, cada 100 mm de chuva suplementar provoca um aumento de 40% dos escoamentos médios anuais. Uma tipologia das bacias foi estabelecida em função, principalmente, das características dos solos e da cobertura vegetal.

Propomos um método de transposição dos resultados obtidos para as bacias carentes de informação hidrológica. Este método permite uma estimativa simples dos recursos em água e das vazões de pico das cheias em função dos solos, da pluviometria média da bacia e de outros fatores corretivos.

Uma versão em brasileiro do presente trabalho está disponível na SUDENE.

Palavras-chaves :

- ***Nordeste brasileiro***
- ***Bacia representativa/experimental***
- ***Modelo hidrológico***
- ***Tipologia de bacias***
- ***Transposição hidrológica***
- ***Escoamento anual***
- ***Cheia de projeto***

HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS DU NORDESTE SEMI-ARIDE BRÉSILIEN

RÉSUMÉ

La connaissance et l'utilisation des ressources en eau est d'une importance vitale dans toute la partie semi-aride du Nordeste brésilien, qui couvre plus de 800.000 km^2. Pour cela, depuis près de trente ans, on a entrepris le suivi et l'analyse du comportement hydrologique de plusieurs dizaines de petits bassins versants représentatifs, choisis pour représenter les principaux types de bassins.

On constate une grande diversité des régimes hydrologiques, aggravée par une irrégularité climatique extrême.

Une modélisation hydrologique systématique a permis d'identifier deux grandes zones climatiques, Sertão et Transition, à l'intérieur desquelles, chaque 100 mm de pluie supplémentaire provoque un accroissement de 40% des écoulements moyens annuels. Une typologie des bassins a été établie en fonction, principalement, des caractéristiques des sols et de la couverture végétale.

Nous proposons une méthode de transposition des résultats obtenus vers des bassins dépourvus d'information hydrologique. Cette méthode permet une estimation simple des ressources en eau et des débits de pointe des crues en fonction des sols, de la pluviométrie moyenne du bassin et d'autres facteurs correctifs.

Une version en brésilien de ce travail est disponible à la SUDENE.

Mots clés :

- ***Nordeste brésilien***
- ***Bassin représentatif/expérimental***
- ***Modèle hydrologique***
- ***Typologie de bassins***
- ***Transposition hydrologique***
- ***Ecoulement annuel***
- ***Crue de projet***

HYDROLOGY OF SMALL WATERSHED OF THE BRAZILIAN NORTH-EAST

SUMMARY

A knowledge and utilization of water resources is of vital importance for the semi-arid region of the brazilian north-east, which include more than 800,000 km^2.. This is why, since more than 30 years ago, it has been carried out the monitoring and analysis of the hydrological behavior of several dozens of small experimental watersheds, selected to represent several types of watershed.

A great diversity of regimes for several watersheds was confirmed, which became worse with extreme climatic irregularities.

A systematic hydrological simulation allowed to identify two big climatic zones, "Sertao" and "Transition", were, for each 100 mm of supplementary rainfall 40 % of the average annual runoff take place. Watershed typology was established in relation, basically, of soil characteristics and vegetal cover.

It is proposed one method of transposition of obtained results for those watersheds with lack of hydrological information. This method allows a simple estimation of water resources and pick flood discharge as a function of soils, of the average rainfall on the watershed and from others corrective factors.

A portuguese translation of the present work has been published by SUDENE.

Key words :

- ***Brazilian north-east***
- ***Representative / experimental watershed***
- ***Hydrological model***
- ***Typology of the watersheds***
- ***Hydrological transposition***
- ***Annual runoff***
- ***Project flood***

AGRADECIMENTOS

Esta síntese é o resultado de um trabalho coletivo de aproximadamente trinta anos de colaboração entre o ORSTOM (França) e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste do Brasil (SUDENE).

Temos que reconhecer a cooperação de todos e a lista, a seguir, testemunha a diversidade e a importância das contribuições.

* Citamos, inicialmente, a equipe pioneira que realizou os primeiros estudos de pequenas bacias no Vale do Jaguaribe: DUBREUIL, CAMPELLO, HERBAUD, GIRARD, LEDUC e PAULO VARELA. Sem a qualidade de seu trabalho, este programa de cooperação teria sido encerrado definitivamente em 1966.

* Agradecemos aos dirigentes da SUDENE e do ORSTOM, que apoiando este programa, proporcionaram os recursos humanos e financeiros necessários: José Luís Peres GARRIDO e Leonides Alves de SOUZA, Diretores da Diretoria de Planejamento Global, na SUDENE, e DUBREUIL, POUYAUD e MONIOD, responsáveis no ORSTOM; Sylvio CAMPELLO, Geraldo GUSMÃO e Marcelo BARROS, Coordenadores do Departamento de Planejamento de Recursos Naturais da SUDENE e todos os responsáveis que estiveram à frente da equipe encarregada do estudo das bacias hidrográficas representativas: Benedito Zelaquett SERAPHIM, Pedro A. SANGUINETTI e Humberto VIEIRA

* Os hidrólogos que trouxeram sua contribuição, suas idéias e dividiram o peso desses estudos: J.F.NOUVELOT, que foi o verdadeiro pioneiro desse programa, M.S.CAMPELLO que desenvolveu sua tese no âmbito desses estudos, J.M.HERBAUD, M.MOLINIER e B.SERAPHIM que trouxeram suas experiências e seus conhecimentos do Nordeste. Agradecemos, igualmente, a toda a equipe de técnicos hidrólogos da SUDENE, cujo profissionalismo e competência permitiram as instalações e medições no campo, assim como o processamento e a análise de mais de 3.500 estações x anos de observação: Beronildo J. de FREITAS, Breno MAIA, Carlos Alberto GALINDO, Francisco das CHAGAS, Francisco ROLIM, Gisnaldo ZELAQUETT, Maria José LINS, Moisés ASSUNÇÃO, Nice CAVALCANTE, Paulo Frassinete ARAÚJO, Roberto CARNEIRO LEÃO, Alcides FREITAS, Crenivaldo VELOSO, Edilton M. das MERCÊS, Edivaldo MENEZES, Henrique RANGEL, Ivaldo G. da SILVA, Ivalter V. de SENA, Ivo QUEIROZ, Joabel V. de ANDRADE., João Maria CORTES, Josué G. dos SANTOS, Mário ACIOLI, Mário Lúcio MENDONÇA, Neide FERREIRA, Paulo H. NASCIMENTO, Pedro SALVADOR, Paulo VARELA, Tiago N. VARELA e Vera Lúcia ALVES.

* Os pedólogos do ORSTOM ou da EMBRAPA que complementaram o indispensável conhecimento do comportamento hidrodinâmico dos solos: J.C.LEPRUN iniciou esse trabalho e Flávio H.BARRETO deu prosseguimento, superando o espaço que separa essas duas disciplinas. O diálogo foi enriquecedor para as duas partes, e a contribuição dos pedólogos é uma das bases do método de transposição hidrológica.

* A equipe jovem e dinâmica de informáticos e modelizadores permitiu conceber, gerir e explorar modelos e sistemas utilizando o Banco de Dados da SUDENE: Peter PUNGS foi o primeiro, seguido de Carlos Henrique ALBUQUERQUE, Roberto DOHERTY, Marc MONTGAILLARD, Luciana PEREIRA, Cynthia A.CARVALHO e Daniela V. de ALMEIDA que souberam aliar competência, eficácia e bom humor.

* A equipe do projeto de Tecnologia Aplicada à Pequena Irrigação (TAPI) da Cooperação Francesa, com a qual construímos frutuosa associação, congregando pesquisadores e usuários que nos levaram, sempre, a reformular e a simplificar nossas técnicas e apresentação de nossos resultados, a fim de poder responder às questões concretas dos usuários: J.L.MILLO e M.LEFEBURE DU BUS foram os primeiros, seguidos por R.COURCIER e E.SABOURIN.

* Enfim, F.MOLLE, cujo espírito pesquisador e criativo, presença sempre amiga e estimulante catalizaram, durante cinco anos, um questionamento permanente de toda sorte de verdades, rico em surpresas e em ensinamentos. Sem ele, não teríamos empreendido a elaboração do Manual do Pequeno Açude, o qual se tornou, por sua vez, determinante na decisão de elaborar a síntese hidrológica que apresentamos aqui.

* Maria José B.CAVALCANTI, com muita eficiência, realizou a tradução e digitação do presente documento. Contamos, também, com o apoio e a competência de Rosana A.SOARES, Célia M.de MOURA, e Maria Ivanize e SOUZA.

* Nosso particular agradecimento aos hidrólogos B. SERAPHIM e M.S.CAMPELLO, que além de nos apoiar durante todos esses anos, no caso específico da presente síntese, tiveram a melhor boa vontade, ao realizar sua revisão.

* Enfim, agradecemos de maneira relevante aos membros do Juri desta tese: O Prof. BOCQUILLON, MM B. POUYAUD, J. C. LEPRUN, S. CAMPELLO e J. F. NOUVELOT como tambem a todos os amigos, professores e colegas que nos trouxeram sua ajuda e competência permitindo a finalização deste trabalho em MONTPELLIER: J. P. DEBUICHE, A. DEZETTER, Fabienne MONTGAILLARD, F. DELCLAUX, J. M. FRITSCH, M. SUAVIN, P. CHEVALLIER, P. RIBSTEIN, P. RAOUS, R. CHARTIER, Y. LHOTE e P. HISARD, assim como ao Laboratório de Hidrologia, dirigido por G. JACCON onde fomos acolhidos.

PREFÁCIO

Uma escola de pensadores que eu ousaria qualificar de mecanicista e curiosa, tem-se esforçado, há vários decênios, em penetrar o relativo mistério do "acontecer" das precipitações quando elas caem sobre o solo e ocasionam a infiltração e o escoamento.

Essa escola, alimentada sobretudo pela cultura anglo-saxônica, empenhou-se, usando locais experimentais muito sofisticados, sob o ponto de vista dos equipamentos meteorológicos, em coletar dados capazes de apoiar raciocínios de representação simulada dos fenômenos hidrológicos acima citados.

Modelos, cada vez mais complexos em suas estruturas de representação, fizeram a glória de autores americanos, australianos, britânicos, neolandezes e sul-africanos e, reconheçamo-lo, desenvolveram o conhecimento da gênese dos escoamentos em pequenas superfícies hidrográficas.

Essa gênese revela-se bastante simples quanto aos mecanismos que a constituem, porém, apresenta-se de uma extrema diversidade e de uma riqueza insuspeita quando se procura comparar, entre regiões diferentes, os fenômenos hidrológicos, tanto no que se refere à amplitude relativa quanto à gama dos valores quantitativos que eles apresentam.

Uma outra escola de pensadores, que gostaria de rotular como mais empírica, embora determinista e pragmática, resolutamente se empenhou na missão de tentar avaliar, com fins práticos, os grandes traços dos fenômenos hidrológicos de bacias com pouca ou nenhuma medição e isso a partir de alguns locais experimentais equipados de maneira mais simples.

Eric Cadier coloca-se resolutamente nesta segunda escola, a qual se ufana de ter contribuído para o desenvolvimento da grande família dos hidrólogos do ORSTOM, fundada por Jean Rodier, e cujo maior objetivo foi e é, o de ajudar o progresso das regiões menos desenvolvidas de nosso planeta.

Face ao slogan "*sempre conhecer mais*", da escola experimentalista, sobrepõe-se o desejo da escola pragmática de "*melhor transpor a informação*" para regiões não conhecidas.

Eric Cadier desenvolve, concomitantemente, um trabalho de historiador, de enciclopedista e de analista!

Historiador, porque integra inteligentemente, ao mesmo tempo, os conhecimentos mais evidentes adquiridos da escola fisicista e os resultados do período africano da escola pragmática.

Enciclopedista, porque conseguiu, além da semelhança histórica, reeditar a proeza africana agora empreendida em outro continente, o Brasil, onde, sendo ele o último elo de uma grande equipe franco-brasileira, reúne, paciente e logicamente, quinze anos de observações de quarenta locais escolhidos e elabora uma síntese com tranquilidade e segurança.

Analista, porque, incessantemente apoiando-se sobre elementos das duas escolas, classifica e ordena os escoamentos, relacionando-os às grandes características do clima e do meio ambiente.
Finalmente, o que ele nos quer demonstrar?

Que a diversidade e a irregularidade dos fenômenos hidrológicos são infinitamente maiores no Nordeste brasileiro do que na África.

Que apesar disso se pode, com a ajuda de alguns parâmetros simples de acesso e de algumas fórmulas igualmente fáceis de manuseiar, estimar, com uma margem de erro aceitável, os valores desses fenômenos em função do meio ambiente.

Mas que a chave da diversidade está na complexidade das associações de solos e de coberturas vegetais e que essa complexidade se recusa, ainda, a uma classificação baseada sobre índices numéricos e só aceita ser aproximada para ser descrita por um especialista: o pedólogo ou o ecologista.

Portanto, só pode haver um aperfeiçoamento dos conhecimentos da gênese dos escoamentos: **através da conjugação de esforços de hidrólogos, pedólogos e ecologistas.**

Desde o início, Eric Cadier estava consciente dessa realidade.

Assim, Eric Cadier conseguiu reunir uma soma de conhecimentos novos e consistentes que são uma contribuição relevante para o desenvolvimento do Nordeste brasileiro, imenso e empobrecido, ainda no aguardo de reais descobridores, e cuja simpatia de seu povo me mantém ligado por tantas lembranças que, ainda hoje, me fazem sentir "saudade".

Fevereiro de 1992.

Pierre Dubreuil

INTRODUÇÃO

As tentativas que efetuamos em 1979 para utilizar os resultados da primeira síntese hidrológica da bacia representativa do RIACHO DO NAVIO causaram grandes desapontamentos. Percebeu-se que apesar de se ter contado com uma rede de mais de 70 instrumentos observados durante sete anos, e de todas as medições de características físicas e morfológicas recomendadas (mapa pedológico, densidade de drenagem, etc.), não se podia compreender e, a fortiori, extrapolar os resultados para uma bacia vizinha. A decepção foi grande, porque essa extrapolação ou transposição constituía a finalidade e a principal justificativa desse programa.

Devíamos, pois, submeter-nos a várias evidências:

a) Para poder transpor resultados hidrológicos dever-se-ia dispor de uma **amostragem de numerosas bacias** para cobrir a diversidade das situações possíveis.

b) Cada uma das bacias deveria ser representativa, da maneira mais clara possível, de **situações-tipos**. Isso implica a escolha de bacias homogêneas e muitas vezes pequenas.

c) Para que os resultados das diferentes bacias fossem comparáveis entre si, necessitar-se-ia observar protocolos de medição e de tratamento dos **dados que pudessem ser reproduzidos com segurança** e portanto muito precisos. As técnicas de modelização constituem um bom meio de corrigir as variações climáticas do período observado.

d) É também fundamental que os **protocolos de avaliação dos caracteres físicos, biológicos e morfológicos** das bacias hidrográficas sejam muito rigorosos para poder servir de base para essa transposição. O estado da vegetação e das primeiras camadas do solo são determinantes. **Impõe-se a participação de pedólogos.**

A continuidade do programa buscou sempre seguir esses princípios. A análise e a compreensão dos mecanismos hidrológicos a nível do perfil pedológico e da vertente foram bastante facilitadas pelos conselhos de J.C. LEPRUN que nos ajudou na elaboração, em 1983, do primeiro esboço do método de transposição das lâminas anuais escoadas.

Em 1990, em conseqüência da coleta de grande número de informações novas, **esse método foi modificado**. Sua utilização foi simplificada permitindo aos usuários, que, geralmente, não são especializados em hidrologia, obter uma primeira estimativa do recurso em água, de sua variação e da descarga de pico da cheia de projeto, para bacias desprovidas de informação hidrológica. A intervenção de hidrólogos e de pedólogos, aliada à existência de informações complementares, poderá ser utilizada com proveito para aperfeiçoar a precisão dessa primeira estimativa.

Esta síntese empenha-se, primeiramente, em descrever os estudos e as informações hidrológicas que foram recolhidas. Em seguida, esforça-se por retraçar o caminho seguido para elaborar o método de transposição proposto.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

No **primeiro capítulo** descrevemos rapidamente o contexto físico e climático do Nordeste brasileiro, domínio da pesquisa e tentamos esboçar um histórico dos estudos de pequenas bacias, nessa região.

No **segundo capítulo** esforçamo-nos em abranger os aspectos teóricos, a problemática e a especificidade dos estudos hidrológicos de pequenas bacias, abordando mais especialmente os problemas da planificação desses estudos. As técnicas de estudo efetivamente utilizadas no Nordeste são, em seguida, descritas e colocadas nesse contexto.

O **terceiro capítulo** descreve as bacias representativas estudadas e resume os principais resultados que foram obtidos, indicando a contribuição específica de cada bacia aos conhecimentos dos mecanismos hidrológicos desta região.

O **quarto capítulo** mostra e justifica as diferentes etapas da elaboração do método de transposição dos escoamentos anuais.

- Uma tipologia das pequenas bacias é proposta, em primeiro lugar, em função das características dos regimes hidrológicos. Essa tipologia apóia-se, por um lado, sobre uma modelização sistemática da relação chuva-deflúvio e, por outro lado, sobre um zoneamento climático geral do Nordeste.
- A análise do papel e da influência dos diferentes fatores condicionantes dos regimes (solos, relevo, vegetação, etc.), aliada à utilização da informação originária da rede geral hidropluviométrica, permitiu estabelecer as bases do método de transposição procurado.
- Este método, em seguida, é adaptado às condições específicas das pequenas bacias e, naturalmente, validado.

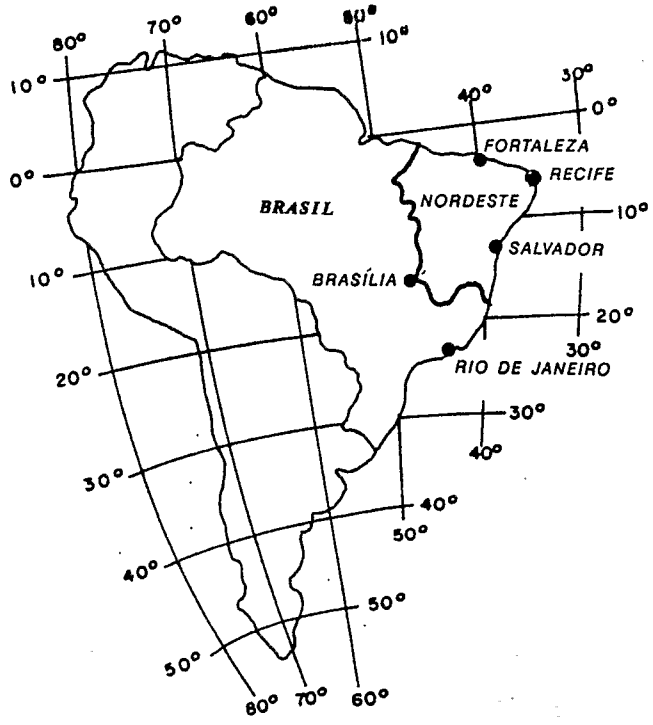
O **quinto capítulo** apresenta, enfim, as diferentes etapas de elaboração de uma fórmula de cálculo da descarga de pico da cheia de projeto. Sua simplicidade decorre de três motivos:

- A pequena variabilidade das características dos fortes aguaceiros em todo o Nordeste.
- A fraca ocorrência, nas regiões estudadas, de zonas com relevo muito fraco que tornam necessária a utilização de outras fórmulas.
- O pequeno tamanho da amostra de bacias que nos obrigou a limitar-nos a uma fórmula que representa o limite superior das descargas que se deve temer.

PRIMEIRA PARTE

1. CONTEXTO NATURAL E HISTÓRIA DA HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS

1.1 CONTEXTO NATURAL DO NORDESTE DO BRASIL



Administrativamente, a área de atuação da SUDENE, compreende a totalidade de nove Estados: Maranhão, Piaui, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e o norte do Estado de Minas Gerais, ocupando uma superfície de 1.600.000 km^2, isto é, 20% do território brasileiro. O maior de todos os Estados é a Bahia com seus 561.000 km^2, e o menor deles é Sergipe com, apenas, 21.994 km^2.

Um anticiclone, quase permanente, detém-se sobre a parte central do Nordeste, impelindo o equador térmico na direção norte e provoca, finalmente, fraqueza e sobretudo uma grande irregularidade nas precipitações, aliás, anormais nessas latitudes. O "Polígono das Secas" ocupa perto de 1.000.000 km^2, ou seja, a maior parte do Nordeste, com exceção das faixas litorâneas e continentais ocidentais, mais úmidas.

Fig.1.1 : Mapa de situação do Nordeste brasileiro

O Nordeste é uma região cuja população é das mais antigas do Brasil e possui grande riqueza cultural herdada da colonização. Mais de quarenta e cinco milhões de habitantes povoam, atualmente, o Nordeste (IBGE, 1991) e vinte milhões, dentre eles, vivem no *polígono das secas*. Trata-se, em sua maioria, de pequenos proprietários e de camponeses sem terra.

O SERTÃO DO NORDESTE BRASILEIRO

Prancha 1



Uma zona semi-árida, pouco povoada, voltada para a criação de gado



A água pode ser armazenada



Mais deve ser manejada e utilizada

As grandes zonas fisiográficas

O Nordeste pode ser dividido em três grandes zonas fisiográficas e climáticas bem diferentes.

A **zona costeira estreita** e úmida ou "***Zona da Mata***", onde se encontram grandes centros urbanos, estende-se do norte do Estado do Rio Grande do Norte até o sul do Estado da Bahia. Antigamente, esta zona era recoberta pela grande floresta equatorial úmida, hoje geralmente substituída pela monocultura da cana de açúcar ou do cacau e por formações vegetais secundárias, como as savanas arbóreas e matas. A formação geológica principal é constituída de arenitos e de argilas arenosas de origem continental chamada "*Barreira*". Os solos dominantes são os Latossolos e os Podzólicos amarelo-vermelho. O clima é tropical quente e úmido, influenciado pelos ventos alísios. A pluviometria varia de 1.200 a mais de 2.500 mm por ano, em média. A estação das chuvas se estende de março a setembro. A umidade relativa ultrapassa 85% durante todo o ano.

A zona ***Agreste*** situa-se imediatamente a oeste da zona da **Mata**. É uma zona intermediária entre a zona úmida precedente e o Sertão, mais seco. Aí se cultivam frutas e legumes, dando-se grande importância à criação do gado bovino. Passa-se das florestas do litoral a formações herbáceas e arbustivas. A formação geológica sedimentar - *Barreira* - precedente vai diminuindo em direção oeste, desaparece e deixa, então, aflorar as rochas cristalinas do embasamento précambriano. Os solos, do tipo Podzólico medianamente espesso sobre o sedimentar, são substituídos por solos pouco espessos, mais ricos em minerais sobre o embasamento cristalino.

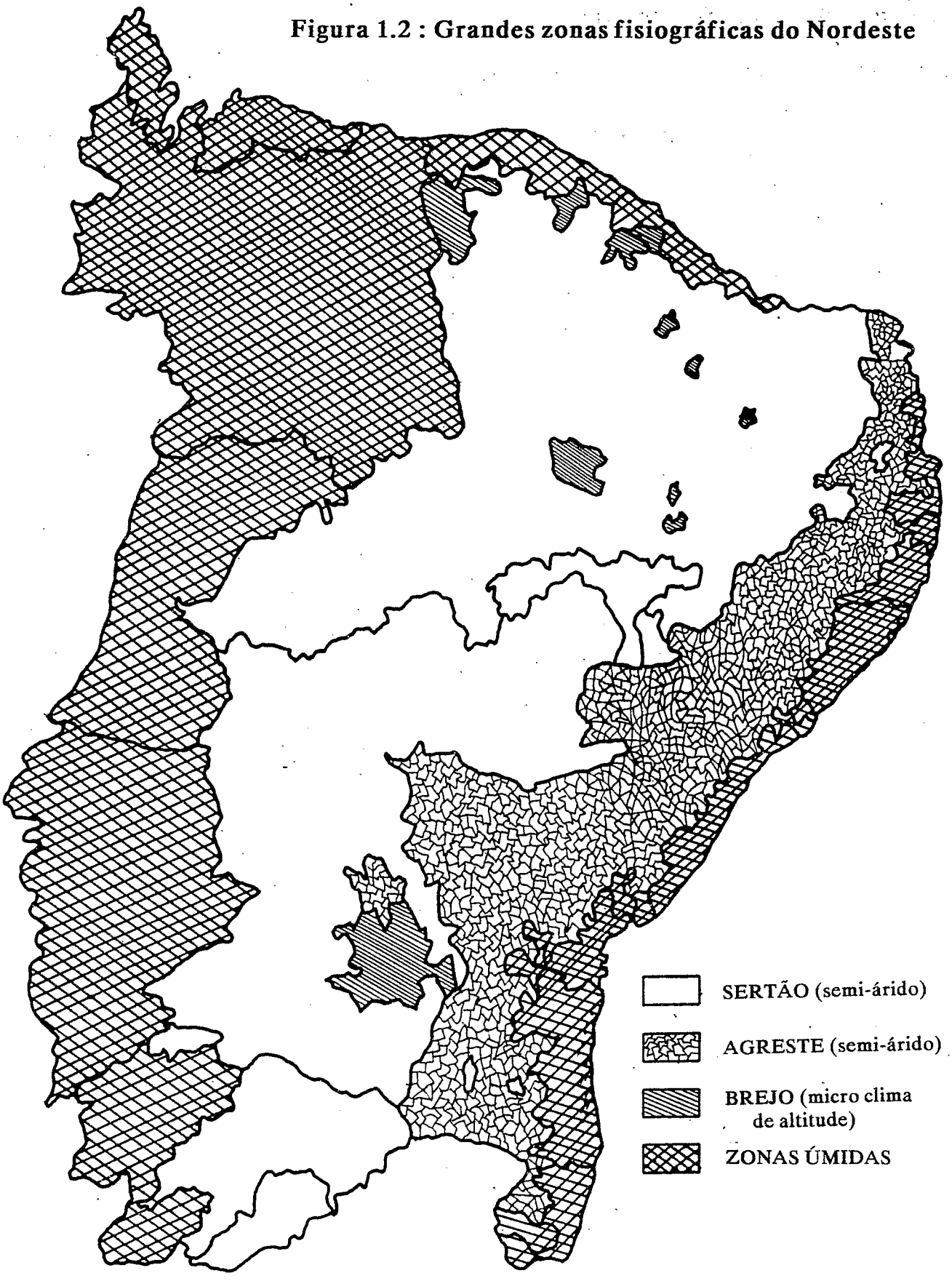
A terceira zona é o ***Sertão*** propriamente dito. A vegetação original, a "**caatinga**" é composta de espécies xerófilas e espinhosas, de estrato herbáceo gramíneo raro ou ausente. O relevo pouco ondulado é às vezes dominado por inselbergs e com raras planícies interiores sobre o embasamento précambriano, em forma de grandes tabuleiros ou "chapadas" constituídas de formações sedimentares. Os solos da zona cristalina do Sertão são Brunos não Cálcicos, Vertissolos, Planossolos, Litossolos, Regossolos e solos Podzólicos. Quando o sub-solo é de origem sedimentar desenvolvem-se Cambissolos e Latossolos.
O clima semi-árido é caracterizado por uma pluviometria média anual que varia de 400 a 800 mm. A criação de gado bovino é a atividade dominante do Sertão. Somente 5% da terra é cultivada para a subsistência.

Mencionaremos, a título de lembrete, a zona **pré-amazônica** úmida chamada "*meio norte*", situada a oeste da zona estudada (Sertão).

A figura 1.2 mostra os principais tipos característicos de ocupação do solo das grandes zonas geográficas.

Apresentaremos, de maneira mais detalhada, os mecanismos do clima e das precipitações, os solos e a vegetação que são, como veremos, os fatores explicativos principais dos regimes hidrológicos nessas zonas secas.

Figura 1.2 : Grandes zonas fisiográficas do Nordeste



1.1.1 Os mecanismos do clima. Por que existe uma zona seca?

> *"A média das precipitações no Nordeste e sua variabilidade interanual constitui um dos grandes desafios não resolvidos da meteorologia tropical" (MOURA e SHUKLA, 1981)*

Poder-se-ia esperar que o Nordeste brasileiro gozasse da abundância das precipitações comuns nas regiões equatoriais. Constata-se, ao contrário, uma fraqueza e uma irregularidade anormais para essas latitudes sobre uma superfície de aproximadamente um milhão de km^2, na qual os totais anuais médios são inferiores a 800 mm, podendo, algumas vezes, ficarem abaixo de 400 mm.

A irregularidade das precipitações é muito forte. Os coeficientes de variação dos totais anuais são sempre superiores a 0,25, ultrapassando algumas vezes 0,40. Na bacia experimental de SUMÉ o total de 1983 foi apenas 248 mm, enquanto que o de 1985 atingiu 1.438 mm!

As principais precipitações acontecem em épocas diferentes nas diversas partes do Nordeste:

. De fevereiro a abril, na parte Norte do Sertão.
. Em dezembro, na parte Sul do Sertão.
. Em abril-junho, na Zona da Mata e no Agreste.

Por que as fracas precipitações e essa irregularidade no Sertão? O problema é complexo. Vários autores dedicaram-se aos seus diversos aspectos.

Deslocamento das zonas frontais que provocam as precipitações.

Os esquemas das figuras 1.3 e 1.4 mostram, na escala do continente Sul-Americano, as posições das principais frentes responsáveis pelas precipitações.

Vê-se nas figuras, a seguir, que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (chamada algumas vezes, Frente Intertropical - FIT), corresponde, igualmente, ao que alguns autores chamam equador térmico, é deslocada para o Nordeste. O deslocamento das duas zonas de convergência da figura 1.3 está ligado ao anticiclone semifixo do Atlântico Sul. Esta figura 1.3 mostra bem a origem diferente das chuvas que acontecem, em épocas diferentes, na parte Norte e Sul do Sertão e que provêm, seja da ZCIT seja de uma frente fria procedente da zona de convergência frontal do Atlântico Sul.

A figura 1.4 mostra como uma frente fria pode atingir a latitude, anormalmente fraca, de 10^oS.

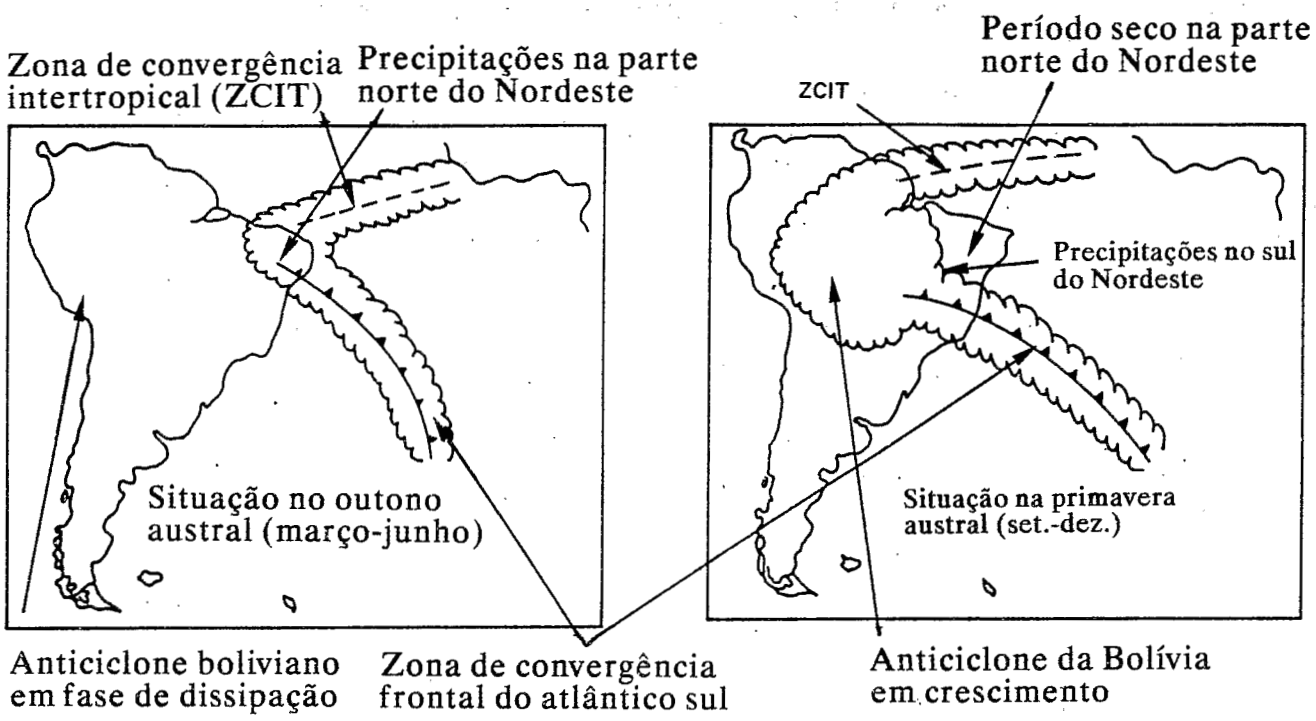
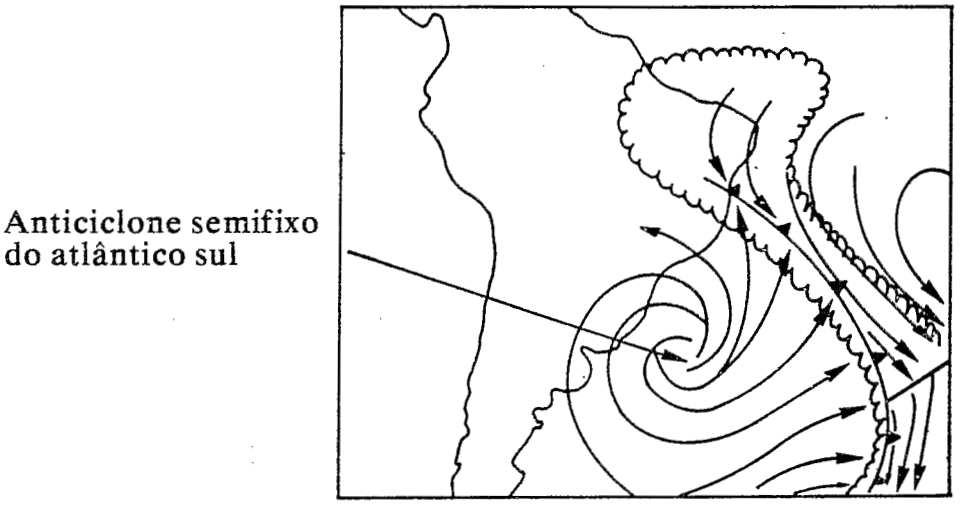


Figura 1.3 : Esquema de interação da ZCIT com as outras zonas de convergência.



Condições de aparição de uma frente fria no sul do Nordeste segundo Kousky e Moura (1981)

Figura 1.4 : Condições de aparição de uma frente fria no Sul do Nordeste, *segundo KOUSKY e MOURA.*

Os quatro principais sistemas de perturbações

NIMER (1973) identificou quatro sistemas principais de perturbações. Poder-se-ia esquematizar e dizer que as zonas mais secas, situadas na parte central do Nordeste, são as mais dificilmente atingidas por essas perturbações, seja por causa de sua distância ou por causa do relevo que impede a passagem dessas perturbações. O efeito da orografia e a proximidade do mar vêm, evidentemente, se superpor localmente aos quatro sistemas mencionados.

Essas perturbações podem vir de quatro direções diferentes que correspondem, aproximadamente, aos quatro pontos cardiais.

- **O sistema de perturbações do norte** provocadas pelo deslocamento da zona de convergência intertropical (ZCIT) que se encontra em uma latitude média de 5^{o} N. Seus efeitos se fazem sentir sobretudo entre janeiro e maio, com uma máxima em março-abril. Este sistema de perturbações é o principal responsável pelas precipitações em toda a metade norte do Polígono das secas, onde se observa uma máxima anual único das precipitações entre março e abril.

- **O sistema de perturbações provenientes do oeste**, cuja origem parece ligada ao movimento ondulatório que aparece quando a frente polar atlântica entra em contato com as massas de ar quente da zona tropical. Essas perturbações sobrevêm sobretudo entre setembro e abril e provocam trovoadas e chuvas do tipo monção na metade sul do Polígono das Secas.

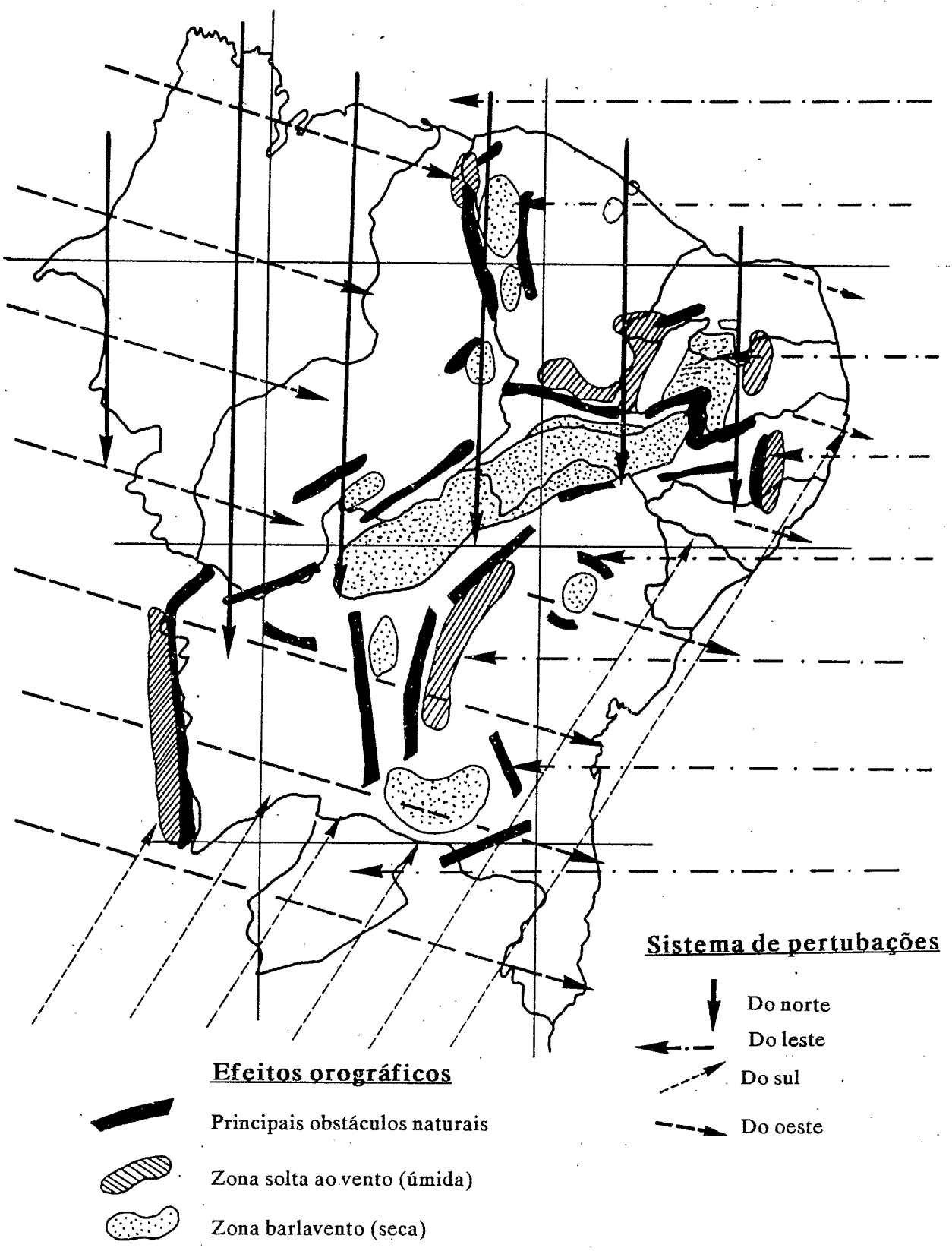
- **O sistema de perturbações provenientes do este**, isto é, do Oceano Atlântico, atingem a Zona da Mata e o Agreste, mas, não chegam jamais ao Sertão. Essas precipitações sobrevêm durante o outono e o inverno austral, isto é, entre os meses de março e agosto.

- **O sistema de perturbações do sul**, devidas a invasões do ar polar, provocam chuvas frontais. Estas perturbações só atingem o Nordeste na sua parte sul e em julho-agosto, ultrapassando apenas, raramente, o paralelo $15^{o}S$. A zona central do Sertão jamais é atingida por essas perturbações.

Algumas teorias e explicações.

As razões profundas da existência de uma zona seca nessa região não parecem claramente elucidadas. Deve-se isso, como o supõem CHARNEY (1975) e GOMES FILHO (1979) ao efeito de uma automanutenção da zona árida, devido a um "albedo" elevado? Ou ainda ao fato de que esta região está próxima da convergência dos alísios? Ou ainda por que está submetida, por sua posição, à influência de uma espécie de prolongamento continental do anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul? Ou, talvez, simplesmente, por que as zonas frontais, que acabamos de descrever, só atingem raramente essa parte do continente sul-americano? As hipóteses e teorias são numerosas, porém as certezas são raras.

Figura 1.5 : Os sistemas de circulação atmosférica e os principais efeitos orográficos.



Recentemente MECHOSO *et al* (1990) por um lado e HASTENRATH (1990) por outro lado, estudaram, respectivamente, o papel representado pelas anomalias térmicas do oceano nas variabilidades das chuvas no Nordeste do Brasil e as possibilidades assim oferecidas de poder prever com vários meses de antecedência a abundância das chuvas. Este assunto foi abordado, desde 1977, por HASTENRATH e HELLER (1977) e por MARKHAM e McLAIN (1970), depois por MOURA e SHUKLA (1981) que notaram que, em situação de déficit pluviométrico, as anomalias térmicas na superfície do Oceano Atlântico eram geralmente negativas ao sul do Equador e positivas ao norte (fenômeno conhecido como "dipole" térmico). Esta hipótese foi testada no período de 1964-1979 por SERVAIN (1985) e SERVAIN *et al* (1990). Paralelamente, efetuou-se uma pesquisa aprofundada das condições da circulação atmosférica geral responsável pelas precipitações no Nordeste do Brasil, diferenciando uma região Norte mais sensível ao movimento de migração Norte-Sul da Zona de Convergência Intertropical de uma região sul mais sujeita aos fatores condicionantes das precipitações nos sistemas frontais no Atlântico Sul (CHU, 1983; KOUSKY, 1985).
Outros estudos, desde CAVIEDES (1973) tentam situar a variabilidade interanual das chuvas do Nordeste brasileiro, em função do fenômeno El Niño e mais precisamente do El Niño - oscilação austral (em inglês ENSO para EL NINO - SOUTHERN OSCILLATION). Esta correlação mais ou menos direta foi confirmada estatisticamente por ROPELEWSKI e HALPERT (1989). Em seguida às situações térmicas e pluviométricas muito contrastantes dos anos de 1983 e 1984, HISARD (1990) tentou avaliar de que forma os grandes "El Niño" históricos, documentados por MOLINIER e CADIER (1984-1985) tinham sido efetivamente associados a uma situação de seca acentuada no Nordeste do Brasil, como foi o caso em 1983. A anomalia pluviométrica parece estender-se ao conjunto da bacia equatorial até as costas de Angola e do Congo, assinalando, mais uma vez, o caráter planetário (célula de circulação de WALKER, Oscilação Austral) dos fatores que condicionam a pluviometria do Nordeste do Brasil.

1.1.2 As precipitações

■ Os totais anuais

As isoietas do mapa 1.6, embora bem reduzidas, ilustram a repartição das chuvas anuais médias no Nordeste.

A isoieta de 800 mm delimita uma superfície de 950.000 km^2 corresponde ao *polígono das secas* que cobre 60% da região Nordeste. Esta isoieta de 800 mm delimita a região que nos propusemos estudar. Apenas 2% do polígono das secas recebe uma pluviometria inferior a 400 mm. Trata-se de regiões onde a fraqueza das precipitações é agravada por efeitos de interceptação ligada ao relevo. 25% desse polígono têm uma pluviometria anual média inferior a 600 mm.

Nota-se, no interior do polígono, várias zonas cuja pluviometria ultrapassa 800 mm. Trata-se, em geral, de um tipo de microclima de altitude chamado "*Brejo*". As precipitações são, aí, abundantes, as temperaturas mais fracas, a umidade mais forte e as cerrações e nuvens mais frequentes. O clima dos brejos não pode mais ser qualificado de semi-árido. Eles representam um grande papel na economia regional e originam ou sustentam as nascentes de muitos rios.

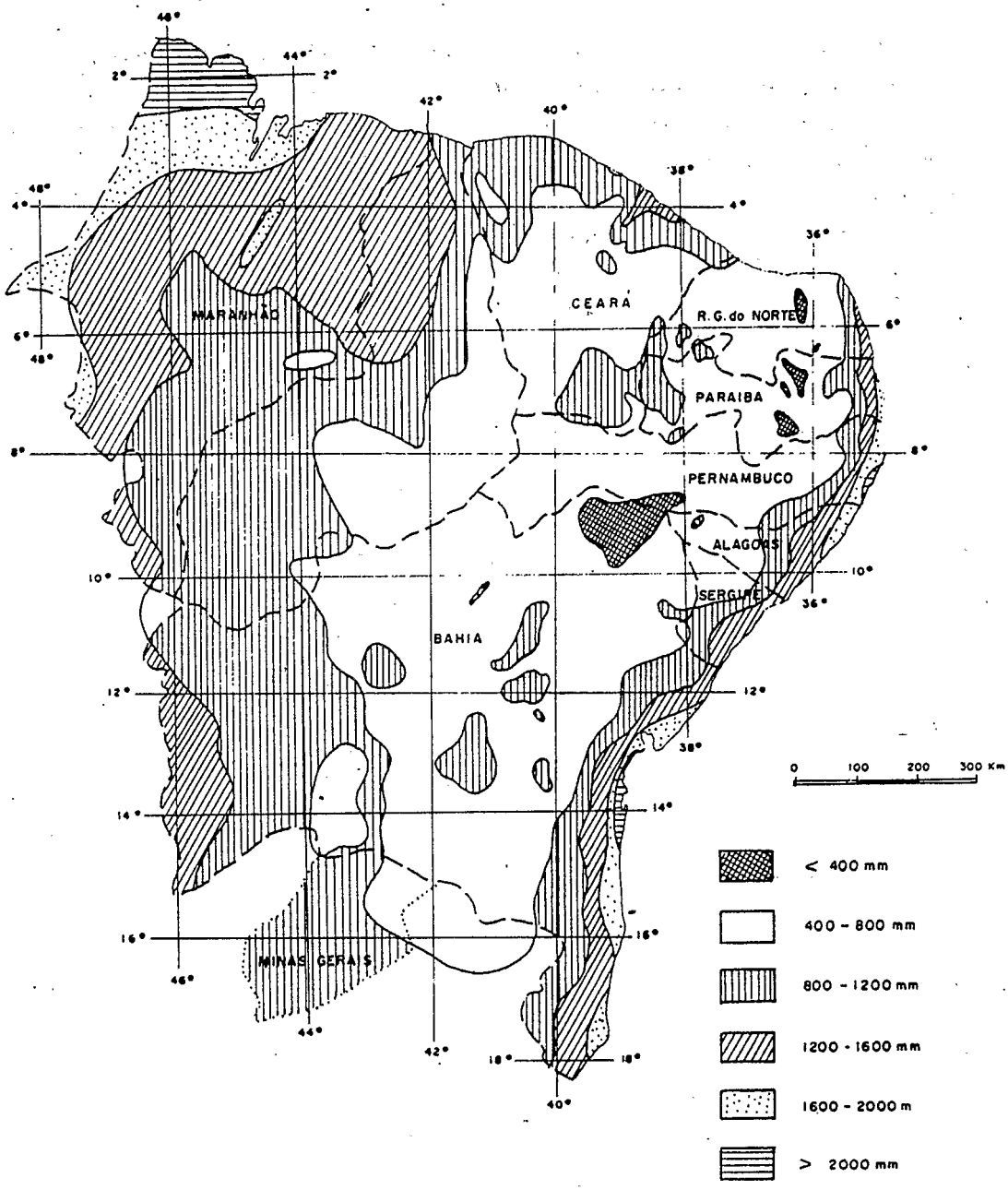


Figura 1.6 : Precipitação anual média

■ Repartição mensal das precipitações

A figura 1.7 indica os períodos mais chuvosos nas principais áreas do Nordeste. A distribuição mensal das precipitações é muito variável. Esta mesma 1.7 mostra a distribuição média dos totais mensais de cinco postos pluviométricos:

- FORTALEZA, que não está situada na zona semi-árida, possui o mais antigo posto pluviométrico do Nordeste. Freqüentemente é utilizado como referência.

- Nos pluviômetros de IBICUA e de PETROLINA, a estação seca, é bem determinada. Isto é característica da parte Norte do Sertão.
- Ao contrário, não existe nenhum mês cuja média seja verdadeiramente nula para o pluviômetro de QUEIMADAS, situado no Sertão Sul ou para o posto de Garanhuns localizado no Agreste, perto do oceano Atlântico.

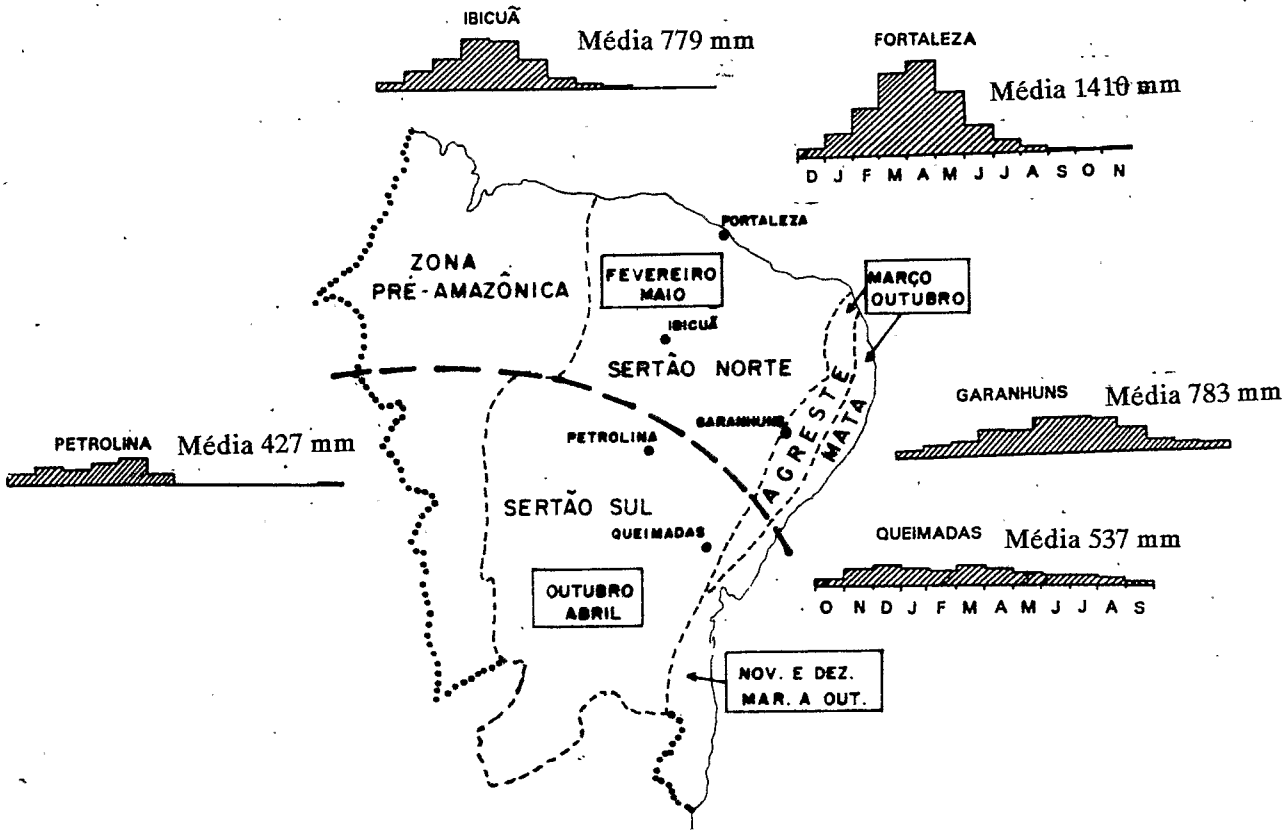


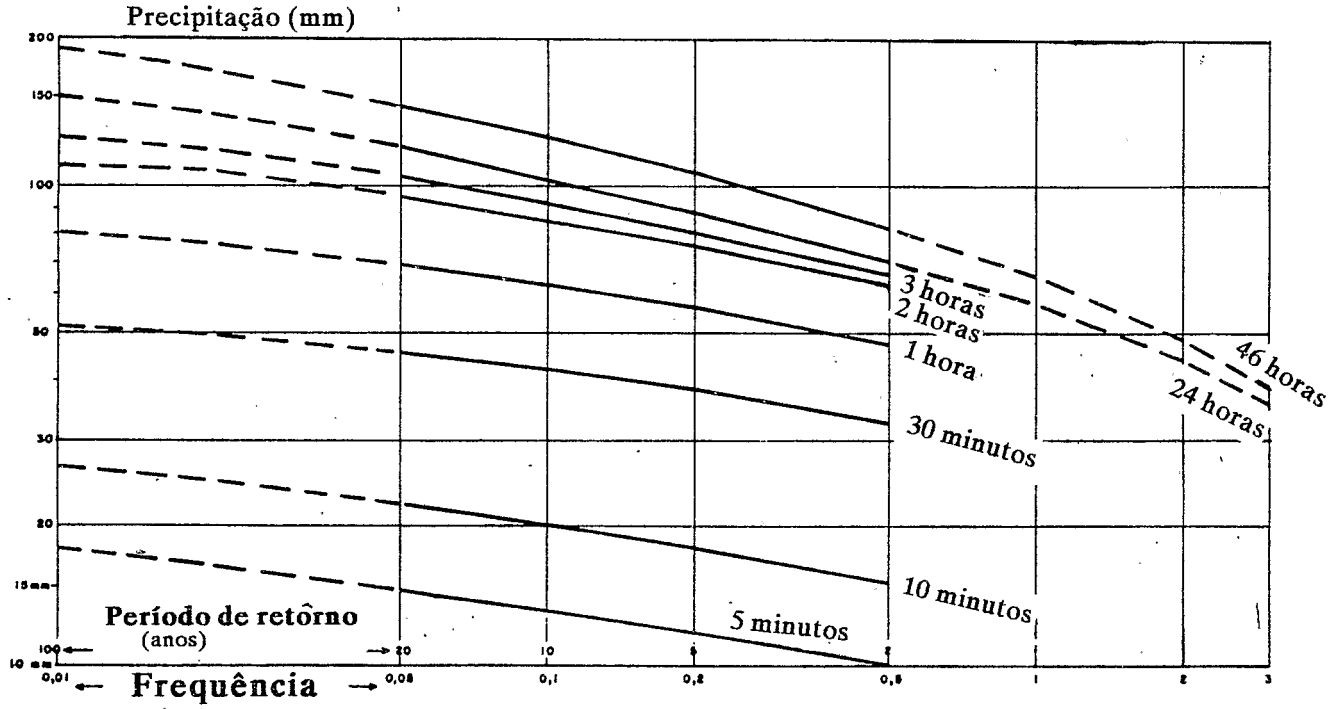
Figura 1.7 : Algumas distribuições de precipitações mensais do Nordeste brasileiro.

▪ Precipitações diárias e intensidades de chuvas

CADIER *et al* (1981) determinaram para o Estado de Pernambuco valores das precipitações em 24 h correspondendo a frequências características. Os melhores ajustamentos estatísticos para as amostras de chuvas diárias são obtidos com a lei de GOODRICH.

ZONA FISIOGRÁFICA	PERÍODO DE RETORNO		
	1 ano	**10 anos**	**100 anos**
ZONA DA MATA	77 mm	129 mm	181 mm
AGRESTE ou ZONA DE TRANSIÇÃO	52 mm	96 mm	146 mm
SERTÃO	61 mm	107 mm	158 mm

As curvas "intensidades-durações" da figura 1.8 permitem determinar os totais de chuva em função do seu período de retorno para diversas durações.



Fonte: Nouvelot e Alii (1979)

Figura 1.8 : Precipitações máximas em função de sua duração e de seu período de retorno.

1.1.3 As secas

Segundo MOLINIER e CADIER (1984-85), a primeira referência histórica a uma seca remonta ao relato efetuado pela Companhia de Jesus na Bahia, em 1559. Esse flagelo continua a se abater com uma trágica regularidade sobre o Nordeste durante séculos, acarretando conseqüências danosas que são agravadas pelo crescimento da população. A grande seca de 1877-78 conserva-se na memória dos habitantes dessa região. Acontecendo depois de um período de 32 anos normais, cuja abundância relativa favoreceu o crescimento da população, esta seca foi a mais desastrosa pelo número de mortos o qual foi estimado em 500.000.

Em 1888, 1889 e 1898, o Sertão foi, mais uma vez, duramente castigado.

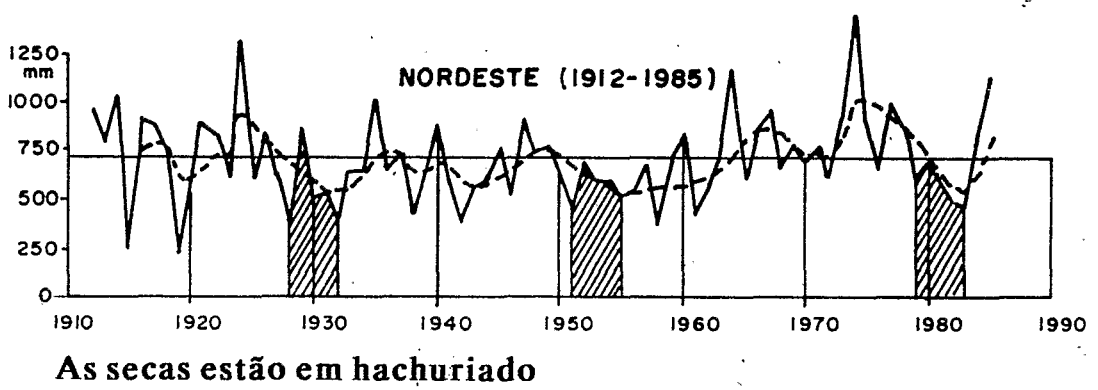


Figura 1.9 : Série dos índices pluviométricos no Nordeste, *segundo Molinier e Cadier (1984-85).*

A série cronológica das precipitações, no conjunto do Nordeste, traçado na figura 1.9, permite situar as principais secas dos 80 últimos anos. Nota-se, aí, os períodos mais desastrosos do século.

1930 a 1932, 1952 e 1953 e 1979-83 são períodos secos de vários anos consecutivos, que são os mais dramáticos no plano humano, visto que eles enfraquecem a capacidade de resistência dos habitantes, provocando fome, êxodo, morte e banditismo.

1915, 1919, 1942 e sobretudo 1958 foram anos de seca que, ainda que isolados, acarretaram conseqüências humanas e sociais muito graves.

As secas correspondem, em geral, a um enorme déficit pluviométrico. A vegetação natural de verde torna-se cinza, e os rios ficam secos. Porém, também existe o que se chama de "seca verde" que sobrevém nos anos cujas chuvas são mal distribuídas e não permitem a realização dos ciclos vegetativos das culturas sem irrigação, mas permitem que a vegetação nativa, xerófila, permaneça verde. Se as chuvas se concentram em um período de tempo curto, observa-se, como aconteceu em 1981, escoamentos e cheias consideráveis, enquanto as colheitas foram desastrosas.

As secas mais graves são aquelas que acontecem durante vários anos consecutivos durante os quais os pequenos açudes e os pequenos lençóis fréaticos secam, o rebanho morre e as populações devem se exilar para se instalar na periferia dos grandes centros urbanos.

A principal finalidade prática dos estudos hidrológicos das pequenas bacias dessa região será, certamente, a de melhor conhecer os recursos hídricos dos seus rios para poder melhorar sua utilização e sua estocagem e assim atenuar as conseqüências dessas secas.

1.1.4 Os solos da zona semi-árida

Reproduzimos a excelente e sintética descrição dos solos do Nordeste efetuada por LEPRUN (1984-85):

"Os solos desenvolvidos sobre as rochas do embasamento cristalino são freqüentemente pouco espessos, entre meio e um metro, parcialmente montmoriloníticos, quimicamente ricos, porém com características físicas sempre desfavoráveis. Trata-se de solos *Brunos não Cálcicos* semelhantes aos solos Brunos Eutróficos tropicais da África seca, dos *Vertissolos*, dos *Planossolos* sempre solidizados, dos *Solonetz* solidizados, dos solos *Litólicos* equivalentes dos Litossolos e solos pouco evoluídos, dos *Regossolos* e *Brunizens* pouco desenvolvidos e dos solos *Podzólicos* verde-amarelo eutróficos ou distróficos mais espessos, caolínicos, lembrando ligeiramente os solos ferruginosos pouco lixiviados argilosos africanos. Sobre as formações sedimentares se desenvolvem *Rendzinas* ou *Cambissolos* quando a rocha é calcária, diversos *Latossolos* profundos, ácidos e muito pobres quando a rocha arenítica é constituída por espessas coberturas areno-argilosas, de origem indeterminada, das "chapadas" ou por formações aluvio-coluviais".
No que se refere ao comportamento hidrodinâmico desses diferentes solos, concluímos que:

- **Solos oriundos de formações sedimentares:**
  as formações sedimentares são, em geral, cobertas de solos espessos e permeáveis como Latossolos, Cambissolos ou um pouco menos permeáveis como as Rendizinas.

- **Solos oriundos de formações cristalinas:**
  as formações cristalinas geram, freqüentemente, solos menos espessos e pouco permeáveis, como os solos Brunos não Cálcicos e os solos Litólicos. Freqüentemente, encontra-se, ao longo das encostas, a seqüência de solos a seguir:

  . Solos litólicos, afloramentos de rocha e solos Podzólicos que estão freqüentemente situados sobre as encostas ou sobre as partes altas das toposeqüências.
  . Solos Podzólicos e sobretudo os Regossolos que são permeáveis.
  . Finalmente, os Planossolos e os Solonetz que apresentam, sempre, problemas de salinização e estão situados, como os Vertissolos, na parte inferior da toposequência. Os Solonetz são praticamente impermeáveis.

A distribuição característica esquemática da figura 1.10 permite melhor compreender as posições relativas dos diferentes tipos de solos.

Mostraremos, mais adiante, que as características hidrodinâmicas da associação solo e vegetação constituem um fator determinante para a explicação dos regimes hidrológicos dessa região semi-árida.

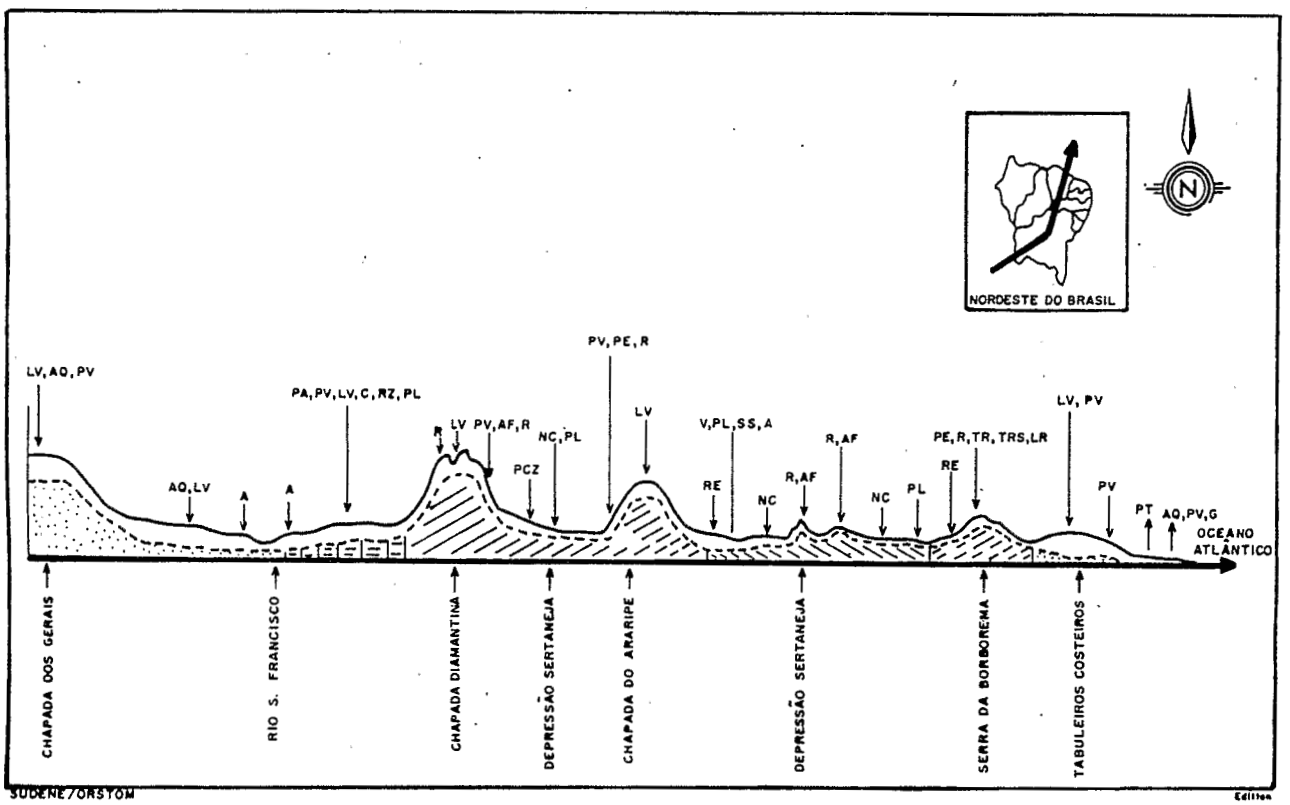


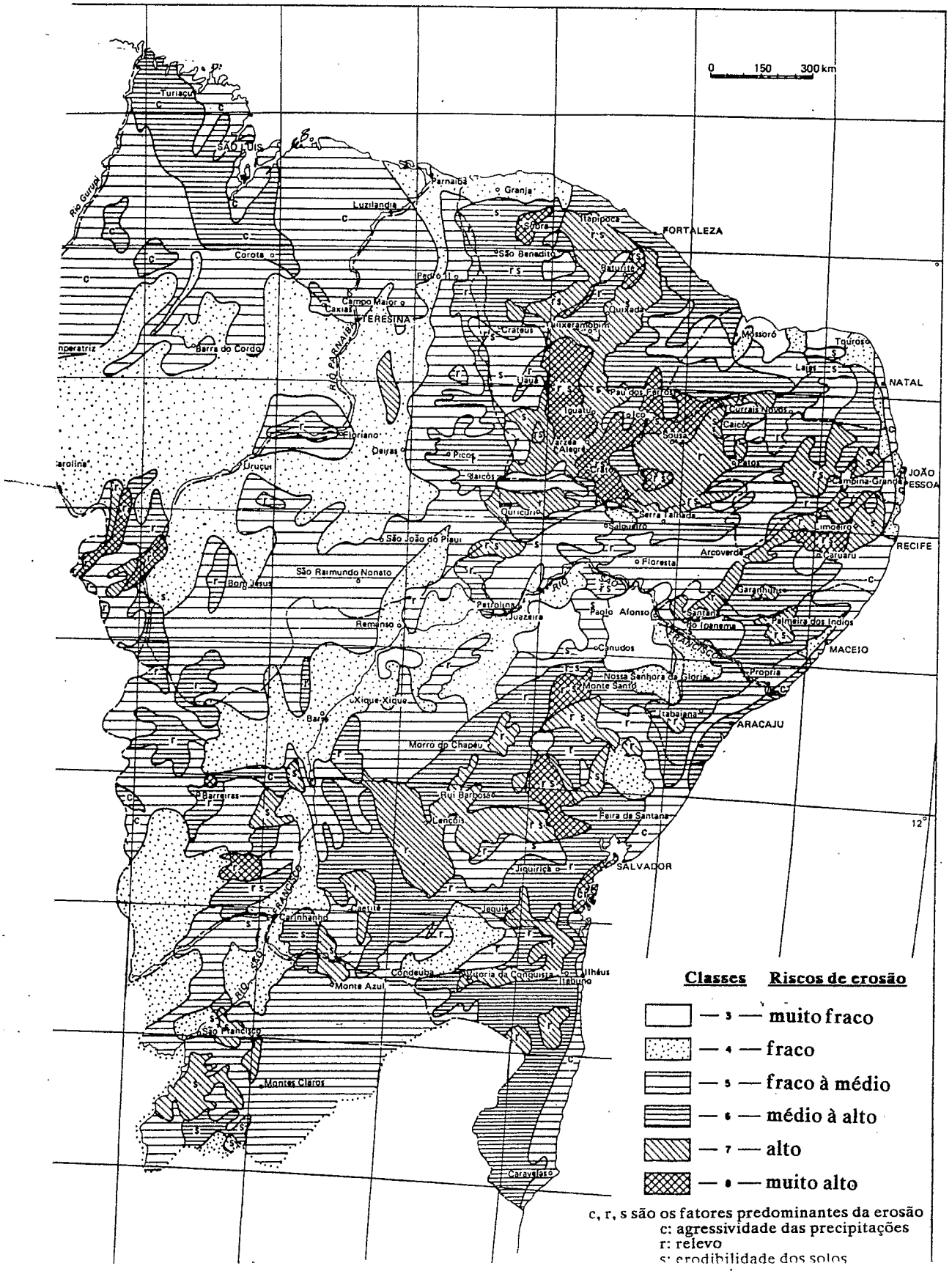
Figura 1.10: Situação de diferentes solos com relação ao relevo ao longo de um corte característico do Nordeste, *(segundo F. BARRETO, inédito, 1991).*

Reproduzimos, enfim, o mapa dos riscos de erosão proposto por LEPRUN (1983).

Esse mapa, sintético, foi elaborado com a superposição dos mapas de susceptibilidade dos solos à erosão com os fatores de erosividade das chuvas calculados pelo método preconizado por WISCHMEIER e SMITH (1978).

Além da identificação das zonas em função dos riscos de erosão, esse mapa, apesar da falta de detalhe devido a sua pequena escala, permite pressentir a grande variabilidade que caracteriza os solos do Nordeste.

Figura 1.11: Mapa dos riscos de erosão do Nordeste brasileiro, *(segundo LEPRUN, 1983).*



1.1.5 Os açudes, meio de luta contra a irregularidade dos escoamentos

A irregularidade dos regimes hidrológicos é, naturalmente, ainda mais acentuada do que a das precipitações. A figura 1.12 mostra a variabilidade extrema dos escoamentos anuais de uma pequena bacia da região de TAUÁ. Cinco dos dez anos apresentados, não ultrapassaram 20% da média anual! Cada ano, a maior parte desses escoamentos surgem em poucos dias, provocando algumas vezes inundações. Depois o rio seca novamente.

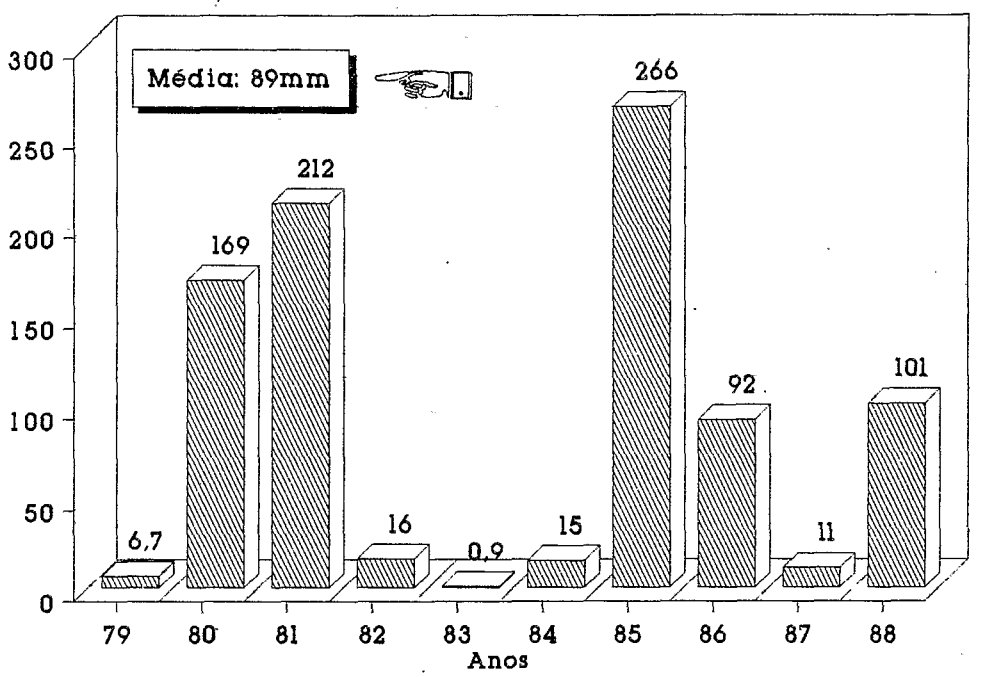


Figura 1.12: Irregularidade dos escoamentos sobre uma pequena bacia

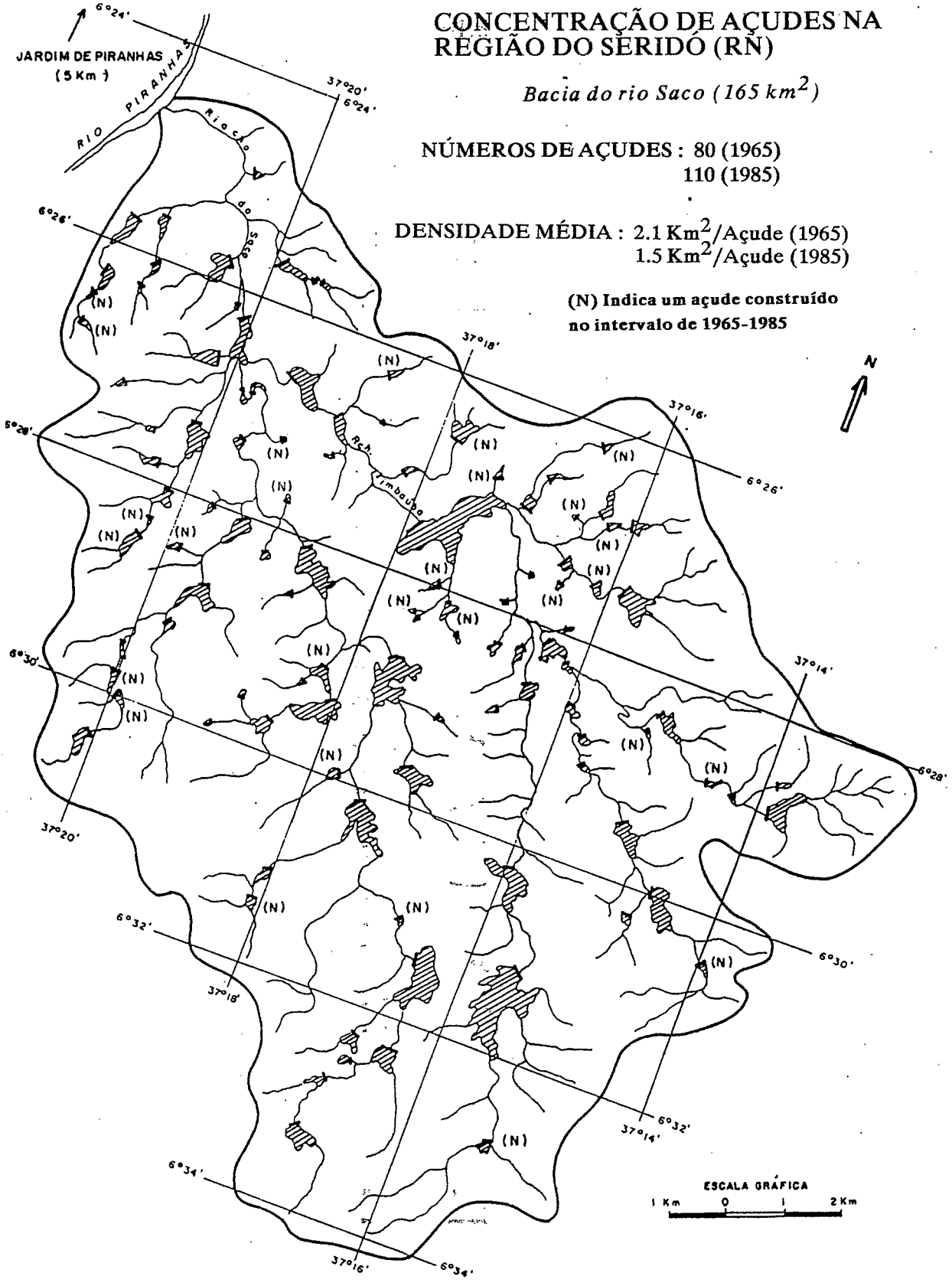
Para tentar conservar um pouco do precioso, mas fugaz, líquido, os habitantes, cada vez que foi possível, construíram "***Açudes***".

Açude é o nome que se dá, no Nordeste do Brasil, às barragens de todo tamanho. É o aproveitamento hidráulico mais difundido. Estima-se seu número total em mais de sessenta mil. São, em geral, pequenas represas de terra que integram a paisagem atual do Nordeste e que são sempre dimensionadas e construídas de maneira muito empírica. Seu potencial é mal utilizado. A principal finalidade prática dos estudos hidrológicos de pequenas bacias dessas zonas secas foi fornecer dados de base necessários ao dimensionamento e ao manejo dessas pequenas barragens. Um "***Manual do Pequeno Açude***" foi assim elaborado para que os habitantes do Sertão pudessem utilizar os nossos resultados (F. MOLLE e E. CADIER, 1992).

Um excelente estudo, apresentado por François MOLLE (1991c) foi consagrado a este assunto e complementa o presente trabalho.

A figura 1.13 mostra a incrível densidade que os *açudes* podem atingir. Em algumas bacias, o volume total das barragens é da ordem do módulo de escoamento e as densidades aproximam um açude por km^2.

Figura 1.13: Densidade de açudes na região de Caicó *(segundo Molle, 1991c).*



1.2 HISTÓRICO DA HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE

As referências históricas que conseguimos reunir tentam explicar e retraçar as técnicas adotadas para planificar e otimizar a pesquisa hidrológica em pequenas bacias, numa região de mais de 1.000 000 km^2. Por sua dimensão, esse programa é único. A natureza dos resultados é largamente condicionada pela maneira como os estudos se desenvolveram.

1.2.1 Dados anteriores a 1963: a rede geral hidropluviométrica

■ Falta de conhecimento da hidrologia das zonas semi-áridas.

Os recursos em água das zonas semi-áridas do Nordeste foram, durante muito tempo, pouco conhecidos. Os exemplos disso são numerosos:

> MOLLE (1991b), faz referência, por exemplo, a um mapa do IOCS, datado de 1910, que atribui uma pluviometria anual de 200 mm à cidade de CARUARU quando ela é, na verdade, da ordem de 500 mm.
>
> O primeiro açude realmente importante construído no Nordeste, em 1906, o açude CEDRO, situa-se perto da Bacia Representativa de JUATAMA. Seu volume corresponde a uma lâmina escoada de 600 mm, ou seja, **75% do volume precipitado**. Atualmente, recomendar-se-ia, para o mesmo local, um volume dez a vinte vezes menor!
>
> Por ocasião da última seca, 1979-83, artigos e reportagens da imprensa e da televisão relataram períodos de dois, três e até mesmo cinco anos sem uma gota de chuva, o que, evidentemente, é falso, uma vez que isto jamais foi observado desde que se opera uma rede hidropluviométrica nesta região.

■ A rede de medição hidrometeorológica de base:

A rede geral de medições hidrometeorológicas constitui a única fonte de informação durante esse período.

Segundo Maksoud (1961), a série pluviométrica mais antiga no Nordeste, que não sofreu processo de descontinuidade, é a de FORTALEZA, observada a partir de 1848.

Historicamente, a rede de medição hidrometeorológica do Nordeste foi instalada entre 1910 e 1963, em três grandes etapas descritas por GUSMÃO *et al* (1979) e JACCON e SECHET (1980):

* A partir da **década de 1910**, com estímulo do IFOCS, as primeiras medições sistemáticas e contínuas tiveram início no Nordeste com a instalação de um conjunto de 300 a 500

pluviômetros e estações hidrométricas. Este esforço se concretizou para fazer parte do que chamaríamos, atualmente: uma rede de medições hidrometeorológicas.

* No decorrer dos anos trinta, após a seca desastrosa de 1930- 1932, a rede foi mais uma vez sensivelmente ampliada, com o número de pluviômetros ultrapassando 800, a partir de 1942.

* No começo dos anos sessenta, após a seca dramática de 1958, a rede de medição atingiu sua potencialidade atual, isto é, mais ou menos 2.500 pluviômetros, 250 pluviógrafos e 200 estações hidrométricas, realização apoiada pelo Presidente KUBITSHECK e pela SUDENE, recentemente criada. Esta acumulação de dados não impediu CARVALHO (1960) de afirmar num boletim do DNOCS, que a pluviometria média do Polígono das Secas era de 400 mm, enquanto esta média é, na realidade, da ordem de 650 à 700 mm.

■ Sínteses regionais anteriores a 1963

AGUIAR (1939, 1940) efetuou uma importante síntese que fornecia os elementos necessários ao dimensionamento das barragens que o IFOCS (depois DNOCS) construía. AGUIAR elaborou seu método e suas fórmulas há mais de cinquenta anos, tendo como base as pequenas séries existentes na época. Ele só dispunha de dados hidrométricos de umas vinte ou trinta bacias, todas com superfície superior a 500 km^2. No entanto, a simplicidade e a pertinência de suas fórmulas tornou-as onipresentes e são, ainda, usadas com bastante freqüência. Elas se prestam para calcular módulos e descargas de cheias das grandes bacias, mas também são usadas para as pequenas bacias, para as quais não tinham sido concebidas. Voltaremos a este assunto mais adiante.

No princípio dos anos 60, a SUDENE empreendeu a elaboração de certo número de documentos sintéticos de base, ainda hoje utilizados como, por exemplo, um mapa das isoietas qualificadas de "*dados In natura*" . As coberturas fotográficas em diversas escalas são elaboradas progressivamente: topográficas em 1:100.000, pedológicas e geológicas em menor escala (entre 1:400.000 e 1:1.000.000). O. PFAFSTETTER, (1957), publicou um estudo sobre as intensidades das fortes chuvas no Brasil, ainda utilizado atualmente, mas não existia ainda qualquer estudo hidrológico relativo às pequenas bacias!

1.2.2 Os anos 60: o estudo do Vale do Jaguaribe e os primeiros estudos sobre pequenas bacias hidrográficas

Entre 1963 e 1966, o **Grupo de Estudo do Vale do Jaguaribe** (GEVJ), criado pela SUDENE, recebendo assistência técnica francesa (ASMIC, SCET-COOP e ORSTOM) empreendeu o estudo hidroclimatológico e pedológico da grande bacia do Vale do Jaguaribe, com perto de 90.000 km^2, um dos maiores rios intermitentes e situado na zona semi-árida do Estado do CEARÁ.

Este estudo foi concebido para conseguir, a curto prazo, recomendações práticas para uma planificação e um bom manejo dos recursos naturais. O objetivo foi, em grande parte, atingido. Este trabalho, trinta anos depois, é, ainda, citado como referência.

O estudo hidrológico representa uma soma de trabalho impressionante, efetuado em tempo recorde, aliando (quando ainda não se dispunha de computador) a coleta, a homogeneização, a crítica e o tratamento de grande parte de dados brutos de todo tipo, para realizar uma síntese regional de alto nível, que contém, implícita ou explicitamente, vários conceitos de hidrologia moderna, que às vezes só se desenvolveram e foram verdadeiramente formalizados vários anos depois.

Assinalamos vários pontos e resultados dignos de atenção na Monografia Hidrológica do Estudo geral de base do Vale do Jaguaribe (SUDENE, GEVJ, 1967; DUBREUIL *et al*, 1968):

- Uma zonificação hidrológica efetuada com o conceito novo, naquela época, de zonas homogêneas, delimitadas por superposição de mapas estilizados dos principais fatores condicionantes dos regimes (DUBREUIL, 1965a).

- Fórmulas e ábacos regionais que permitem o cálculo direto dos módulos hidrológicos a partir da pluviometria, da composição geológica e da cobertura vegetal das bacias. Voltaremos a este assunto.

- Os primeiros estudos hidrológicos específicos sobre pequenas bacias (GEVJ, 1965 - Tomo IV - Vol. 1; Vol. 2; Vol. 2-bis; Vol. 4), do qual utilizaremos os dados.

- Parte destes estudos refere-se especificamente ao funcionamento das pequenas represas ou açudes, já muito numerosos nessa região; GIRARD (1966) propôs, por exemplo, um método de cálculo da evaporação dessas represas, a partir dos dados obtidos em tanque e da profundidade média desses reservatórios.

- DUBREUIL e GIRARD (1970), avaliaram a redução do escoamento provocada pelos numerosos açudes existentes numa grande bacia.

1.2.3 Os anos 70: planificação e instalação de uma rede de Bacias Hidrográficas Representativas

Em 1973, a SUDENE, seguindo as diretrizes propostas pelo Dr. M. S. CAMPELLO, lançou um plano de estudo sistemático dos recursos em água das pequenas bacias de todo o NORDESTE. As principais fases desse plano, completo e ambicioso, elaborado e realizado com a assessoria do ORSTOM sob a supervisão de P. DUBREUIL, foram as seguintes:

■ Planificação da implantação das BHR

NOUVELOT (1974) aplicou, para todo o Nordeste a técnica das zonas hidrológicas homogêneas, elaborada para o Vale do Jaguaribe (DUBREUIL, 1968 e DUBREUIL e GUISCAFRE, 1971).

Nessa região de mais de 1.600.000 km^2, NOUVELOT identificou 229 zonas homogêneas diferentes de acordo com os critérios da pluviometria, permeabilidade do sob-solo, relevo e altitude. Reagrupando-as, para chegar a um número razoável, ele selecionou 20 "grandes" zonas prioritárias. Quatro destas zonas já estavam representadas, com certa redundância, pelas oito bacias já instaladas: MISSÃO VELHA, BATATEIRAS, CRATO, QUIXABINHA, JUATAMA, RIACHO DO NAVIO, SUMÉ e ESCADA. Um cronograma muito otimista previa a instalação de dezesseis outras bacias, entre 1975 e 1981, no ritmo de duas ou três por ano, cada bacia devendo ser monitorada durante cinco a dez anos, de acordo com a hidraulicidade e a qualidade das observações.

■ Bacias efetivamente implantadas

Qual o balanço dos estudos iniciados no quadro desta planificação?

As equipes de Bacias Hidrográficas Representativas da SUDENE, dirigidas por P.A. SANGUINETTI, tinham a capacidade logística de monitorar, simultaneamente, três ou quatro conjuntos de Bacias Hidrográficas. Três bacias, SUMÉ, RIACHO DO NAVIO e JUATAMA já estavam em funcionamento, no momento da elaboração da planificação de NOUVELOT. Foi, então, preciso desativar, em 1977, as bacias do RIACHO DO NAVIO, JUATAMA e, em seguida, a de ESCADA, para poder instalar, entre 1976 e 1978, três das dezesseis novas bacias programadas. As três novas bacias foram locadas na zona semi-árida: IBIPEBA na Bahia (BA), em 1976, TAUÁ no Ceará (CE), em 1977 e AÇU no Rio Grande do Norte (RN), em 1978. A única bacia instalada em zona "úmida" foi a de ESCADA, na zona canavieira, próxima de Recife, que foi estudada entre 1975 e 1977. Assim, apenas sete das vinte zonas inicialmente previstas por NOUVELOT foram, efetivamente, cobertas.

Considerando-se, apenas, as zonas de pluviometria inferior a 800 mm, o grau de realização desta planificação melhora sensivelmente, atingindo um nível de representação de 50%, o que é normal, visto que dez das onze bacias estudadas estão situadas no semi-árido. Lembramos que o semi-árido só representa a metade do total de zonas homogêneas.

Essa planificação teve o mérito de apresentar às autoridades, de maneira racional, o problema da planificação dos estudos hidrológicos de pequenas bacias, para facilitar sua compreensão global e identificar os grandes tipos de regime e de problemas. No entanto, o fato de não considerar os tipos de solo e as coberturas vegetais[1] constitui, sabe-se agora, um grande obstáculo à aplicabilidade prática desta planificação e sua utilização para transpor os resultados nas zonas semi-áridas.

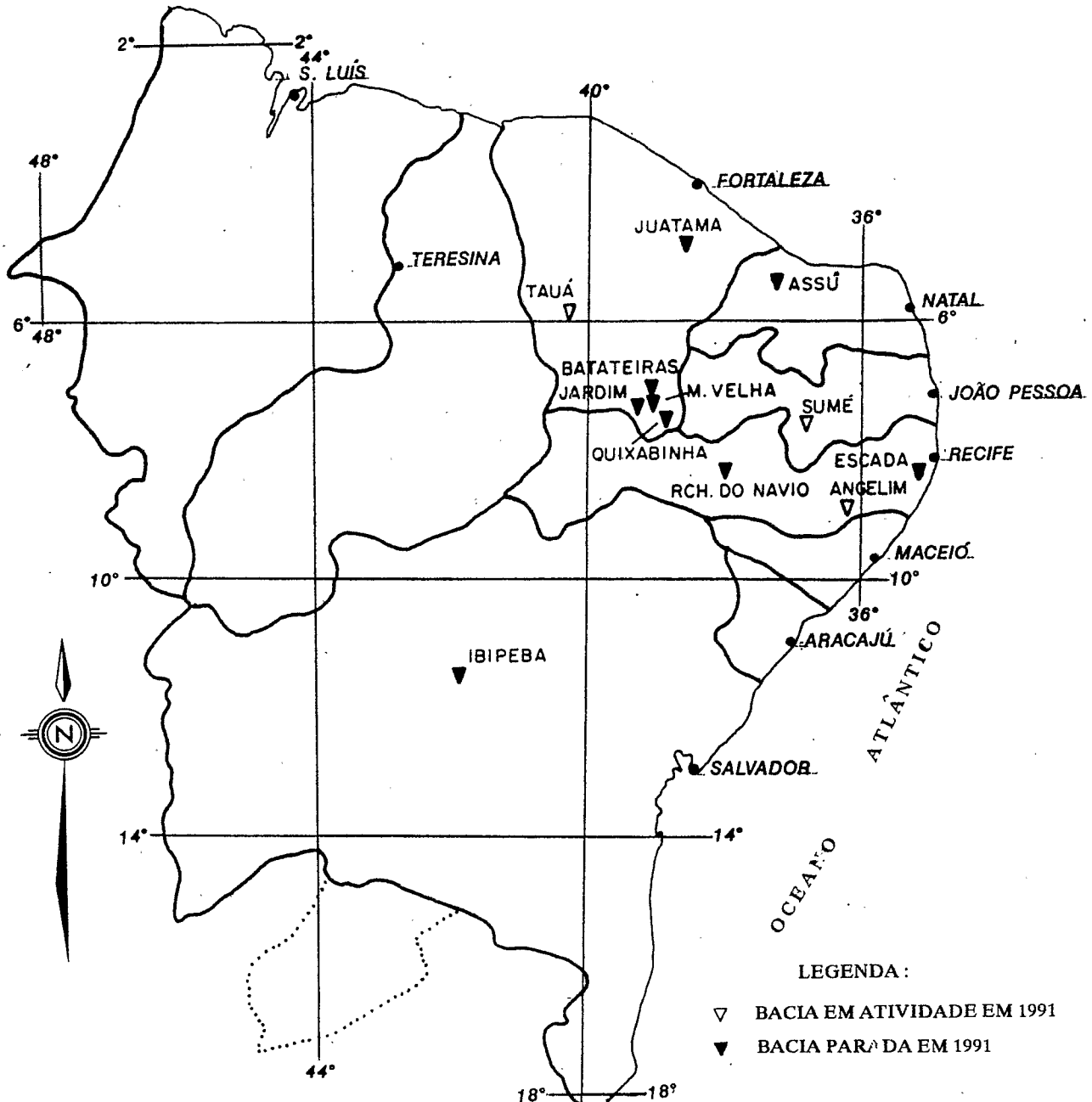
Lastima-se, além disso, que por razões de natureza não técnica, a dinâmica muito ambiciosa desse programa de longa duração[2], único em seu gênero por sua homogeneidade e sua envergadura, fosse rapidamente interrompida pouco depois da instalação de uma pequena proporção das bacias previstas, e antes de se conseguir as primeiras sínteses e resultados que poderiam ter levado a aperfeiçoar e fazer evoluir essa planificação.

Dispomos agora, quinze anos depois, graças aos trabalhos realizados por ocasião da elaboração da presente síntese, de elementos novos que permitem ajustar essa planificação aos resultados obtidos e definir as bacias a serem estudadas em prioridade, em função das lacunas constatadas nos conhecimentos de seus regimes.

[1] Os mapas necessários para isso, infelizmente, não estavam disponíveis, no momento do trabalho de NOUVELOT.

[2] Este programa era dotado, inicialmente, de meios suficientes em pessoal (5 engenheiros e 15 técnicos), material (25 limnígrafos, 30 pluviógrafos, 250 pluviômetros, veículos), funcionamento , cálculo, etc.

Figura 1.14: Mapa de situação das bacias representativas instaladas no Nordeste brasileiro



BACIA TAUA 1978-	BACIA SUME 1972-	BACIA RCH. NAVIO 1970-1977	BACIA JUATAMA 1964-1965 1974-1977	BACIA IBIPEBA 1977-1981	BACIA BATATEIRA 1962-1964	BACIA ASSU 1979-1990	BACIA ESCADA 1975-1977	BACIA ANGELIM 1990-
SUB BACIA PIRANGI MUNDO NOVO MOQUEM AÇ. J.FRAGOSO AÇUDINHO CALDEIRÃO AÇ. LUZIMAR AÇ. CHICO JUAZEIRO NASCIMENTI.	SUB BACIA GANGORRA UMBURANA JATOBÁ	SUB BACIA MATRIZ OSCAR BARROS SALOBRO	BACIA CACHOEIRA DO ARACE	SUB BACIA LA. GRANDE LAJ. DE BAIXO FAZ. ISABEL FAZ. PASSAG. LA. DO CANTO	BACIA M.VELHA 1962-1964 BACIA QUIXABIN. 1962-1964 BACIA JARDIM 1962-1964	SUB BACIA CASINHAS BUEIRO OLHO D'AGUA	SUB BACIA US. BARAO SERRA NOVA	SUB BACIA BURACO D'AGUA PAU D'ARCO RIACHÃO

1.2.4 Os anos 80 : a diversificação

Durante o decênio de 80 observa-se, por um lado, um enfraquecimento do "grande" programa de BHR, e, por outro lado, a implantação de vários programas, muito menos ambiciosos, os quais respondem a objetivos mais específicos e encontram financiamentos com mais facilidade. Seus custos são menores e empregam parte do pessoal e equipamentos do programa de BHR. Os principais programas específicos são os seguintes:

- Estudos de **Bacias Experimentais.**
- Estudos de **Conservação do Solo** - LEPRUN (1981, 1983).
- **Desenvolvimento da irrigação a partir de açudes** que abrange o estudo da qualidade das águas dos açudes.

Os conhecimentos adquiridos através desses diferentes programas, junto com a experiência acumulada sobre as BHR, constituem a base e são a principal justificativa do presente trabalho de síntese.

1.2.4.1 Enfraquecimento do Programa de Bacias Hidrográficas Representativas (BHR)

Em 1980, quatro anos depois do início efetivo da aplicação da planificação de NOUVELOT, o conjunto do programa foi reconsiderado, em princípio, por razões conjunturais:

- Modificação dos objetivos e das funções da SUDENE, que não deveria mais executar, diretamente, programas de estudo do meio natural. Os novos responsáveis eram menos sensíveis à problemática hidrológica das pequenas bacias. Por outro lado, o interesse por este programa, que já existia há anos, foi enfraquecendo progressivamente. Infelizmente, essa época corresponde também ao crescimento das dificuldades econômicas relativas ao fim do que se chamou o "milagre brasileiro".

- Foi se acumulando um atraso cada vez mais grave na elaboração das sínteses finais das bacias desativadas[3]. Era ainda possível promover a instalação e o manejo de novas bacias, porém este fato revertia-se em prejuízo, visto que mobilizava as energias necessárias à interpretação e à síntese dos dados já recolhidos, o que constituía o objetivo final do estudo de cada BHR. Percebe-se hoje que os problemas de modelização e de interpretação são mais complexos do que se previa inicialmente, e era difícil, em 1980, editar normas e receitas utilizáveis em todo tipo de bacia. Foi decretada uma pausa na instalação de novas bacias.

[3] DUBREUIL, consultor francês deste programa sugere, em novembro de 1975, o desdobramento do cronograma previsto para dez ou quinze anos e a contratação de consultores privados para elaborar os relatórios de síntese finais que já apresentavam problemas... DUBREUIL já se revelava clarividente: o cenário "catastrófico" destinado a alertar os responsáveis pelo programa pecam, mesmo por otimismo. Dos quatro relatórios de síntese de BHR finalmente publicados, um o foi em 1979, três em 1989, dentre os quais dois elaborados por uma consultora. Falta concluir, ainda, três.

Existem, também, razões de natureza mais técnica:

- As tentativas de síntese efetuadas em 1980, com os resultados obtidos no conjunto das bacias, mostram que as variações do regime hidrológico podem ser importantes dentro de uma mesma zona hidrológica homogênea. O que implica em duas mudanças nos critérios de seleção das bacias representativas:

  - Escolher bacias bem mais homogêneas para poder evidenciar o papel dos diferentes fatores. Para isto, as novas bacias selecionadas deverão ser menores.

  - Escolher bacias em função das **características hidrodinâmicas dos solos, do estado de conservação de sua superfície e de sua cobertura vegetal**, fatores que não tinham sido levados em consideração na planificação inicial. Isto condiz com a evolução dos conceitos hidrológicos existentes na África, na mesma época (COLLINET e CASENAVE, 1979; e CASENAVE *et al*, 1982).

- Os usuários da informação hidrológica formulam novos questionamentos. Isto provoca reavaliação e reorientação dos estudos:

  - Qual é o papel da cobertura vegetal e quais são as consequências de suas diversas modificações sobre as infiltrações, os escoamentos, as cheias, a erosão e as perdas de elementos químicos do solo?

  - Como obter a informação necesária ao estudo e à previsão da qualidade das águas de superfície, para poder combater os problemas de salinização?

  - Quais são os parâmetros necessários para o dimensionamento e o manejo dos açudes, que representam o tipo de aproveitamento hidráulico mais frequente no Nordeste semi-árido?

- Enfim, os hidrólogos e os pedólogos tentam medir e compreender mais profundamente certos mecanismos hidrológicos para, por exemplo, melhor ajustar os modelos e facilitar as extrapolações. Este objetivo orienta os estudos para uma escala e uma análise mais fina e mais completa dos mecanismos e dos comportamentos, em detrimento, algumas vezes, da abordagem global e regional prevista por NOUVELOT.

Todas estas razões explicam a evolução dos estudos hidrológicos sobre pequenas bacias, constatadas durante o decênio de 1980.

O programa de Bacias Hidrográficas Representativas (BHR) prosseguiu, porém, sem o dinamismo anterior. De início, quatro, depois, apenas três bacias, continuam a ser operadas simultaneamente. Na década de 1980, nenhuma nova bacia foi implantada, entre a instalação da de AÇU em 1978 e a de ANGELIM em 1989-90, em Pernambuco. Esse ritmo está bem longe das previsões de NOUVELOT!

Assinalamos uma pausa nesse longo declínio: em 1988-1989, as autoridades da SUDENE voltaram a manifestar um real interesse por este programa de BHR. O Dr. MARCELO BARROS, Coordenador do PRN (Planejamento de Recursos Naturais) da SUDENE e o Dr. BENEDITO SERAPHIM, Chefe da HME (Hidrometeorologia), uma das Divisões do PRN, forneceram os meios necessários para a elaboração das sínteses finais das três bacias, TAUÁ, JUATAMA e IBIPEBA, o início da de SUMÉ , permitindo também a instalação de uma nova BHR, em ANGELIM. Somente as sínteses de AÇU e de ESCADA, infelizmente, não puderam ainda ser elaboradas.

Estas sínteses, realizadas dentro de prazos reduzidos, com técnicas homogêneas e modernas de digitação e de modelização, levando em consideração os resultados alcançados através de outros programas tais como o de bacias experimentais ou da ATP, permitiram aumentar, consideravelmente, os conhecimentos referentes aos regimes e aos modos de funcionamento hidrológico das pequenas bacias.

Os conhecimentos adquiridos através desses diferentes programas, acrescidos da experiência acumulada nas bacias hidrográficas representativas, finalmente foram amplamente utilizados para realizar a presente síntese.

Em 1990-92, observa-se uma nova interrupção do programa de estudos de BHR provocada, desta vez, pela crise e restrições drásticas e gerais sofridas, nesse ano, por toda a administração e pela economia brasileira.

1.2.4.2 As bacias hidrográficas experimentais (BHE)

No início dos anos 80, com o incentivo da SUDENE, do CNPq e de duas Universidades do Nordeste onde funcionam cursos de pós-graduação em hidrologia (CAMPINA GRANDE, na Paraíba e FORTALEZA, no CEARÁ) e, também, com a assessoria do ORSTOM, foi lançado um novo programa chamado "**Bacias Experimentais**".

A primeira das **bacias experimentais** foi instalada em SUMÉ, no fim do ano de 1981, pelas equipes da SUDENE, sob a direção de G. GUSMÃO, do PRN e a responsabilidade técnica de P.A. SANGUINETTI, e, depois, H.P. VIEIRA. A orientação técnica do ORSTOM estava a cargo de E. CADIER e J.C. LEPRUN. Os dispositivos de medição instalados foram inspirados nos que o ORSTOM utilizou em TAI na Costa do Marfim (COLLINET, 1984). Seu objetivo: a medição das conseqüências das modificações da cobertura vegetal sobre o escoamento e a erosão. A longo prazo, este projeto visava a determinação das normas de dimensionamento e de manejo dos açudes. Fortes cheias ocorridas logo na primeira campanha de medição permitiram, felizmente, evidenciar um acréscimo dos escoamentos através de um fator variando entre 5 e 10, provocado pela supressão da vegetação. Esses resultados, rapidamente obtidos e inéditos, aliados ao apoio do Dr. IVONILZO CORREIA da SILVA do CNPq (PDCT/NE) e ao do Projeto de Cooperação Francesa (o qual veio a ser denominado posteriormente de Projeto TAPI), dirigido por J.L. MILLO, garantiram a continuidade do programa de estudos de pequenas bacias representativas (BHR), o qual era fortemente questionado nesses anos de 1982-1983. Com efeito, para os responsáveis políticos e de

desenvolvimento, esse programa de pesquisa fundamental se estendia por um período demasiadamente longo.

A bacia experimental foi instalada em uma zona de solos Brunos Não Cálcicos Vérticos, dentro da BHR de SUMÉ, utilizando largamente suas facilidades logísticas: rede de medições, equipamento, veículo, observadores e alojamento. A partir de 1984, os pesquisadores da Universidade de Campina Grande asseguravam, progressivamente, a condução dessa pesquisa que ainda prosseguiu em 1991 sob a responsabilidade dos professores H.P.GOMES, V.S.SRINIVASAN e C.GALVÃO.

Entre 1986 e 1989, um Programa de Pesquisa Franco-Brasileiro, tendo em vista o estudo do funcionamento hidrológico dos ecossistemas do Nordeste brasileiro, foi objeto de um contrato da ATP-PIREN[4] entre o ORSTOM, o CNRS pela França, a SUDENE e diversas Universidades nordestinas. O tema de estudo deste programa de pesquisa foi o funcionamento hidrodinâmico dos solos Brunos Não Cálcicos Vérticos, de SUMÉ. Utilizou-se, naturalmente, a infra-estrutura e os resultados do programa da Bacia Experimental de SUMÉ.

Em 1984, o CNPq aprovou o financiamento de **três outros projetos de pesquisa** relativos à Bacia Experimental, inspirados no de SUMÉ, para as Universidades dos Estados de Pernambuco, do Rio Grande do Norte e do Ceará. Apenas a bacia de Tauá no Ceará, foi efetivada. Nota-se que as duas bacias experimentais efetivamente implantadas se situavam nos dois Estados cujas Universidades possuem cursos de pós-graduação em hidrologia.

A bacia experimental de TAUÁ foi instalada no final de 1985 dentro da BHR de TAUÁ e ficou, sob a responsabilidade do Prof. Walter MARTINS da Universidade Federal do Ceará, com a assessoria da SUDENE e do ORSTOM. Os equipamentos de medição são do mesmo tipo que os de SUMÉ, mas suas micro-bacias e parcelas foram escolhidas para entender o funcionamento e tentar representar os regimes dos principais elementos do verdadeiro mosaico de solos que compõem a BHR e não para medir, como foi o caso de SUMÉ, os efeitos da modificação provocada pela presença, ou não, da vegetação, sobre um único tipo de solo. Além disso, associou-se ao presente estudo das microbacias, o monitoramento de bacias maiores. Assim, são medidos os escoamentos que alimentam quatorze açudes, bacias e microbacias. A comparação das diferenças dos regimes com as características fisiográficas das diferentes bacias e sub-bacias foi rica em ensinamentos. Permitiu delinear uma tipologia hidrológica das bacias dessa região, a qual poderá ser utilizada para transposições dos resultados hidrológicos.

1.2.4.3 O estudo dos açudes

Os estudos hidrológicos sobre pequenas bacias do Nordeste semi-árido sempre abordaram, de maneira mais ou menos implícita, uma parte que se relacionava com os açudes, a qual constitui, é bom lembrar, o tipo de aproveitamento mais comum das águas de superfície.

Os estudos do GEVJ, por exemplo, reuniram elementos necessários à avaliação das modificações dos regimes hidrológicos de uma bacia de 2.000 km^2, provocados pelos açudes. DUBREUIL e GIRARD

[4] ATP-PIREN: Action Thématique Programmée du Programme Intégré de Recherche pur l'Environnement.

(1970) estudaram, igualmente, o funcionamento dos açudes de acordo com diferentes cenários de operação.

Em 1981, um dos objetivos do projeto hidrológico chamado "*Bacia Experimental*", a cargo do DPG/PRN, era o estabelecimento de normas de dimensionamento e de manejo de açudes. Este programa de pesquisa recebeu, nessa época, o apoio do DAA que, na SUDENE, era encarregado do desenvolvimento da política agrícola (Dr. JOÃO PESSOA), juntamante com a equipe de Cooperação Francesa, na pessoa de Jean Louis MILLO e de Marc LEFEBURE DU BUS. Uma primeira versão do modelo de simulação sofisticado POMAC (potencialidade e manejo de açude), foi elaborado nessa época. Infelizmente, a grande seca de 1982-1983 esvaziou todos os pequenos açudes e diminuiu fortemente o entusiasmo dos patrocinadores desse projeto, pouco inclinados a financiar um programa de difusão de técnicas de irrigação, cuja fonte de alimentação - a água - havia desaparecido... Esse programa foi, pois, abandonado, menos de dois anos após ter começado!

▪ O programa Açudes 1985-1991:

Dois anos mais tarde, no fim de 1985, a situação era bem diferente: praticamente, todos os açudes do Nordeste estavam cheios após uma estação chuvosa muito abundante que varreu da memória as lembranças dramáticas dos anos precedentes. O Governo Brasileiro lançou nesta época, com apoio do Banco Mundial, gigantesco programa de Apoio ao Pequeno Produtor (PAPP), cujo orçamento era de 5 bilhões de dólares, para sua primeira fase de cinco anos. A SUDENE ficou encarregada da coordenação desse plano e M. S. CAMPELLO assumiu a direção da parte relativa aos recursos hídricos e à irrigação.

Nessa mesma época, F. MOLLE, Engenheiro do projeto francês de Cooperação de Tecnologias Apropriadas à Pequena Irrigação (TAPI), trabalhando junto ao PAPP, iniciou frutuosa e dinâmica colaboração entre os pesquisadores e técnicos ligados ao desenvolvimento do programa. Foi então criado um novo projeto associando técnicos provenientes de duas Diretorias da SUDENE, do DPG/PRN e do DPP(PAPP)/RHD e de dois organismos franceses, ORSTOM e projeto TAPI.

Objetivos do programa Açude:

Os objetivos e as motivações desse programa têm como suporte algumas idéias bastante simples:

- Existem no Nordeste perto de 70.000 pequenos e médios açudes (MOLLE, 1991b) que são notoriamente subutilizados, a maior parte de suas águas ficando perdida por evaporação ou sangria.

- Pode-se, muitas vezes, **valorizar essas represas** utilizando-se, por exemplo, técnicas simples e baratas de irrigação por gravidade, piscicultura ou culturas de vazante, etc.

- Certo número dessas técnicas já existem, devendo-se, apenas, pesquisá-las na literatura específica. Outras devem ser testadas, adaptadas ou criadas no contexto nordestino, em particular no que se refere à receptividade dos agricultores.

- A fim de que se possa efetuar a difusão dessas técnicas será preciso elaborar e difundir um **manual** que permitirá:

  . selecionar os projetos viáveis;

  . estabelecer regras de dimensionamento, de implantação e de manejo dos perímetros, dos açudes e de seus vertedouros;

  . oferecer indicações técnicas necessárias à irrigação (sifões, drenagem...), à piscicultura (seleção de espécies e alimentação dos peixes) e a outras utilizações dos açudes (culturas de vazante, etc.).

Linhas de ação do programa Açude:

Entre 1985 e 1991 esse projeto se desenvolveu seguindo cinco linhas principais:

No escritório:

1. Reunião, tratamento e homogeneização, a mais completa possível, de toda **informação já existente**; sendo ela muito mais abundante e heterogênea do que se possa imaginar.

2. Desenvolvimento e ajustamento de **modelos** concebidos para ajudar a dimensionar e a manejar os açudes e seus perímetros.

3. Redação do **Manual** do pequeno Açude (MOLLE e CADIER, 1992), que constituía o objetivo principal desse programa.

No campo:

4. Acompanhamento agronômico e hidropluviométrico de alguns projetos de irrigação, chamados "**Projetos pilotos**", que permitem compreender melhor certos aspectos do funcionamento dos sistemas de irrigação, modelizando-os, evidenciando seus pontos críticos e permitindo que sirvam, eventualmente, de exemplo de demonstração, facilitando, assim, a realização do manual.

5. "**Teste de grandeza real**" das técnicas recomendadas, deixando, desta vez, a responsabilidade da concepção, do financiamento, da construção e da administração dos projetos de irrigação aos organismos locais. Isto foi realizado **com sucesso** pelo PAPP e pelo projeto TAPI na região de PINTADAS, no Estado da Bahia, estimulando a construção de aproximadamente trinta barragens e a implantação de igual número de projetos de irrigação.

Resultados do programa Açude:

Esse programa, muito dinâmico, surge numa conjuntura bastante favorável. Os açudes estão cheios, o Governo Brasileiro escolheu a irrigação como meio prioritário de desenvolvimento do Nordeste, e o pequeno produtor é a prioridade maior do programa bilionário do PAPP. Os objetivos desse programa açude eram concretos, bem definidos e apresentavam um interesse prático.

Seus resultados se situam em vários planos:

a) Resultados diretamente previstos pelo programa: realização de manuais, seminários, vídeos, etc.

b) Resultados técnicos e científicos indiretos: a fim de preencher lacunas, foram empreendidos estudos de base que correspondem a progressos substanciais nos conhecimentos relativos aos pequenos açudes, indo bem além dos objetivos mínimos do programa Açude. Citamos, por exemplo:

. O método de classificação e de transposição hidrológica apresentado no final deste trabalho.

. Estudo dos processos de concentração em sal dos reservatórios, que foi objeto de uma tese (LARAQUE, 1991) e de diversas publicações (MOLLE, 1991c).

. Estudos de base sobre a variação da evaporação e da infiltração em função do tamanho e do tipo de açude (MOLLE, 1989a e b).

. Estudo da morfologia (ou geometria) das bacias hidráulicas das pequenas represas (MOLLE, 1991a).

. Atualização do inventário dos Açudes (MOLLE, 1991b).

. Estudo histórico dos Açudes (MOLLE, 1991b).

. Reunião das informações existentes e publicação de documentos sintéticos sobre a piscicultura, as culturas de vazante, etc. (MOLLE e CADIER, 1992).

. Elaboração de modelos de simulação potentes e sofisticados, tais como o POMAC, sobre o funcionamento das barragens (CADIER *et al*, 1989; CADIER *et al*, 1990, MOLLE, 1991c).

. Obtenção de novos dados hidrológicos sobre o funcionamento das bacias hidrográficas que alimentaram os açudes dos "projetos pilotos de irrigação".

c) **Efeito de "indução"**. Esse programa dinâmico, com objetivos práticos e convincentes, conseguiu apoio financeiro e/ou participação concreta de organismos externos, tais como:

- O PROVÁRZEAS, organismo de valorização de baixios no Centro e no Sul do Brasil, ligado ao Ministério Federal de Agricultura e apoiado pela FAO, que se mostrou muito interessado na filosofia desse estudo, no manual e na difusão das técnicas empregadas.

- O PRONI, Programa Nacional de Irrigação, ligado ao Ministério Federal de Irrigação e apoiado pelo Banco Mundial.

- O BUREC, empresa de consultoria norte-americana, trabalhando para o PRONI.

-O CAR, Órgão do Estado da Bahia que apoiou e financiou um teste em grandeza real de construção de 30 açudes no município de PINTADAS.

-A CISAGRO, Órgão do Estado de Pernambuco que participou de dois inventários e de uma análise a nível de microrregião, da distribuição e do modo de utilização dos açudes (SUDENE/TAPI/CISAGRO, 1988; SUDENE/TAPI/CISAGRO, 1989)..

No âmbito da SUDENE esse programa teve uma conseqüência benéfica e inesperada: a retomada, breve mas intensa, do programa moribundo de estudos hidrológicos básicos de Bacias Hidrográficas Representativas (BHR), que permitiu realizar a maior parte das sínteses interrompidas, cujos dados corriam o risco, cada dia maior, de serem definitivamente perdidos. Os novos conhecimentos adquiridos nessa ocasião foi uma das principais motivações à elaboração do presente trabalho.

A contrapartida francesa também liberou meios suplementares para o programa Açudes. O acordo de cooperação com o ORSTOM prolongou-se por mais três anos; a equipe francesa ORSTOM/TAPI foi reforçada.

1.2.5 Informações hidrológicas fornecidas pelos diferentes programas

Tentaremos apresentar um balanço das informações hidrometeorológicas recolhidas pelos diferentes programas que estudaram os diversos aspectos da hidrologia das pequenas bacias nestes últimos 25 anos.

Compararemos, primeiramente, o número de instrumentos instalados e o número de postos x anos armazenados.

TABELA 1.1
Número de instrumentos instalados e volume de informação recolhido pelos diferentes programas

	NÚMERO DE INSTRUMENTOS INSTALADOS					NÚMERO DE POSTOS x ANOS					
TIPO DE MEDIDA	PROGRAMA GEVJ	PROGRAMA BHR	PROGRAMA BHE	PROGRAMA AÇUDE	TOTAL	PROGRAMA GEVJ	PROGRAMA BHR	PROGRAMA BHE	PROGRAMA AÇUDE	TOTAL até 1980	TOTAL até 1990
Conjunto de BHR	4*	7*	-	-	10	8	58	-	-	34	66
Limnigrafia	5	30	12	-	47	10	161	52	-	81	223
Limnimetria do Açude	6	43	-	12	61	12**	351	-	40**	107	403
Pluviometria	72	306	10	12	400	144	2530	110	40	1404	2824
Pluviografia	13	44	6	3	66	26	335	66	12	227	439
Estação Meteorológica	2	8	-	-	10	4	58	-	-	32	62
Micró-bacia	-	-	8***	-	8	-	-	52***	-	-	52***
Parcela	-	-	10	-	10	-	-	65	-	-	65
TOTAL	102*	438*	38***	27	604	204	3493	293	92	1885	4084

* A Bacia de JUATAMA foi instalada pelo programa GEVJ e reinstalada pelo das BHR.

** Um acompanhamento mensal para verificar a qualidade química das águas de 60 açudes foi organizado por A. LARAQUE entre 1987 e 1989.

*** Os 52 postos x anos das microbacias não foram considerados visto que já se tinha contabilizado seus limnígrafos.

Siglas dos diferentes programas:

GEVJ : Grupo de Estudo do Vale do Jaguaribe, 1963-1967.
BHR : Bacias Hidrográficas Representativas, 1973-1992.
BHE : Bacias Hidrográficas Experimentais (SUMÉ e TAUÁ), 1981-1992.
AÇUDE : Desenvolvimento da Irrigação a partir dos Açudes, 1985-1991

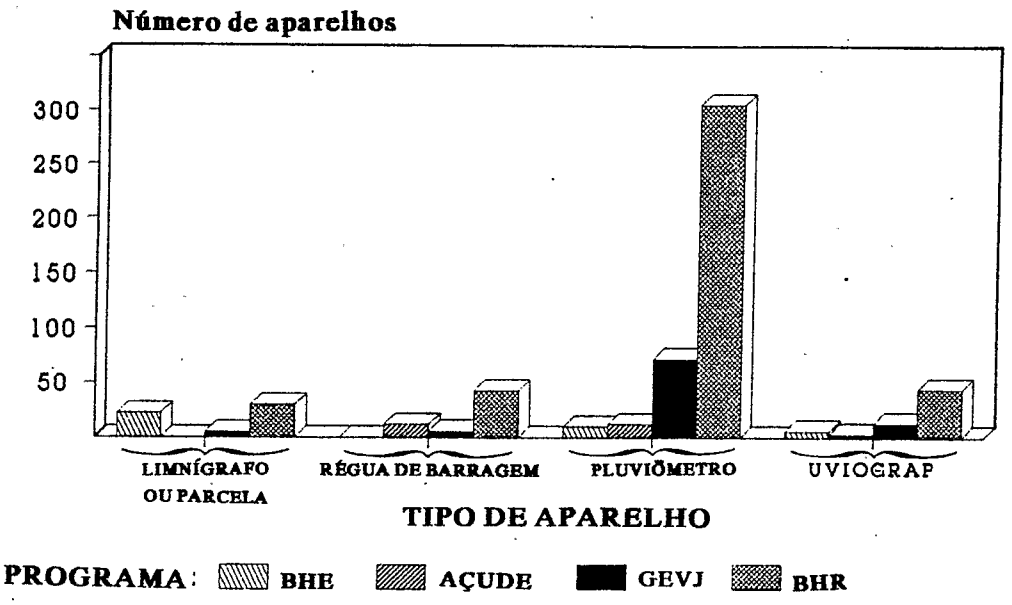


Fig. 1.15: Número de instrumentos instalados pelos diferentes programas

Esta tabela nos leva a fazer alguns comentários:

- O número de instrumentos instalados pelo GEVJ representa 17% do conjunto, porém, o número de anos de observação ou instrumentos x anos só representa 5% do volume de informações recolhidas. As bacias do GEVJ foram monitoradas, apenas, durante períodos muito curtos.

- O volume de informação recolhido até 1980 representa, aproximadamente, a metade do volume total coletado até 1990.

- Durante o período de 1981-90 nota-se um crescimento, proporcionalmente bem maior, das observações sobre **parcelas e microbacias** (que não existiam anteriormente) e das **observações limnimétricas em açudes**. Deve-se este crescimento, sobretudo, à intensificação desse tipo de medições nas BHR da TAUÁ, SUMÉ e AÇU. O desenvolvimento das medições nos açudes é uma conseqüência da conscientização e do interesse apresentado pelo monitoramento dos açudes, a fim de aperfeiçoar os conhecimentos hidrológicos. Os açudes tinham sido, até aí, considerados apenas como fatores que complicavam os funcionamentos hidrológicos das bacias e, portanto, a modelização e a transposição posterior dos seus resultados. Com efeito, não se sabia como equacionar o grande número de açudes existentes. Finalmente, resolveu-se utilizar estes açudes para substituirem parcialmente, mas de uma maneira muito mais barata, algumas estações hidrográficas. Assim, 11 dos 42 modelos ajustados provêm dos dados dos açudes.

- O pequeno volume de informações recolhidas no programa de Bacia Experimental, o qual representa menos de 7% do total, é de excelente qualidade. A homogeneidade desses dados possui um valor muito além do que se poderia esperar dessa pequena porcentagem. Além disso, os instrumentos dessas bacias experimentais foram instalados para esclarecer determinados pontos dos mecanismos hidrológicos e, também, porque pertenciam ao programa de pesquisa fundamental da ATP ORSTOM-CNRS. A contribuição dessas bacias experimentais aos cohecimentos atuais do funcionamento das pequenas bacias é, portanto, fundamental.

- O programa açude representa, uma parte excessivamente modesta do volume total da informação recolhida (apenas 2%). Uma circunstância agravante é o fato de que somente três dos doze açudes monitorados forneceram série hidropluviométricas de qualidade e de extensão suficientes para permitir o ajustamento de um modelo, o que é, lembramos, uma condição necessária para que uma bacia tenha uma contribuição significativa na elaboração do método de transposição. Várias razões explicam esses resultados decepcionantes em termos hidrológicos[5]:

  . Pouca duração do período de observação.

  . Os dois ou três anos observados tiveram, geralmente, uma distribuição das precipitações pouco favorável à geração da informação hidrológica. Com efeito, observou-se freqüentemente o seguinte esquema: um forte aguaceiro, no início da estação das chuvas, faz o açude logo transbordar, impedindo, assim, medir por limnimetria o volume das cheias seguintes.

  . A qualidade sempre medíocre dos dados, devida à pouquíssima quantidade de instrumentos instalados (1 pluviômetro, algumas vezes um pluviógrafo e uma simples bateria de réguas limnimétricas) complica a detecção e a correção dos erros. A capacitação e, algumas vezes, a motivação dos observadores são insuficientes.

  Todas essas imperfeições são, em parte, devidas ao caráter prioritário do monitoramento das zonas irrigadas em relação ao monitoramento hidrológico, o que é normal para um programa de irrigação.

- Enfim, damos algumas cifras para situar o volume de informações recolhidas em relação ao conteúdo do Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE (GUSMÃO *et al*, 1979).

  . Os 2.824 anos de pluviometria recolhidos nas pequenas bacias representam apenas 3,4% do volume total dos dados pluviométricos colhidos em todo o Nordeste.

  . 300 das 439 estações-anos de pluviografia das pequenas bacias foram digitadas e inseridas no Banco de Dados da SUDENE, o que representa perto de 50% da informação pluviográfica total do Banco.

[5] Outros resultados do programa Açude foram extremamante positivos e ricos em ensinamentos no que diz respeito ao manejo da água e das técnicas de irrigação.

SEGUNDA PARTE

2. TÉCNICAS HIDROLÓGICAS UTILIZADAS

Qual tipo de hidrologia utilizar e para quais pequenas bacias?

2.1 POBLEMÁTICA E ESPECIFICIDADE DA HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS

Os estudos hidrológicos das pequenas bacias desenvolveram-se de maneira muito distinta nas diversas regiões do globo.

Entre as várias razões conjunturais dificilmente previsíveis, dois grandes fatores podem explicar o dinamismo e o rumo adotados por esses estudos hidrológicos particulares:

- **As motivações existentes.**

- **Os meios disponíveis.**

2.1.1 Por que estudar as pequenas bacias?

As motivações que incentivaram os estudos das pequenas bacias são de natureza muito diversa e são formuladas de maneira mais ou menos explícita, consciente e coerente. Tentemos reagrupar estas motivações:

▪ Achar soluções para os problemas diretamente ligados aos aproveitamentos hidráulicos

A informação hidrológica requerida pode ser de natureza muito variada:

- Informações sobre as **cheias**: previsão em tempo real das descargas e alturas de água para implantar sistemas de alerta ou cálculo das características (volume, descarga máxima, etc...) das "cheias de projeto".

- Informações sobre os **volumes totais escoados**: módulos em ano médio ou em ano pluviometricamente deficitário de diversas freqüências; distribuição e irregularidade estacional dos escoamentos.

- Conhecimento e previsão necessários das **vazões de estiagem**, por exemplo, para a concepção dos projetos de aproveitamento sem armazenamento ou para o controle da poluição dos cursos d'água ou dos aquíferos.

- Informações sobre a **qualidade da água**, o transporte de sais, a origem e a propagação das poluições e as interações entre os aquíferos e os pequenos rios.

O tipo de estudo que responderá a estas diferentes questões será, evidentemente, muito diferente de acordo com a região do mundo: região temperada com ou sem gelo, região tropical úmida ou árida, preponderância ou não dos escoamentos de base sobre o escoamento superficial, etc. Além disso, convém distinguir o estudo de uma situação específica (por exemplo, o abastecimento de uma cidade ou de uma indústria), da determinação regional de características hidrológicas.

■ Aperfeiçoar os conhecimentos hidrológicos de uma região

Este segundo tipo de motivação não está diretamente ligado à instalação de um determinado aproveitamento hidráulico, mas nada impede, evidentemente, que se utilize mais tarde, para tal fim, os resultados obtidos.

Podemos classificar nesta categoria:

a) **Os estudos de pequenas bacias que visam compreender melhor o funcionamento dos grandes rios.**

. Assim, o estudo das bacias hidrográficas de COMBA, no Congo (MOLINIER, 1981), permitiu desde 1957 evidenciar e quantificar o papel preponderante da chapada dos Cataratas na gênese das cheias do rio KOUILOU.

. O estudo dos rios ou mayos do Norte dos Camarões permitiu avaliar a contribuição das zonas montanhosas nas inundações anuais das grandes planícies endoréicas ligadas ao LOGONE na bacia do lago TCHAD.

. O objetivo principal das pequenas bacias hidrográficas representativas instaladas no âmbito do programa de estudo do VALE DO JAGUARIBE, era o de melhor conhecer o funcionamento e os recursos hídricos das duas grandes zonas geológicas (cristalina e sedimentar) dessa bacia que cobre uma superfície de cerca de 90.000 km^2.

b) **Os estudos que visam conhecer melhor os mecanismos hidrológicos.**

Esse tipo de pesquisa, de natureza mais fundamental, não tem como objetivo responder diretamente a questões ligadas à instalação de aproveitamentos hidráulicos, mas corresponde a preocupações mais científicas que buscam compreender melhor os mecanismos de geração ou de transferência dos escoamentos ou confirmar uma hipótese ou uma teoria. Esses estudos

conduzem, às vezes, a realizar uma descoberta fundamental que corresponde a uma melhoria significativa dos conhecimentos, que pode se traduzir, por exemplo, por um aperfeiçoamento dos **modelos** no sentido de uma maior fidelidade ou aptidão para a transposição.
Nessa categoria entram as pesquisas e experimentos com **parcelas, lisímetros, perfis hídricos** ou **medições** com **monólitos** e as técnicas de **simulação de chuva**.

c) **Os estudos com fins didáticos.**

Os órgãos encarregados da formação de técnicos em hidrologia dispõem geralmente de "**bacias-escola**" que fornecem um campo de experimentação e de demonstração em tamanho reduzido e permitem assegurar uma formação prática de campo. Nessas bacias, os pesquisadores desenvolvem também as pesquisas fundamentais mencionadas no item precedente.

▪ Estudos induzidos pela existência de meios e recursos

Para o bom desenvolvimento dos estudos são necessários recursos humanos (número e competência dos técnicos), em equipamento e em crédito para funcionamento. Sua existência foi, algumas vezes, o que poderíamos chamar de "efeito perverso", determinante para a definição dos programas...
Quantos estudos foram decididos em função da disponibilidade de verbas ? Quantas vezes o número de sub-bacias tem dependido mais do número de limnígrafos existentes do que da complexidade do objeto hidrológico a ser estudado?

2.1.2 Imperativos e técnicas próprios às pequenas bacias

O pequeno tamanho das bacias impõe certo número de imperativos que diferenciam sua hidrologia das dos grandes rios.

2.1.2.1 Metrologia

- As pequenas bacias **geram deflúvios mais fracos** (em valor absoluto), o que torna as medições de descarga mais fáceis, permitindo, algumas vezes, a instalação ou a utilização de instrumentos de medição específicos, **como vertedouros**, medidores do tipo PARSHALL ou seção de medição estabilizada. A utilização de micromolinetes é, algumas vezes, indispensável. Por outro lado, os leitos dos rios apresentam maiores declividades, que provocam um **aumento das velocidades** e fenômenos de **erosão**, que diminuem a estabilidade das seções e complicam as medições das descargas.

QUADRO 2.1 : Como resolver os problemas hidrológicos das pequenas bacias?

PROBLEMA	SOLUÇÃO
Grande número de bacias e de situações.	- Zoneamento dos fatores condicionais. - Identificação das características hidrológicas a serem estudadas com prioridade em cada região. - Tipologia das bacias. - Planificação dos estudos.
A estimativa direta dos parâmetros hidrológicos (cheias, módulos de diversas freqüências, etc.) exige **longos períodos de observação.**	Técnicas de modelização que permitam simular um longo período de funcionamento da bacia a partir dos seguintes elementos: - um modelo de simulação ajustado e validado, - uma longa série pluvio e climatológica.
Rapidez e fugacidade dos fenômenos	- Técnicas de medições específicas. - Presença permanente,no campo, durante a estação das chuvas, de técnicos capacitados.
- **rápido** - **simples** - **econômico.**	O estudo hidrológico dos pequenos projetos de aproveitamento deve ser: Elaboração de métodos de transposição regional **que permitam o dimensionamento do aproveitamento quando não se dispõe de medições hidrológicas diretas.**

- As variações de descarga são muito mais rápidas nas pequenas bacias, o que complica a medição das mesmas. É preciso, às vezes, efetuar as medições à noite, ou antes do fim da chuva que gerou a cheia. Deve-se, no caso de variação rápida do nível da água, empregar técnicas tais como a medição de descarga por **verticais independentes**[6] ou métodos que permitam corrigir a **não-univocidade** das calibragens. A rapidez e a transitoriedade dos fenômenos impõem que se trabalhe rapidamente, que se disponha de equipes e de material que funcione corretamente, uma vez que os erros são, às vezes, irreparáveis.

- Enfim, é preciso assegurar uma perfeita **sincronização** dos diferentes instrumentos registradores (limnígrafos e pluviógrafos) com os relógios e cronômetros dos técnicos. É aconselhável que se disponha de **instrumentos de medição** capazes de gravar diretamente seus resultados sobre suporte informático e dispondo de relógio eletrônico. Eles permitirão uma análise automática precisa e confiável dos resultados.

[6] A técnica de medição de descarga por verticais independentes consiste em estabelecer uma espécie de curva de calibragem para cada vertical, o que impõe efetuar as medições sempre sobre as mesmas verticais. Ela apresenta a vantagem de diminuir a imprecisão da medição de descarga devida às variações de cota, visto que ela se limita à variação da cota que se produz durante a medição de uma só vertical. Deve ser aplicada cada vez que a variação de cota ultrapassa 10 a 15 cm por hora, nas pequenas bacias.

Ao se estudar os transportes sólidos e procurar analisar, por exemplo, a forma dos turbidigramas, seria muito útil poder dispor de um amostrador automático pilotado por microprocessador. Este instrumento requer muito cuidado ao ser operado.

- Os pequenos rios, sobretudo nas zonas secas, são sempre **intermitentes**. Isso complica e torna menos confiável o funcionamento dos limnígrafos, pelas seguintes razões:

  - obstrução dos tubos (ou canais) de comunicação com o rio, por animais ou depósitos diversos;

  - impossibilidade de testar o funcionamento da bóia do limnígrafo quando o rio está seco;

  - os depósitos de sedimento embaixo da bóia provocam uma diferença significativa entre as cotas registradas e o nível limnimétrico real.

2.1.2.2 Heterogeneidade das pequenas bacias

As bacias de pequeno tamanho podem ser mais sensíveis às **heterogeneidades locais** que se compensam geralmente entre elas, nas bacias maiores. Essas heterogeneidades não são evidenciadas nos documentos cartográficos existentes. Pode-se citar, por exemplo, as variações do tipo de alteração provocada pela mudança da inclinação das camadas geológicas, as quais só podem ser, verdadeiramente comprovadas depois da abertura de uma trincheira. As variações pedológicas extremamente rápidas que se observam em TAUÁ ou em SUMÉ oferecem um bom exemplo dessas variações que podem ser observadas em poucos metros de distância. Constata-se, nessas bacias, variações inesperadas dos escoamentos entre microbacias aparentemente semelhantes.

É difícil controlar o que se passa realmente nos limites de uma bacia muito pequena. É possível que o limite topográfico da bacia não coincida com a linha de separação dos escoamentos subterrâneos. Pode ser, também, que a parte do fluxo hídrico de superfície medido no exutório, dependa do tamanho da bacia como mostra FRITSCH (1990) para as bacia de ECEREX na GUIANA FRANCESA.

2.1.2.3 Noção de representatividade, necessidade de planificação

Por serem muito pequenas, elas são muito numerosas! Por isso, não é possível propor o estudo de todas as pequenas bacias de uma determinada região.

É preciso pois escolher, mas como?

Ocorre-nos, naturalmente, a idéia de escolher poucas bacias para representar um número maior. Para isto é necessário estabelecer a tipologia, definir quem vai representar quem. Esse conceito, no entanto, amadureceu ao longo dos anos. Inicialmente, as primeiras bacias representativas foram escolhidas para representar "a parte norte e montanhosa de determinada bacia" ou "a parte de tal região sobre xisto e coberta com uma determinada vegetação". Quando o número de bacias e de zonas se multiplica chega-se rapidamente a uma lista que aumenta de maneira desordenada, dificilmente separáveis de seu contexto e ininteligível para quem não conhece a região.

DUBREUIL (1965a) e DUBREUIL e GUISCAFRE (1971) propuseram o conceito de **zona hidrológica homogênea**. Precisa-se dividir a região estudada em zonas dentro das quais **cada um dos fatores condicionantes dos regimes hidrológicos só apresentem uma pequena variação.** Em cada uma dessas zonas os regimes hidrológicos só deveriam, então, apresentar fracas variações. Este zoneamento permite identificar os principais tipos de bacias existentes e, portanto, estabelecer de maneira racional a **lista das bacias que é preciso estudar.** Isto foi realizado por NOUVELOT, em 1974, no Nordeste Brasileiro e parece ser uma preliminar indispensável para qualquer tentativa de estudo geral dos regimes hidrológicos das pequenas bacias.

Essa técnica de planificação sofre, no entanto, de dois graves defeitos ligados justamente a sua concepção:

- Como escolher os fatores condicionantes dos regimes hidrológicos e os limites das suas classes, para efetuar o zoneamento, quando não se conhece ainda esses regimes?

- Essa planificação regional não leva em conta as variações das características locais dos solos e da vegetação ao longo das vertentes e das encostas, que se chamam **toposequência**. A organização, a permeabilidade relativa e a ordem de aparecimento dos diferentes solos, nessas toposequências, são fatores determinantes dos regimes.

Uma das soluções poderia ser uma planificação global bastante grosseira que identificasse apenas um número reduzido de grandes zonas homogêneas denominadas pela EMBRAPA (1991) de *Unidades de paisagem*. No interior dessas unidades de paisagem é preciso identificar os principais tipos de pequenas bacias que se pode encontrar. Voltaremos a este assunto.

2.1.2.4 Técnicas de homogeneização, de extensão de série e de modelização

Colocando-se de lado o caso de algumas raras pequenas bacias de referência "*bench Mark basin*"[7], parece difícil medir o comportamento das pequenas bacias durante um período suficientemente longo para que as observações tenham alguma significação estatística direta. Isso se agrava nas zonas áridas, onde os escoamentos são ainda mais irregulares. Evidenciou-se, por exemplo, na bacia representativa de TAUÁ que a média dos escoamentos observados durante dez anos foi superior em 40% à média interanual estimada, enquanto que a média pluviométrica nesse mesmo período esteve próxima da média interanual. Este exemplo mostra que, no Nordeste brasileiro, uma duração de dez anos de observações é insuficiente. Seria necessário esperar trinta, cinquenta ou talvez cem anos? Essas durações são proibitivas e justificam a utilização de técnicas de homogeneização, de extensão de séries e de modelização.

Essas técnicas consistem em corrigir os escoamentos observados em função das características específicas do período que lhe deu origem.

As correções ou a homogeneização são sempre efetuadas por intermédio de um **modelo** ajustado ao período observado que calcula os escoamentos em função das séries das chuvas e de outros parâmetros climáticos. Esses modelos, uma vez ajustados, são utilizados para gerar séries fictícias, chamadas de "longa duração", a partir de pluviômetros confiáveis e representativos da região. As séries assim geradas serão objeto de uma análise frequencial dos escoamentos, que permite, em princípio, **sw libertar do período realmente observado.**

A rapidez dos fenômenos nas pequenas bacias requer sempre a utilização de **modelos específicos com pequenos intervalos de tempo.**

É evidente que o tipo de modelo escolhido, seu intervalo de tempo e seu modo de ajustamento podem introduzir um desvio que se deverá sempre tentar minimizar e controlar.

2.1.2.5 Interpretação dos resultados e elaboração de sínteses regionais.

A interpretação dos resultados para obtenção das conclusões relativas aos regimes hidrológicos, constitui, sem dúvida, a parte mais delicada dos estudos de pequenas bacias. Convém porém tentar explicar os comportamentos hidrológicos pelas características fisicoclimáticas das bacias.

Os dois tipos de dados com necessidade de cruzamento e comparação são de natureza diferente:

- Os resultados da **análise hidrológica** já devem estar processados, criticados, depurados. A formalização e o nível de detalhamento dos seus resultados devem ser concebidos em função

[7] TOEBES e OYRYVAEV (1970) recomendam estudar de maneira permanente um pequeno número de bacias escolhidas para servir de referência e permitir a correção e homogeneização de observações de menor duração.

da utilização que deles se quer fazer. Assim, se se estuda as cheias, os volumes escoados devem ser calculados para cada evento chuva-escoamento; calcular-se-á para isso, os tempos de base, os picos de cheia e as outras características dos hidrogramas. Se se quer estudar, ao inverso, os escoamentos de base, esforçar-se-á por evidenciar os coeficientes de recessão, etc.

- **As características fisiográficas da bacia** são mais difíceis de representar de maneira simples e com fidelidade. A descrição de um simples perfil pedológico já requer certo número de convenções, de códigos e de hipóteses simplificadoras. Quando se passa à descrição de uma toposequência, existe uma dimensão ou um grau de liberdade suplementar a integrar e a descrever. Uma bacia é constituída de uma infinidade de toposequências sem falar das variantes provocadas pela vegetação e pela ação do homem, dos animais ou de outros fatores ainda desconhecidos. A representação de toda essa complexidade por um pequeno número de parâmetros numéricos ou descritivos simples é ao mesmo tempo indispensável e conduz, inevitavelmente, a uma degradação da informação.

As conclusões que se poderia tirar da reunião destes dois tipos de informação dependerão pois de sua formalização e de sua aptidão para representar a realidade. O valor dessas conclusões dependerá também das **observações qualitativas efetuadas no campo**. Foi observando a chuva escoar na superfície do solo que surgiu a idéia de estudar as conseqüências dos encrostamentos e outros efeitos na supracitada superfície. A observação de certas ressurgências ou trechos de solos não molhados sugerem a idéia de caminhos preferenciais da água; grandes árvores sempre verdes indicam a presença de um lençol, etc.

Essas conclusões dependerão, enfim, do **esquema de funcionamento** ou da **teoria que se procura adaptar aos fatos de maneira mais ou menos explicitada**.

A escolha e a aplicação de um esquema ou de uma teoria pedem muita intuição e sensibilidade. É preciso saber a partir de que ponto não se pode mais desprezar as diferenças inexplicadas. Gerações de hidrólogos, por exemplo, se obstinaram em aplicar o esquema de escoamento superficial de HORTON e em calcular coeficientes de escoamento superficial globais que não se comportavam inteiramente como preconizava a teoria, em função da intensidade da chuva. Constatou-se, recentemente, que a teoria das zonas contributivas se adapta muito melhor a toda uma categoria de bacias. Os fatos se repetem e acabam gerando novas teorias, que podem corresponder a saltos qualitativos e aos progressos reais da ciência hidrológica.

A reunião das interpretações realizadas num conjunto de bacias de uma região conduz à apresentação dos resultados sob a forma de **síntese regional**. É o caso, por exemplo, do método de avaliação das cheias das pequenas bacias propostas por RODIER e AUVRAY (1965), o catálogo dos estudos de superfície CASENAVE e VALENTIN (1989). Estes trabalhos podem ser utilizados em toda uma região para fins práticos.

2.2 CONCEITOS E ESQUEMAS ATUAIS DA HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS. RESUMO BIBLIOGRÁFICO.

Antes de darmos continuidade, façamos uma brave avaliação da contribuição trazida pelas publicações e trabalhos existentes no Brasil e no exterior. Limitar-nos-emos aos trabalhos ligados ao conhecimento e ao manejo dos recursos em água nas zonas secas, evitando-se os trabalhos muito gerais como VAN TE CHOW (1964) ou M. ROCHE (1963), etc. A análise dos trabalhos que tratam especificamente das cheias será efetuada no início do quinto capítulo.

Reagrupamos nossa análise por tema:

▪ Os aspectos teóricos

Numerosos autores interessaram-se por melhor compreender os mecanismos que favorecem ou dificultam o escoamento, abordando, às vezes, problemas da planificação dos Recursos Hídricos ou das redes de medição. Alguns, como L'HOTE (1987), interessaram-se pelo aspecto histórico do ciclo da água. HEWLETT e NUTTER (1970) e MEROT (1988) propuseram uma nova teoria supondo que o escoamento superficial provém sobretudo das partes baixas das bacias que se tornaram impermeáveis pela saturação em água. Quando as fortes chuvas se acumulam, o tamanho dessas zonas saturadas aumenta o que explica o crescimento do coeficiente de escoamento global da bacia. Essa teoria opõe-se à concepção Hortoniana (HORTON, 1933) do escoamento. Ela está adaptada aos modos de funcionamento de numerosas bacias de zonas úmidas e/ou que apresentam grandes baixios. A zona de predileção desse esquema não é, contudo, o semi-árido. Resulta, em particular, incapaz de explicar corretamente os "*efeitos de superfície*" para os quais uma degradação da superfície do solo (retirada da camada superficial e entupimento dos microporos) provoca sua impermeabilização e fortes escoamentos.

Outros autores, como IBIZA (1984-85a) (1984b) e MORELL-SEYTOUX (1973a,1973b, 1974 e 1975) interessaram-se pelos processos de infiltração e pelas funções de produção, isto é, o modo de repartição das precipitações entre a infiltração e o escoamento superficial.

GIRARD (1975), GIRARD *et al* (1972), IBIZA (1983), CORREIA e MOREL-SEYTOUX (1985), TUCCI (1987), DUNNE (1983), LANNA e SCHWARZBACH (1989) e SERVAT (1986) interessaram-se pela modelização hidrológica, instrumento de análise, que se tornou indispensável.

A polêmica e a provocação, felizmente, existem para animar essa ciência considerada austera. KLEMES (1986) analisa, por exemplo, o papel do diletantismo em hidrologia!

Vários autores interessaram-se por técnicas de estudos de pequenas bacias, chamado estudo de "bacias representativas". Assinalemos, primeiramente, o excelente guia editado pela UNESCO (TOEBES e OURYVAEV (1970) e os trabalhos de planificação efetuados pelo ORSTOM, sempre em regiões tropicais: DUBREUIL e GUISCRAFRE (1971), DUBREUIL (1965a), NOUVELOT (1974), CADIER e POURRUT (1979).

■ Conhecimentos do meio físico das pequenas bacias

Numerosos autores dedicaram-se ao conhecimento mais aprofundado da fisiografia das bacias, buscando, algumas vezes, unir os caracteres físicos às observações hidrológicas.

Primeiramente, DUBREUIL *et al* (1972) calcularam, ajustaram e homogeneizaram as características de numerosas bacias estudadas pelo ORSTOM nas zonas tropicais. Esse trabalho reunia, de maneira sintética, as características morfométricas e geológicas dessas bacias. Mais tarde, percebeu-se que as informações referentes aos solos, à conservação da superfície e da cobertura vegetal eram insuficientes.

Várias publicações buscaram definir melhor os parâmetros mais pertinentes e seu modo de cálculo, DUBREUIL (1966, 1967). O estudo das relações entre esses caracteres físicos e os comportamentos hidrológicos foram, igualmente, objeto de numerosos trabalhos: DUBREUIL *et al* (1975), DUBREUIL e VUILLAUME (1975), DUBREUIL (1970, 1986) e RODIER e VUILLAUME (1980).

■ A vegetação

A vegetação é o primeiro elemento da bacia que recebe a chuva. Seu papel é complexo e vários autores esforçaram-se para descrevê-lo e analisá-lo. A lista é longa, citemos, apenas, por exemplo, BULTO *et al* (1976), CAMUS *et al* (1976), FRANKE *et al* (1982), GIRARD (1974), SOPPER e LYNCH (1970) e FRITSCH (1990).

■ O solo

O solo, que recebe a chuva imediatamente após a vegetação, está a ela intimamente ligado. O tipo e o vigor da vegetação dependerão da espessura e da fertilidade do solo; a conservação da superfície do solo e a intensidade da erosão serão funções da proteção oferecida pela cobertura vegetal, da ação das raizes e da fauna que lhe está associada.

Demonstrou-se que nas zonas semi-áridas, o papel da conservação da superfície do solo e de seus primeiros decímetros é preponderante.

Desde WISCHMEIER e SMITH (1978), numerosos autores dedicaram-se a este assunto; citemos: CASENAVE e VALENTIN (1989), DUBREUIL (1966), LEPRUN (1984-1985), THEBE e PONTANIER (1989), MOLINIER *et al* (1989a), BARRETO *et al* (1989), etc.

■ A evaporação e a evapotranspiração

A evaporação é um fenômeno que modifica as reservas de água do solo ou das barragens. Ao contrário do solo e da vegetação que desempenham um papel de condutor das precipitações, cujos efeitos se fazem sentir em curtos espaços de tempo, a evaporação tem uma inércia ou um tempo de resposta muito mais longo, levando o pesquisador a contentar-se, apenas, com as suas médias diárias ou decenárias. A compreensão dos mecanismos da evaporação requer, no entanto, uma análise com intervalo de tempo muito mais curto, como mostrou POUYAUD (1985). RIOU (1975) propôs um método de avaliação prática da evaporação para diferentes zonas climáticas africanas. BLANEY e CRIDDLE (1952) e TURC (1954) propuseram fórmulas empíricas para estimar a evaporação. MORTON (1983) estudou a evaporação nas represas. No Nordeste brasileiro, HARGREAVES (1974, 1975) efetuou o cálculo da evaporação através de numerosas estações meteorológicas brasileiras, cujos resultados foram reunidos em um trabalho muito utilizado por projetistas. GIRARD (1966) e MOLLE (1989a, 1989b e 1991) estudaram a evaporação dos açudes e PASSERAT *et al* (1989), a influência da vegetação aquática na evaporação.

■ A transposição dos resultados para outras bacias

A transposição dos resultados constitui um dos principais objetivos dos estudos de pequenas bacias. Os trabalhos a esse respeito são relativamente raros.

RODIER (1982) esforçou-se para *fazer a avaliação* desse problema como, também, propôs vários métodos práticos para transpor certas características hidrológicas, (RODIER e AUVRAY, 1965; RODIER, 1976a e 1976b). Publicou, igualmente, os resultados referentes às bacias permeáveis do SAHEL (RODIER, 1989), cujos mecanismos de funcionamento apresentam numerosas analogias com os que são observadas no Nordeste.

■ Os trabalhos destinados aos planejadores

Numerosos trabalhos, menos ambiciosos do ponto de vista teórico, esforçam-se por apresentar soluções práticas para responder aos problemas encontrados pelos planejadores.

Autores americanos publicaram os primeiros trabalhos que se referem a este domínio. Deve-se, mencionar, sem dúvida, o DESIGN of SMALL DAMS cuja primeira edição remonta a 1960, (BUREC, 1987) e os manuais editados pelo Soil Conservation Service SCS (1975).

Dentre as obras mais recentes, citamos os excelentes trabalhos consagrados ao aproveitamento dos baixios africanos (BERTON, 1988) e à síntese dos resultados das pequenas bacias francesas, publicada pelo CEMAGREF (MICHEL, 1990).

DUBREUIL e CAMPELLO (1966) estabeleceram normas climáticas para o Nordeste, CADIER *et al* (1989, 1990)) e MOLLE (1991c) propuseram normas de dimensionamento de represas.

■ Trabalhos específicos da hidrologia do Nordeste brasileiro

Vários trabalhos hidrológicos permitem acompanhar a evolução e os progressos dos conhecimentos hidrológicos dessa região; AGUIAR (1940) é o primeiro a propor um método de avaliação dos recursos adaptado aos dados da parte norte do Sertão. As estimativas e as intuições deste autor foram confirmadas durante os decênios seguintes. PIOGER (1964) avaliou o nível de conhecimento sobre a hidrologia dos açudes do Nordeste. Os estudos de síntese do GEVJ (DUBREUIL *et al*, 1968) introduziram técnicas hidrológicas modernas.

Mencionemos, a seguir, os trabalhos de base que constituem o PLIRHINE (SUDENE, 1980), os anuários pluviométricos, os mapas hidrogeológicos, geológicos e topográficos editados pela SUDENE e os mapas de solos elaborados pela EMBRAPA.

O DNAEE (1984) elaborou um mapa geral das disponibilidades em água do Brasil, e o DNOCS, numerosos documentos específicos, como o plano diretor do rio PAJEU, DNOCS (1981). A EMBRAPA também elaborou vários documentos de referência, EMBRAPA (1981).

Assinalemos, finalmente, vários trabalhos que abordam assuntos mais específicos:

CAMPELLO (1979) elaborou uma primeira síntese dos funcionamentos de pequenas bacias, tendo por base uma modelização sistemática de seus resultados.

LANNA (1983) aborda o problema da regionalização dos estudos hidrológicos de pequenas bacias.

VIEIRA *et al* (1983) decrevem a informação disponível a respeito desse assunto, no Nordeste.

LARAQUE (1991) estudou o problema da evolução da salinização nos pequenos açudes.

As equipes da SUDENE e do ORSTOM elaboraram uma coleção que atinge, no momento, trinta trabalhos, principalmente consagrados à publicação dos resultados obtidos nas bacias hidrográficas representativas. Citemos as principais sínteses publicadas nessa coleção: NOUVELOT *et al* (1979; CADIER e FREITAS (1983); CADIER *et al* (1983b); LEPRUN *et al* (1983); LARAQUE (1989); MOLLE (1989b); HERBAUD *et al* (1989a e b); CAVALCANTE *et al* (1990).

DUBREUIL e GIRARD (1970), CADIER et DUBREUIL (1986), MOLLE *et al* (1986) e CADIER *et al* (1987) estudaram a influência dos açudes sobre os regimes hidrológicos.

MOLLE (1989b, 1991a e 1991b) estudou a forma dos açudes, as perdas por evaporação e a infiltração, elaborando um inventário sobre o assunto.

BORGES (1977) analisa o funcionamento de 47 açudes de tamanho maior.

MOLINIER *et al* (1989a) analisaram a hidrodinâmica de uma toposeqüência da bacia de SUMÉ, propondo uma análise e uma quantificação de vários novos tipos de funcionamento hídrico.

LEPRUN (1983, 1984-85 e 1986) avaliou os problemas de conservação do solo e da erosão nessa região.

JACON e SECHET (1980) descreveram a introdução de técnicas modernas de tratamento de dados que resultaram no Banco de Dados Hidrometeorológicos do PRN/HME da SUDENE.

HIEZ (1977, 1978) introduziu técnicas novas de homogeneização e de críticas de dados pluviométricos.

2.3 TÉCNICAS UTILIZADAS NO NORDESTE BRASILEIRO

As autoridades brasileiras decidiram em 1973, sob a impulsão de M.S. CAMPELLO, lançar um plano de estudo de bacias representativas abrangendo toda a região Nordeste que cobre 1.600.000 km^2. Esse plano, muito ambicioso, previa o estudo de 22 bacias hidrográficas diferentes num período de dez anos.

Para começar esses estudos de maneira rotineira foi preciso organizar detalhadamente todas as suas etapas.

Vamos descrever o que foi previsto para cada uma dessas etapas, indicando os motivos das escolhas feitas e analisando as causas dos sucessos e insucessos. O quadro 2.2 indica as principais etapas desses estudos. Começamos naturalmente pela apresentação da planificação que é fundamental, pois orienta e define os demais estudos.

2.3.1 Planificação inicial da rede de Bacias Hidrográficas Representativas

2.3.1.1 Planificação efetuada por NOUVELOT em 1974.

NOUVELOT realizou em 1974 uma planificação utilizando o conceito de zona hidrológica homogênea. Cada uma dessas zonas é obtida superpondo-se os limites de classe de um certo número de"*fatores condicionantes*" dos regimes hidrológicos. Esses fatores condicionantes são os fatores físico-climáticos suscetíveis de ter relação, mais ou menos estreita, com as características hidrológicas.

NOUVELOT escolheu quatro fatores condicionantes definidos da seguinte maneira:

a) **A precipitação anual H:**

H_1 : inferior a 400 mm
H_2 : entre 400 e 600 mm
H_3 : entre 600 e 800 mm
H_4 : entre 800 e 1.100 mm
H_5 : entre 1.100 e 1.500 mm
H_6 : superiores a 1.500 mm.

O sufixo +, após a classe de precipitações indica um regime pluviométrico complexo com duas estações de chuva, como é o caso na parte meridional do Nordeste, (por exemplo H_{3+}). Sua ausência indica uma só estação de chuva.

b) **A permeabilidade do sub-solo P:**

P_1 : impermeável
P_2 : permeabilidade fraca a média
P_3 : permeabilidade média a elevada
P_4 : zona muito permeável
P_5 : zona kárstica.

QUADRO 2.2 : Etapas dos estudos hidrológicos de pequenas bacias

ETAPAS	PONTOS CRÍTICOS
PLANIFICAÇÃO : Zoneamento e tipologia das bacias. Plano e cronograma dos estudos.	- Escolha dos critérios de zoneamento (Precipitações, solos...) - Definição dos parâmetros hidrológicos a estudar: módulos, Qmax, Salinidade. - Encontrar uma técnica de zoneamento e tipologia regional que não "oculte" demais as diferenças locais.
PROSPEÇÃO: Escolha da bacia. Determinação de seus caracteres fisiográficos.	- Representatividade - Acessibilidade; facilidades logísticas.
IMPLANTAÇÃO DA REDE DE MEDIÇÃO : - Rede pluviométrica. - Rede hidrométrica. Elaboração de um relatório de instalação.	- Boa cobertura espacial da rede. - Observadores competentes residindo próximo da bacia. - Estabilidade dos leitos dos rios. - Qualidade hidráulica dos escoamentos: velocidades corretas, fracos transbordamentos. - Posicionamento do limnígrafo.
OPERAÇÃO DA REDE DE MEDIÇÃO: - Medições de terreno - Coleta, crítica e processamento dos dados. - Elaboração de relatórios de campanhas anuais.	- Garantir os meios de funcionamento durante vários anos. - Viagens regulares,ao campo,de pessoal especializado.
SÍINTESE FINAL PARA CADA BACIA: - Modelização chuva x deflúvio - Confrontação dos resultados hidrológicos com os caracteres fisiográficos das bacias. - Interpretação dos resultados.	- Modelização: seleção, ajustamento, validação, extensão da série. - Diminuir a subjetividade das simplificações necessárias.
MÉTODO DE TRANSPOSIÇÃO REGIONAL	A análise multicriteriosa é sempre delicada.

c) **O relevo da bacia R**

O relevo R utiliza o conceito de desnível específico (D_s), definido por DUBREUIL e GUISCAFRE (1971):

$$D_s = D \times A^{+0.5} \times L^{-1} \text{ onde:}$$

.**D** é a diferença de altitude, expressa em metros, que separa as curvas de nível que têm abaixo delas, respectivamente, 5% e 95% da superfície da bacia.
.**A** é a superfície da bacia em km^2.
.**L** é a extensão do retângulo equivalente, em km.

Segundo esses autores, D_s permite estender as classes de relevo estabelecidas para um tamanho de bacia padrão (25 km^2), para superfícies diferentes. Convém, entretanto, fixar limites para as possíveis superfícies. No seu trabalho, esses autores admitiram 7 e 500 km^2 como limites, por razões ligadas à precisão dos documentos cartográficos disponíveis.

R_1 : muito fraco	Ds < 10 m
R_2 : bastante fraco	10 m < Ds < 25 m
R_3 : fraco	25 m < Ds < 50 m
R_4 : moderado	50 m < Ds < 100 m
R_5 : forte	100 m < Ds < 250 m
R_6 : bastante forte	250 m < Ds < 500 m
R_7 : muito forte	500 m < Ds

d) **A altitude da bacia A**:

A_1 : inferior a 500 m
A_2 : compreendida entre 500 e 800 m
A_3 : compreendida entre 800 e 1.000 m
A_4 : superior a 1.000 m.

O número teórico de combinação dessas classes é de 1.680. Estilizando certos limites dos fatores condiconantes para facilitar as superposições, **NOUVELOT obteve as 229 zonas homogêneas** já mencionadas e chegou, então, a um **plano com duração de cinco anos, para instalação de 20 BHR**, do qual já falamos no parágrafo 1.2.3.

2.3.1.2 Pertinência do zoneamento e da planificação realizada por NOUVELOT

Essa planificação apresenta a vantagem de identificar, de quantificar os principais tipos de zonas existentes no Nordeste e de apresentá-las de maneira clara e atraente aos interessados pelo programa de BHR.

No entanto, à luz dos resultados presentemente obtidos, podemos apresentar algumas críticas e propostas para melhorar a técnica utilizada por NOUVELOT. A planificação permanece, no entanto, como uma etapa preliminar indispensável para todo estudo sistemático de BHR.

Sem falar no fato de que alguns usuários tenham utilizado indevidamente o zoneamento de NOUVELOT para efetuar transposições de regimes para os quais esse zoneamento não tinha sido previsto, sabemos hoje, que dois dos quatro parâmetros - o relevo e a permeabilidade do subsolo - não são muito pertinentes para a determinação dos escoamentos anuais nas zonas secas.

Tentaremos avaliar a "*pertinência*" de cada fator condicionante em função da sua aptidão, para representar as variações dos regimes hidrológicos.

- **Pertinência do fator Relevo:**

Se parece evidente que este fator influencia os tempos de características das cheias por razões de transferência hidráulica das cheias nos leitos dos rios, **não chegamos a evidenciar o papel do relevo** nem nos módulos anuais nem nas amostras das parcelas dos Institutos de Pesquisas Agronômicas (BARRETO *et al*, 1989) nem nas das BHR, nem nas bacias da rede geral, visto que se chega mesmo a correlações ligeiramente negativas entre o escoamento e o relevo, como mostramos no capítulo 4. Além disso, NOUVELOT determinou suas classes de relevo a partir de mapas de 1:1.000.000, tomando para o cálculo das classes de relevo, bacias de tamanho geralmente superior a 500 km^2. Isto introduz um desvio, pois, atribui um peso excessivo às partes mais acidentadas da bacia, "levando" assim para as classes R_4 a R_6 grandes zonas planas onde, na realidade, o relevo da maioria das pequenas bacias elementares não ultrapassa R_2 ou R_3.

- **Pertinência do fator subsolo:**

Nas zonas semi-áridas, a influência da **vegetação**, do estado da **superfície do solo** e dos **primeiros decímetros do solo** são determinantes na gênese dos escoamentos. Isso não é diretamente levado em conta pelas classes de fator permeabilidade do subsolo. Estas classes permitem, certamente, separar os dois grandes modos de funcionamento: cristalino e sedimentar. Porém esse fator não permite diferenciar, por exemplo, uma bacia cujo subsolo granítico gerará areias graníticas espessas e permeáveis que só produzirão pouco escoamento, de uma outro bacia sobre xistos gerando solos argilosos pouco espessos que provocarão um escoamento abundante. Teria sido melhor efetuar o zoneamento da permeabilidade a partir de um mapa de solos. Infelizmente, tal mapa não existia em 1973, o que explica as orientações

tomadas por NOUVELOT. Quanto à vegetação, os documentos existentes eram em pequena escala e refletiam apenas as zonas climáticas.

- **Pertinência do fator precipitação:**

As precipitaçoes são um fator explicativo dos escoamentos o qual, felizmente, foi bem evidenciado em todas as tentativas de determinação dos fatores condicionantes apresentados no capítulo 4. A escolha desse fator é, pois, **muito pertinente.**

As tentativas de zoneamento dos escoamentos evidenciam, no interior do Nordeste semi-árido, duas grandes zonas climáticas[8]. Dentro de cada uma dessas zonas, os escoamentos se ajustam a uma lei exponencial, mas **não dependem** da existência de uma ou de duas estações de chuvas assinaladas com o sinal (+) por NOUVELOT.

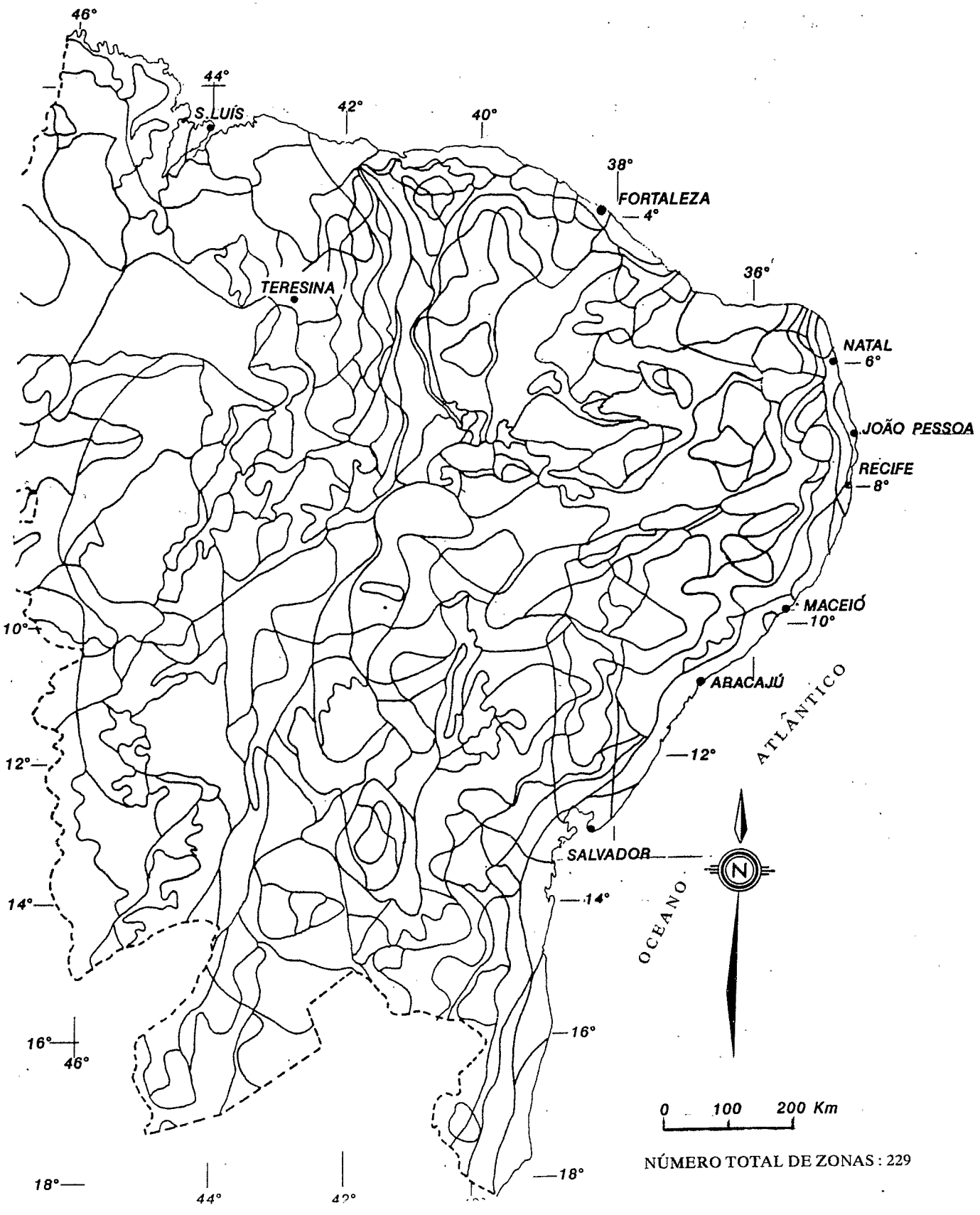
Recomendaríamos, hoje, depois de 16 anos, considerar a zona climática (SERTÃO ou TRANSIÇÃO) como um fator a mais do total anual considerado por NOUVELOT. Mas era impossível conceber essas zonas climáticas apenas com os elementos disponíveis naquela época.

- **Pertinência do fator altitude:**

As classes de altitude definidas por NOUVELOT estão, evidentemente, ligadas à temperatura e à evaporação.
Além disso, é provável que certos microclimas de altitude, nitidamente menos ensolarado e com cerração constante sejam freqüentemente classificados como A_4.
Este fator "altitude" é pertinente na medida em que ele permite identificar micro-climas de altitude.

[8] Essas zonas climáticas são delimitadas experimentalmente, comparando-as aos resultados do mesmo conjunto de parâmetros de modelo hidrológico que utiliza sucessivamente vários pluviômetros diferentes como entrada. Sua determinação depende da distribuição dos totais em 24 h e de outras características geográficas (distância do oceano, etc).

Figura 2.1: As zonas hidrológicas do Nordeste brasileiro *(segundo NOUVELOT).*



2.3.1.3 Como planificaríamos hoje?

Sem que se retire qualquer mérito ao trabalho efetuado por NOUVELOT que naquela ocasião desempenhou um papel de precursor e conseguiu apresentar, num prazo bastante pequeno, uma planificação exaustiva, coerente e de fácil compreensão, propomo-nos agora sugerir algumas recomendações que poderiam ser utilizadas para uma atualização desse trabalho de base.

Essas recomendações foram suscitadas, por um lado, pela existência de documentos novos que não existiam em 1973, como os mapas pedológicos, as imagens de radar ou satélite ou o zoneamento sintético da EMBRAPA e, por outro lado, pelos conhecimentos adquiridos, desde então, sobre os comportamentos das pequenas bacias, os quais permitiram evidenciar os fatores condicionantes mais importantes.

Propomos dois conjuntos de recomendações que correspondem a dois roteiros ou técnicas diferentes. Comentaremos e descreveremos, apenas, a parte que se refere às zonas semi-áridas.

a) Primeiro roteiro de zoneamento

Conserva-se o princípio de delimitação de zona homogênea por superposição de "classes de fatores condicionantes". Propomos os fatores seguintes:

- **Dois fatores fundamentais:**

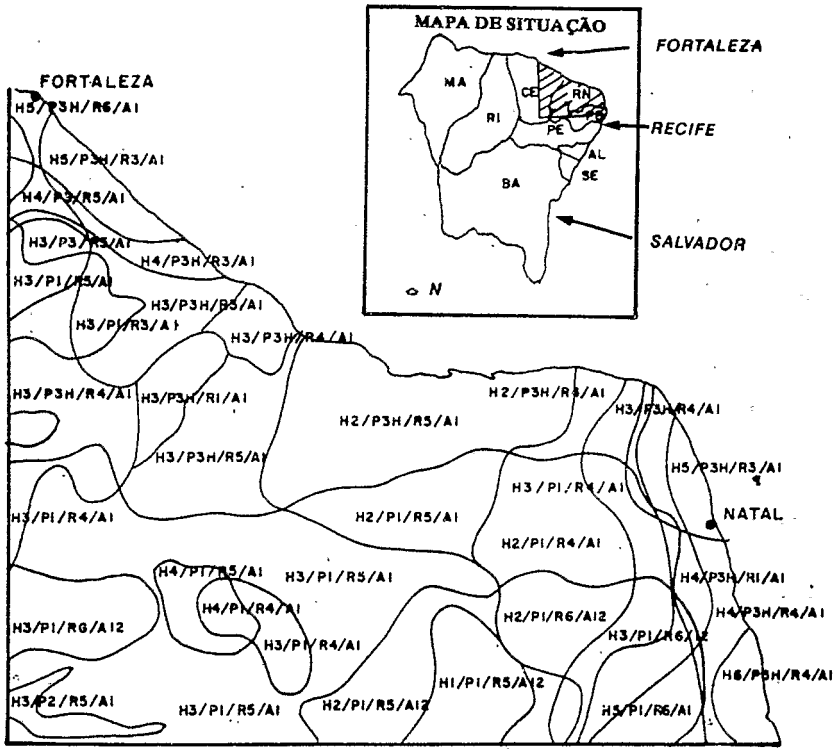
  1) Precipitações e a zona climática (ver parágrafo anterior).

  2) O funcionamento hidrodinâmico dos solos. Na escala da planificação, não é possível efetuar um zoneamento pedológico detalhado. É preciso se limitar à delimitação de grandes zonas nas quais se encontrará, em proporções variáveis, um certo número de associações, de reagrupamentos ou de famílias de solos. O zoneamento efetuado em 1991 pela EMBRAPA é um bom exemplo do que nos propomos.

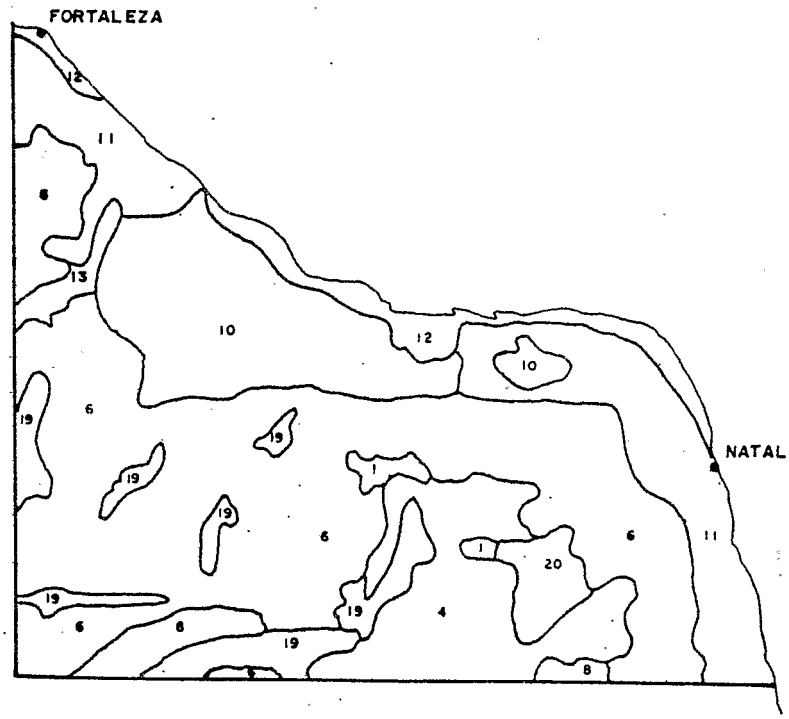
- **Vários fatores complementares** que permitam diferenciar, se necessário, subzonas. Esses fatores complementares devem intervir apenas no caso de diferenças bem marcantes. Podemos propor os fatores seguintes:

  - Estado de **conservação da vegetação** e freqüência do aparecimento de fenômenos de **degradação da superfície dos solos** (se existirem tendências regionais claras demonstradas nos mapas ou imagens).
  - **Altitude** que é ligada à evapotranspiração ou a microclimas de altitude.
  - **Densidade de Açudes.**
  - Qualquer outro fator que pareça importante numa determinada zona (por exemplo, urbanização, etc).

Figura 2.2: Comparação de dois tipos de zoneamento



ZONAS HIDROLÓGICAS HOMOGÊNEAS SEGUNDO NOUVELOT(1974)



ZONEAMENTO DA EMBRAPA (1991)

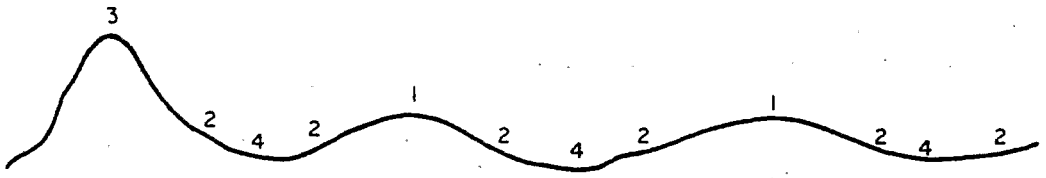
Visto que, de todas as maneiras, é impossível efetuar para uma grande região, um zoneamento suficientemente detalhado para delimitar todos os tipos de pequenas bacias existentes, é preciso se esforçar para demarcar zonas com **maior dimensão possível**, indicando na legenda quais os tipos de pequenas bacias que cada zona pode conter.

É necessário utilizar sempre que possível as **imagens de radar** que mostram claramente as zonas de geomorfologias diferentes e as **imagens de satélites** que podem fazer o mesmo para os tipos de ocupação do solo e os açudes.

O relevo não foi considerado como fator de zoneamento. Por que? Antes de tudo, o relevo já está implicitamente presente nos mapas de solos utilizados na classificação hidrodinâmica dos mesmos e, além do mais, porque esse fator condicionante está, muitas vezes, "ocultado" por outros fatores. Enfim, não existem, na parte do Nordeste estudada, zonas de relevo extremadamente forte ou ao contrário, zonas muito planas que poderiam provocar perdas de escoamento por endoreismo (como o que acontece na África). Deve-se isto a movimentos tectônicos ativos nessa parte do Brasil. Se for preciso utilizar o relevo como fator de delimitação de zonas, deve-se recorrer a mapas geomorfológicos ou a mapas de declividade.

b) Segundo roteiro de zoneamento

Tentar apoiar-se sobre um zoneamento muito mais global, no qual são identificadas **zonas bem maiores ou Unidades de Paisagem** que podem conter, cada uma, vários tipos de bacias algumas vezes muito diferentes, mas que correspondem, no interior de cada zona, a situações geológicas, pedológicas ou morfológicas bem definidas e para as quais podem ser descritas toposequências características. A título de exemplo, apresentamos nas figuras 2.2 e 2.3 um extrato do trabalho efetuado recentemente pela EMBRAPA (1991) que comparamos ao trabalho de NOUVELOT para a mesma região. O número das zonas diminuiu, mas esse zoneamento paradoxalmente ganhou em precisão uma vez que ele não está mais submetido aos ajustamentos impostos pela superposição dos limites dos diferentes fatores. A figura 2.3 mostra uma seqüência característica de solos que são encontrados na maior zona identificada pela EMBRAPA, chamada **DEPRESSÃO SERTANEJA**, que cobre quase 370.000 km^2, ou seja, cerca de 40 % da zona semi-árida.



Unidade de paisagem: DEPRESSÃO SERTANEJA

Obs: Os números correspondem as "situações" abaixo referidas

Figura 2.3 : Seqüência de solo freqüente numa unidade de paisagem da EMBRAPA.

Segundo a EMBRAPA, os solos mais freqüentes nas quatro situações características das partes da **DEPRESSÃO SERTANEJA** cujo relevo é ondulado a forte ondulado, são os seguintes:

Situação 1 - Parte alta do relevo

BRUNOS NÃO CÁLCICOS: solos planos a ondulados, medianamente drenados, textura média/argilosa, pedregosos e fertilidade natural elevada.

Situação 2 - Parte baixa das vertentes

PLANOSSOLOS: solos pouco profundos, mal drenados, textura argilosa e medianamente argilosa e fertilidade natural média com problema de salinização.

BRUNOS NÃO CÁLCICOS VÉRTICOS: solos pouco profundos, mal drenados, textura média/argilosa e fertilidade natural elevada.

Situação 3 - Filão de quartzo residual (*que geralmente forma uma crista ou um serrote*)

SOLOS LITÓLICOS: solos planos, textura argilosa e média, predegosos e fertilidade natural média.

Situação 4 - Fundos de vales

SOLOS ALUVIAIS: solos profundos, medianamente drenados, textura confusa e fertilidade natural média a elevada.

Constata-se, percorrendo grandes distâncias no Nordeste, que o encadeamento ou seqüência de solos, descrito pela EMBRAPA, se repete muito freqüentemente. As bacias que lhes estão associadas deveriam, logicamente, apresentar uma certa similaridade.

2.3.2 Instalação de uma bacia hidrográfica representativa

Não é nossa intenção elaborar aqui um "pequeno manual de hidrometria" mas transmitir nossa experiência assinalando e explicando os principais pontos delicados que se encontram no campo e no processamento dos dados.

As principais etapas do estudo de uma bacia hidrográfica representativa (seleção, instalação, monitoramento, processamento dos dados, interpretação e síntese) seguem regras e normas que foram descritas por CAMPELLO *et al* (1983). Resumimos as suas principais etapas, aproveitando a retrospectiva que permite perceber melhor os principais aspectos positivos, pontos fortes desse programa, mas também, infelizmente, seus problemas e o que teria sido preciso fazer para remediá-los.

■ Escolha da bacia

A escolha da bacia é feita em função da planificação apresentada anteriormente.

A definição da localização exata da bacia no interior da zona ou região escolhida é efetuada segundo dois tipos de critérios:

- Critérios hidrológicos e fisiográficos:

Esses critérios asseguram que a bacia escolhida tenha uma boa representatividade para o tipo de bacia que se quer estudar. É preciso, sobretudo, evitar as bacias heterogêneas abrangendo duas zonas cujos funcionamentos hidrológicos possam ser diferentes, o que complicará a análise e a interpretação das observações. Isso conduzirá sempre à **escolha de bacias bem pequenas** e ao estudo de sub-bacias ou parcelas que esclarecerão os principais tipos de funcionamento. Assim a superfície total da última BHR que foi instalada em ANGELIM, é de aproximadamente 10 km^2, enquanto a BHR do RIACHO DO NAVIO, instalada em 1970, controlava uma superfície de cerca de 500 km^2.

- Critérios que facilitarão a logística do monitoramento da bacia:

. É fundamental uma **boa acessibilidade** à bacia em qualquer posto de medição e em qualquer período do ano. A existência de uma estrada sempre trafegável, próxima ou atravessando a bacia, é essencial: ela facilitará a prospecção inicial e será a garantia de acesso permanente dos hidrólogos com seus equipamentos aos postos limnigráficos e fluviométricos, em particular, no período de cheia.

. A escolha pode, ainda, ser efetuada em função das condições impostas pelos órgãos financiadores: será, por exemplo, necessário implantar a bacia neste ou naquele Estado, nesta ou naquela zona ou nas proximidades de tal estação experimental agronômica.

. Enfim, o sucesso final do empreendimento dependerá sempre das **facilidades logísticas locais**: possibilidade de alojamento, compra de alimentos, estocar o material, existência de proprietários ou fazendeiros que autorizem a passagem por suas terras e permitam a instalação de postos hidrométricos e de pluviômetros.



Pluviômetro Ville de Paris

AS MEDIÇÕES

Prancha 2

O QUE SE DEVE FAZER E O QUE NÃO SE DEVE FAZER



O QUE SE DEVE EVITAR:

① *Estação não estabilizada*

② *Passarela de difícil acesso durante as cheias e que não controla todo o escoamento*

③ *A erosão*





UMA BOA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA





■ Instalação da rede de medição

A acessibilidade e a proximidade das habitações dos observadores são duas condições determinantes na escolha dos locais dos diferentes instrumentos.

a) Rede pluviométrica, pluviográfica e meteorológica:

As **densidades** mínimas recomendadas para a rede **pluviométrica** são as seguintes:

- 1 pluviômetro para 2 km^2 para bacias cuja superfície é da ordem de 10 km^2.
- 1 pluviômetro para 4 ou 5 km^2, para bacias cuja superfície é da ordem de 100 km^2.

A densidade recomendada para a rede **pluviográfica** é cinco a dez vezes menor que a da rede pluviométrica.

Instalar a estação meteorológica na parte central da bacia, perto da casa que serve de alojamento para os hidrólogos.

É preciso localizar com precisão todos esses aparelhos sobre os mapas e sobre as fotografias aéreas e assegurar-se de que sua repartição geográfica cobre, da maneira mais homogênea possível, as diferentes partes da bacia.

No momento da instalação do aparelho, é preciso preencher um formulário de instalação. Esse formulário, muito completo, indica as vias de acesso aos aparelhos, fornece informações sobre o observador e o tipo de aparelho instalado. Apenas uma coisa a lamentar: esses formulários adotados no início dos anos sessenta, por ocasião do enorme esforço de expansão da rede geral de medição do Nordeste, não impuseram, de maneira sistemática, a inclusão de fotografias do aparelho e de seu lugar de instalação.

b) Rede de medição hidrométrica

Os postos da rede hidrométrica devem ser, como quaisquer outros, localizados com precisão nos mapas e fotos, ser objeto de preenchimento de um formulário de instalação, ser acessíveis e próximos da casa de seus observadores. Uma atenção especial deve ser dada ao traçado dos limites topográficos da bacia, como também, aos planos e fotos de todas as instalações realizadas.

A escolha do lugar exato de um posto limnigráfico é muito importante e condicionará a qualidade das medições dos escoamentos. Deverá responder aos seguintes critérios hidráulicos:

b.1 Estabilidade do leito:

É a qualidade mais importante para o prosseguimento das operações, visto que ela evitará a recalibragem da estação depois de cada cheia o que seria praticamente impossssível de realizar.

Talvez seja esta a condição mais difícil de ser atendida nessas regiões de rios intermitentes com leitos arenosos e sempre submetida a uma erosão ativa. Quando não se pode instalar o posto a montante de uma **seção de controle hidráulico indiscutível** (barra rochosa, cascata, bútio ou passagem sob uma estrada), será preciso construir uma seção de controle artificial. Recomenda-se, para isso, a construção de uma **seção de controle ou soleira em cimento com alguns metros de largura**, excedendo em uma altura H com relação ao perfil natural do leito. A escolha dessa altura H é delicada: se H é muito pequena, corre-se o risco de **assoreamento** do conjunto do dispositivo que suprimirá a estabilidade visada; se H é muito grande, criar-se-á uma sorte de pequena barragem com aumento da velocidade do escoamento, podendo provocar, em águas altas, diferenças de nível entre a seção de medição das velocidades (molinete) e das alturas de água (limnígrafo). Além disso, grandes valores de H podem provocar, problemas de escavamento a jusante da soleira e imporão, portanto, uma construção mais robusta e custosa. Em geral, escolhe-se um valor de H entre 20 e 50 cm.

O perfil transversal dessa soleira pode ser horizontal ou em forma de V muito aberto.

Para as pequenas bacias, aconselha-se a instalação de um vertedouro triangular ou de um medidor do tipo PARSHALL.

O assoreamento desses aparelhos, seções de medição e dos canos e canais de acesso aos limnígrafos, deve ser controlado, pois, quase sempre é um problema.

b.2 Qualidade hidráulica do escoamento:

A qualidade das medições de descarga dependerá do comportamento hidráulico do rio na seção de medição.

As velocidades devem ser repartidas da maneira mais uniforme possível e chegar perpendicularmente em toda a seção de medição.
É preciso escolher um trecho retilíneo ou construir dispositivos (muros, etc.) de canalização do fluxo da água. Atenção, porque estes dispositivos poderão, algumas vezes, provocar turbulências, remansos e contra-correntes, o que é preciso impedir de qualquer maneira.

Deve-se evitar, igualmente, se possível, que as velocidades ultrapassem 2 m/s no momento de fortes cheias. A estimativa dessas velocidades máximas devem ser feitas com a ajuda de uma fórmula de hidráulica, como a de CHEZY, que utiliza para seu cálculo **a declividade da linha de água** e da profundidade ou do **raio hidráulico** do rio. Esses dados são obtidos por meio de medições topográficas. É necessário, por outro lado, não deixar que a velocidade da água seja

inferior a 10 cm/s, por causa dos problemas de sensibilidade e de velocidade de partida do molinete.

O tipo de medição de descargas (a vau, a partir de uma passarela, de um teleférico, de uma embarcação, ou química) será escolhido em função da profundidade, da largura e da velocidade previstas. É preciso privilegiar, na medida do possível, as medições com molinete realizadas a vau ou a partir de uma passarela.

b.3 Transbordamentos:

É preciso escolher uma seção na qual os transbordamentos das cheias mais fortes sejam nulos ou os mais fracos possíveis.

Construir, se necessário, **diques de contenção dos transbordamentos.** Esses diques deverão ser edificados de maneira que a probabilidade de serem destruídos por uma cheia, seja fraca. Se são de terra e não podem resistir a um transbordamento, é bom, então, que sejam bastante altos ou prever um trecho de dique que possa ser destruído e reconstruído em caso de cheia muito forte.

Os diques podem provocar perturbações hidráulicas indesejáveis (remanso, etc.), é sempre preciso efetuar um levantamento topográfico antes de sua construção.

Muitas vezes é difícil encontrar um local sem transbordamentos no qual, ao mesmo tempo, as velocidades não ultrapassem 2 m/s.

b.4 Outras recomendações:

Outras precauções que facilitarão o funcionamento da estação limnigráfica:

- Proteção do limnígrafo que deverá estar colocado bem acima do nível das águas mais altas, que não deverá ficar em uma zona de fortes velocidades e deverá estar protegido contra os objetos flutuantes trazidos pelas cheias (troncos de árvores, etc.).

- Fazer marcas bem visíveis sobre as passarelas e os cabos, a distâncias regulares, para facilitar a localização das verticais no momento das medições de descarga; prever dispositivos fixos ou semi-fixos de iluminação para as medições de descarga à noite; instalar réguas limnimétricas de fácil leitura a partir da passarela de medição. É indispensável, sempre, que a distância entre as seções de medição de velocidades (passarela) e dos níveis (réguas e limnígrafos) seja a menor possível. Prever uma porta de inspeção de fácil acesso ao interior do tubo do limnígrafo e desenhar o canal de comunicação com o rio de tal maneira que se possa facilmente limpá-lo e ter certeza de seu bom funcionamento.

- Prever um abrigo ou uma pequena casa onde se possa ficar a fim de que se torne mais suportável as longas esperas das cheias. É preciso prever corrimãos nas passarelas como, também, pensar na segurança dos hidrometristas no caso de um dos açudes, situados a montante, vir a romper e provocar uma cheia muito brutal.

É geralmente difícil conseguir a concialiação de todos esses critérios. A escolha final do lugar será finalmente um compromisso que necessitará de habilidade e experiência.

Deve-se elaborar um relatório para apresentar as principais características do dispositivo instalado. Este relatório segue um plano ou roteiro predeterminado: geralmente, ele faz parte do primeiro relatório de campanha. Os relatórios de instalação e da primeira campanha da BHR de AÇU, elaborados por ZELAQUETT (1980) representam um bom exemplo disso.

2.3.3 Operação das bacias hidrográficas em fase de rotina

A operação de uma BHR deve proporcionar a colheita do máximo de informações sobre seu funcionamento hidrológico em termos de qualidade e de quantidade. Para isso, três condições são necessárias:

- A instalação correta dos instrumentos descritos acima.
- A atuação de técnicos competentes para as medições de campo, o processamento e a análise dos dados.
- Meios de funcionamento e flexibilidade suficientes para assegurar todas essas tarefas e, em particular, as medições de campo e a elaboração dos relatórios.

▪ Normas do programa SUDENE

A operação em fase de rotina das BHR instaladas pela SUDENE foi efetuada nas condições seguintes:

a) **Meios em pessoal:**

Foram suficientes até 1985: um engenheiro supervisionando os trabalhos de cada BHR, onde os trabalhos eram desempenhados por uma equipe de 2 a 3 técnicos em recursos hídricos bem formados e competentes.

b) **Trabalhos de campo:**

As normas previam a presença permanente de um ou dois técnicos em cada bacia durante a estação das chuvas que dura, na maioria das vezes, cinco meses, e a realização de uma visita de inspeção cada mês durante o resto do ano, tudo isso supervisionado pelo engenheiro responsável. Alugava-se ou edificava-se uma casa para facilitar os trabalhos de campo. Os observadores eram escolhidos entre os habitantes, instalando-se os aparelhos nas

proximidades de suas residências (a solução de um observador trabalhando em tempo integral para supervisionar, diariamente, um número elevado de aparelhos, foi raramente adotada).

Além da fase de instalação já citada, os principais trabalhos de campo são os seguintes:

- Controle, formação dos observadores, manutenção dos registradores, coleta dos boletins de observações dos registros e realização de uma crítica e consistência preliminar dos dados recolhidos.
- Realização das medições de descarga necessárias à calibragem das estações.
- Trabalhos específicos não repetitivos: levantamento topográficos de açudes, de bacias, realização de testes de infiltração, etc.

Cada vez que é possível, aplicam-se as normas[9] já estabelecidas pela SUDENE para o monitoramento de sua rede geral de medições hidropluviométricas.

c) **Processamento dos dados; elaboração dos relatórios de campanha:**

Os dados foram processados da seguinte maneira:

- **Informação pluviométrica**: digitação, processamento e estocagem pelo sistema informático BAC do banco de dados da SUDENE. Para uma determinada bacia, este sistema BAC foi concebido[10] para processar de uma só vez todos os dados pluviométricos de cada ano.

- **Informação pluviográfica**: processamento direto pelo sistema de pluviografia PLG do Banco de Dados da SUDENE. A comparação entre as informações pluviométrica e pluviográfica é efetuada no momento da digitação do pluviograma.

- **Cálculo de medições de descarga e processamento dos limnigramas**: esses tratamentos são inteiramente manuais, utilizando tabelas e a planimetragem de curvas sobre papel milimetrado. Os sistemas informáticos implantados nos anos de 1970, para os postos da rede geral, são considerados muito complexos e pouco adaptados aos rios intermitentes, sujeitos a numerosas mudanças de calibragens que requerem numerosos retoques interativos[11].

[9] Estas normas, por serem muito completas, devem algumas vezes ser adaptadas, como por exemplo, as normas de cálculo das descargas que damos a seguir:
- separação sobre o limnigrama de períodos apresentando uma variação limnimétrica máxima de H = 10 cm;
- cálculo para cada um desses períodos da cota média;
- a descarga média do período é aquela que corresponde a essa cota média.
Essa norma que, na verdade, pressupõe o limnigrama e a curva de calibragem como sendo lineares sobre o intervalo H, está, evidentemente, adaptada aos grandes rios. Deve ser modificada para as pequenas bacias. É suficiente tomar H = 1 cm, para o início das curvas de calibragem e H = 3 ou 5 cm para as águas altas.

[10] O grande sistema PLV do Banco de Dados, armazena sequencialmente todos os anos de um mesmo pluviômetro antres de passar ao seguinte. Está pouco adaptado ao processamento simultâneo do mesmo ano de vários pluviômetros.

[11] Em 1980, a utilização do sistema HID do Banco de Dados da SUDENE necessitava: da perfuração de cartões, da leitura e da atualização de várias fitas magnéticas de 2.400 pés e, ao menos, 24 horas de espera. Os gráficos necessários ao controle só poderiam ser emitidos por um outro computador. "Softwares" de processamento atuais, como HYDROM editados pelo ORSTOM, mais adaptados às pequenas bacias só começaram a ser utilizados depois de 1989.

Depois de cada campanha era prevista a publicação de um **relatório de campanha** que apresentava os resultados de acordo com um roteiro padronizado. Além da apresentação dos resultados, esse relatório de campanha é a garantia do bom andamento das medições. Permite verificar se os dados foram bem recolhidos e recorientar, se necessário, as medições de campo da campanha ulterior. Enfim, servirá de base para a preparação da síntese final.

2.3.4 Funcionamento do dispositivo e resultados obtidos

O volume de dados recolhidos no conjunto do dispositivo foi considerável e permitiu melhorar sensivelmente os conhecimentos. Em 1990, 4.084 anos de observações com instrumentos de todos os tipos tinham sido processados (GUSMÃO *et al* , 1980; PUNGS e CADIER, 1985) e 27 relatórios hidrológicos publicados, totalizando perto de 3.000 páginas.

A reunião desses dados foi, algumas vezes, difícil. Para que se possa evitar, no futuro, a repetição de certos erros ocorridos, assinalamos, a seguir, os principais problemas encontrados.

A causa principal e a circunstância sempre agravante de todos os outros problemas técnicos indicados é, sem dúvida, o **número insuficiente de viagens realizadas ao campo pelos técnicos**[12] . Além da desorganização de certas campanhas de medições, essa carência impediu assegurar o funcionamento normal e contínuo dos registradores e garantir o controle dos observadores.

[12] O ritmo das viagens de inspeção já era fraco demais antes de 1985 e, tornou-se, depois desta data, totalmente insuficiente, excetuando-se, no entanto, o ano de 1989.

Os instrumentos de medição:

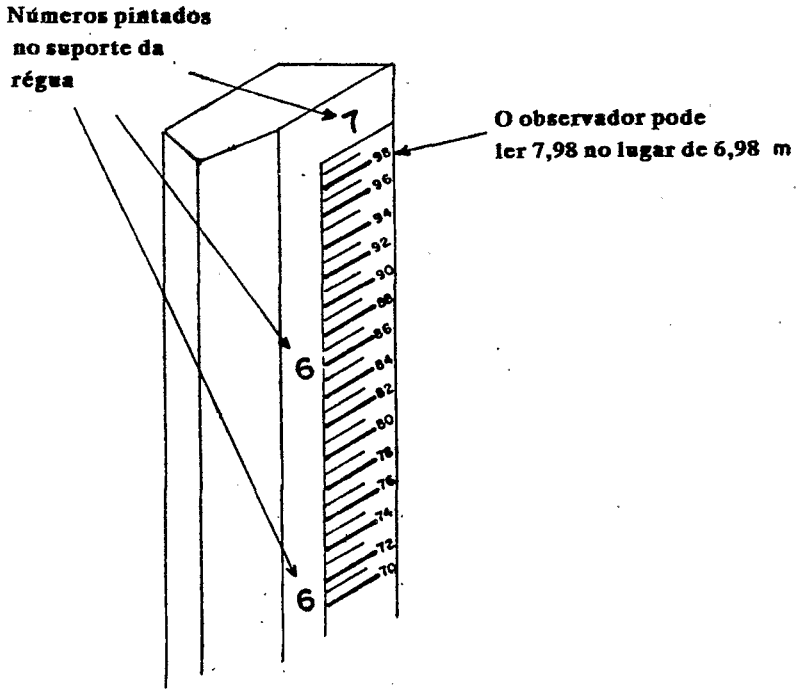
Os problemas mais freqüentes causados pelos aparelhos e instrumentos foram os seguintes:

- **Pluviômetros**: os pluviômetros da marca IH são do tipo "Ville de Paris". São relativamente sofisticados, caros, provocam problemas de entupimento e necessitam uma manutenção freqüente: sua forma complicada é composta de uma área de captação, seguida de um tubo cilíndrico e de um cone, portanto, com várias solduras que racham freqüentemente. Uma torneira situada na parte inferior do aparelho permite esvaziá-lo. Uma pequena borracha de vedação assegura o seu fechamento. Essa borracha pode ficar ressecada ou deformar-se, devendo, portanto, ser substituída regularmente, para evitar perda da água que deverá ser medida.

- **Pluviógrafos**: praticamente, todos os pluviógrafos são equipados com sifão, sempre da marca IH. Resistentes, eles têm um bom funcionamento. Algumas vezes os sifões podem entupir. Pode acontecer também que, por medida de economia, se reutilize várias vezes o mesmo diagrama, obtendo-se, assim pluviogramas cheios de ambigüidades e indecifráveis.

- **Estações meteorológicas**: não se levando em conta os pequenos animais, as rãs e os pássaros que vêm recrear e beber água nos tanques eveaporimétricos, alguns termômetros quebrados e abelhas que vêm aninhar-se nos abrigos meteorológicos, essas estações, em geral, fornecem bens resultados.

- **Réguas limnimétricas**: os números correspondentes aos metros não estão colocados sobre a própria régua. É preciso pintá-los sobre a estaca de suporte das réguas. Isso ocasionou, várias vezes, erros de leitura de um ou de vários metros inteiros. Esses erros podem ter sérias consequências quando não são detectados em tempo.



Elemento da régua de 6 a 7 m.

Fig. 2.4: Erro de leitura limnimétrica freqüente.

- **Limnigráfos:** fabricados pelo IH, eles registram em um rolo de papel. Os movimentos do flutuador são transmitidos por uma rampa helicoidal com reversão. São resistentes e seguros. Quase sempre a falta de papel conduz a uma reutilização depois da rebobinagem. O aumento da umidade agindo sobre os papeis já amarrotados (e nem sempre impressos pelos fabricantes) conduz quase sempre a embuchamentos ou a paradas intempestivas no momento das primeiras cheias. Um outro problema muitas vezes encontrado resulta da impossibilidade de conhecer a altura exata do deslocamento do flutuador, uma vez que ele repousa em fundo arenoso, podendo fazer variar o registro do momento inicial de cada cheia. Os canos ou tubos de comunicação instalados entre o limnígrafo e os rios foram muitas vezes entupidos nas primeiras cheias. Por esse motivo foram, geralmente, suprimidos.

- **Instrumentos de medição:** Fabricados pela firma alemã OTT, os molinetes e os contadores são resistentes, mas muito antigos. Os contadores, normalmente, apresentam problemas.

Os observadores, o monitoramento da rede e o processamento dos dados:

O pagamento e o controle dos observadores foram efetuados de maneira muito irregular desde 1985. As dificuldades de acesso fazem com que determinados postos só sejam inspecionadas uma vez por ano.
Uma consistência rudimentar dos dados pluviométricos deveria ser realizada sobre a bacia.

Até 1984, os dados recolhidos nas bacias foram, em princípio, processados dentro de um prazo máximo de, seis meses o que permitia reorientar, se necessário, as medições da campanha seguinte. Nessa época, um prazo de um a dois anos, era em geral, necessário para elaborar o relatório de campanha, como mostra o quadro 2.3 a seguir.

Esse quadro mostra bem a interrupção brutal, em 1985, do processo de publicação de relatórios, provocada pelo desmantelamento das equipes e pela parada quase total do processamento dos dados.

A baixa qualidade dos dados desse período é um pouco compensada pelo início do funcionamento das bacias experimentais que forneceram dados de qualidade bem melhor.

Tabela 2.3 : Datas de publicação dos diferentes relatórios

Bacia	Relatório	Ano da publicação	Bacia	Relatório	Ano de publicação
TAUÁ:	Instalação 1977	1977	IBIPEBA	Campanha 1977	1978
	Campanha 1978-79	1980		Campanha 1978	1980
	Campanha 1980	1981		Campanha 1979	1982
	Campanha 1982	1984		Campanha 1980	1982
	Relatório final 1977-89	**1990**		Campanha 1981	1984
				Relatório final 1977-82	**1989**
SUMÉ:	Campanhas 1973-80	1983	AÇU	Campanhas 1978 a 80	1981
	Bac.Experimental 1982	1983		Campanhas 1981 a 89	(a fazer)
	ATP 1986-88	1988		Relatório final	(a fazer)
	Campanhas 1981-90	(a fazer)			
	Relatório final	(a fazer)			
RIACHO DO NAVIO:	Campanhas 1971-76	1977	ESCADA	Campanha 1975	1976
	Relatório final	**1979**		Campanha 1976	1977
	(1971-77)			Campanha 1977	1979
				Relatório final	**(a fazer)**
JUATAMA	**Relatório final** 1964-63 e 1976-77	**1990**	ANGELIM	Campanha 1991	(a fazer)

TERCEIRA PARTE

DESCRIÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS IMPLANTADAS NO NORDESTE BRASILEIRO

TERCEIRA PARTE

3. DESCRIÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS IMPLANTADAS NO NORDESTE BRASILEIRO

Reunimos neste capítulo, os elementos essenciais necessários à compreensão dos estudos empreendidos para cada conjunto de bacias, dos seus objetivos e dos seus resultados

Adotamos, para cada bacia, o esquema de apresentação seguinte:

- Histórico dos estudos, inventários dos dados e das publicações.
- Descrição da bacia, de sua região, insistindo sobre os solos e a vegetação.
- Equipamentos e informação recolhida
- Interpretação. Novos conhecimentos hidrológicos adquiridos na bacia

O mapa da figura 1.14, no primeiro capítulo,permite situar todas essas bacias.

TAUÁ, SUMÉ e RIACHO DO NAVIO, sob o ponto de vista hidrológico, são as três bacias mais importantes, aparentemente, muito semelhantes entre si, por estarem situadas sobre embasamento cristalino sem aquífero importante, com pluviometria média aproximada em torno de 550 mm. Veremos, no entanto, que cada uma dessas bacias fornece informações bem diferentes.

JUATAMA está situada sobre embasamento cristalino, numa zona acidentada, com inselbergs, cuja precipitação anual média ultrapassa 800 mm. Ela possui apenas uma estação hidrométrica. O tamanho dessa bacia é relativamente pequeno.

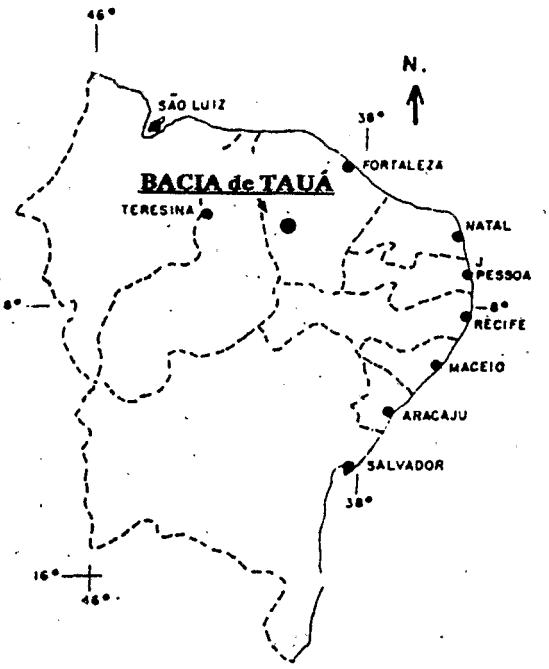
IBIPEBA, traz informações sobre as bacias sedimentares de regiões situadas nitidamente mais ao sul, recobertas de tabuleiros calcários, às vezes kársticos com presença de quartzito.

Reagrupamos, em anexo, algumas informações relativas ao conjunto de pequenas bacias que tinham sido estudadas, nos anos sessenta, pelo programa do Vale do Jaguaribe (ou GEVJ), com os dados obtidos em três açudes monitorados pelo recente programa "Açude".

O número de bacias e sub-bacias, cuja qualidade dos dados foi, finalmente, julgada suficiente para ajustar modelos de simulação *chuva* x *deflúvio*, se eleva para 42. Essas bacias constituem, atualmente, a principal fonte de informação sobre os regimes hidrológicos dessa região

3.1 BACIA REPRESENTATIVA DE TAUÁ

O número e a diversidade de sub-bacias estudadas, aliados à extensão e à homogeneidade dos períodos de medição, tornam absolutamente fundamental a contribuição da bacia de TAUÁ Para os conhecimentos hidrológicos atuais do Nordeste.



3.1.1 Histórico

O monitoramento hidrológico da Bacia Hidrográfica Representativa de TAUÁ foi iniciado no fim do ano de 1977, em uma das zonas menos dotada do Nordeste, o Sertão dos INHAMHUNS, situada a mais de 1.000 km de Recife, no Sudoeste do Estado do Ceará, a 300 km ao Sul de FORTALEZA. Nessa bacia, são fracas as precipitações, da ordem de 550 mm e, elevada, sua irregularidade interanual, possuindo coeficiente de variação de 0,35 a 0,45. O sub-solo cristalino e a fraca importância das zonas aluviais impedem que se pense, seriamente, em utilizar suas águas subterrâneas.

O projeto inicial, ambicioso e multidisciplinar, aliava vários organismos, tais como a SUDENE, a Universidade Federal do Ceará (UFCE) e o ORSTOM. Ele visava o estudo integrado do ecossistema dessa região e comportava um acervo botânico importante. Na realidade, apenas o dispositivo de medição hidrológica foi instalado pela SUDENE, com a assistência do ORSTOM. Esse importante dispositivo de campo, , totaliza mais de 80 aparelhos de medição. Ele permite o controle de 23 bacias e parcelas diferentes, cuja maior parte ainda era observada em 1990. A superfície média coberta por cada pluviômetro é de 3,5 km2.

Essas instalações foram realizadas em três fases sucessivas:

- **Fim de 1977**: instalaçâo da rede pluviométrica, pluviográfica e de duas estações hidrométricas controlando o conjunto da bacia (194 km^2) e a sub-bacia de MUNDO NOVO (19 km^2).

- **Fim de 1980**: instalação da estação hidrométrica de CALDEIRÃO (0,77 km^2) e início do acompanhamento hidrométrico intensivo e sistemático de 11 açudes.

- **Fim de 1985**. No âmbito de um projeto financiado pelo CNPq, instalação pela UFCE e pela SUDENE de um conjunto de 4 micro-bacias da ordem de 1 ha e de 5 parcelas de 100 m^2. Estas estâo situadas no interior da bacia de CALDEIRÃO, citada anteriormente, e **procuram** representar os principais tipos de associaçâo solo-vegetação.

Essa bacia foi objeto de 4 relatórios de campanha (NOUVELOT e PEREIRA, 1977; GALINDO, 1980; LINS, 1981; LINS, 1984), de um relatório de síntese final (CAVALCANTE *et al*, 1990) donde retiramos a maior parte das informações que apresentamos e de um trabalho no simpósio hidrológico de FOZ DO IGUAÇU (FERREIRA *et al*, 1989).

3.1.2 Descrição da bacia

Esta bacia foi implantada dentro da planificação efetuada por NOUVELOT (1974) e tinha como finalidade representar "a zona homogênea" **H2, P1, R2.3, A1.2** cujas características seriam:

H_2: total das precipitações anuais compreendidas entre 400 e 600 mm.
P_1: sub-solo impermeável.
$R_{2.3}$: relevo fraco e bastante fraco.
$A_{1.2}$: altitude inferior a 800 m.

Clima e pluviometria

Situada em uma das zonas mais secas e mais irregulares do Ceará, esta bacia só recebe um total pluviométrico médio anual da ordem de 550 mm, os coeficientes de variação anuais atingem 40 a 45%. Nessa região o total mediano é de 500 mm, decenal seco de 290 e decenal úmido de 900 mm.

As precipitações, de origem convectiva, são provocadas por uma incursão em direção ao Sul da zona de convergência intertropical (ZCIT) entre fevereiro e maio, o mês de março sendo, em geral, o mais abundante.

Os totais pluviométricos em 24 h, na microrregião climática de TAUÁ, são mais ou menos 10 a 15% inferiores aos do conjunto da zona climática do SERTÃO. O total em 24 h para um período de retorno anual está estimado em 54 mm; o da freqüência decenal em 90 mm. Isto é um sinal suplementar da complexidade e da variabilidade dos sistemas climáticos que geram as precipitações.

As variações de temperatura são fracas. A média anual se situa em torno de 25 °C, com uma máxima média mensal entre novembro e janeiro (27° C), e, uma mínima em agosto (24° C).

A umidade do ar atinge seu valor máximo no fim do período das chuvas, em abril-maio, e sua mínima em setembro-novembro.

Os ventos são geralmente fracos; sua máxima se observa na estação seca.

A duração da insolação diária média varia entre 6h30'em junho-julho e 9h30'em setembro.

A evaporação medida em tanque classe A é elevada. Ela atinge sua máxima em outubro (10 a 11 mm por dia), mas torna-se inferior a 7 mm por dia entre abril e junho. Os totais anuais evaporados são da ordem de 3.000 mm.

Geologia, solo e vegetação

Essa bacia está situada sobre embasamento cristalino pré-cambriano constituído, sobretudo, de migmatitos (SUDENE 1968) estreitamente embricados com gnaisses, anfibólitos, xistos e pegmatitos. Essa geologia desordenada, complicada no detalhe, induz alternâncias pedológicas muito rápidas, que são agravadas pelas variações das inclinações das camadas geológicas.

Constatamos na figura 3.1.1, adaptada de LEPRUN *et al* (1983) que **os solos Brunos Não Cálcicos** (Vérticos, ou não, e de espessura variável) são os mais frequentes, cobrindo mais ou menos, 50 a 60% da superfície total. Nas partes planas ou de relevo fraco, encontram-se, sobretudo, **Vertissolos** (mais ou menos, 10 a 20% da superfície total). Esses dois tipos de solos desenvolvem-se, sobretudo, sobre os migmatitos básicos e os anfibólitos. Os **Planossolos** e os **Solonetz** encontram-se, quase sempre, sobre os migmatitos, pegmatitos, xistos e sobre os gnaisses. Esses solos cobrem 10 a 20% da bacia e são mais freqüentes na parte Norte, (sub-bacia de MUNDO NOVO).
Os solos **Litólicos** e os Afloramentos rochosos aparecem, em pequena proporção, por toda parte e cobrem, mais ou menos, 10% da zona estudada.

Essa região não é muito povoada; as culturas são raras, limitando-se sempre a alguns baixios. Pratica-se uma pecuária extensiva nas propriedades maiores, submetidas às eventualidades das secas.

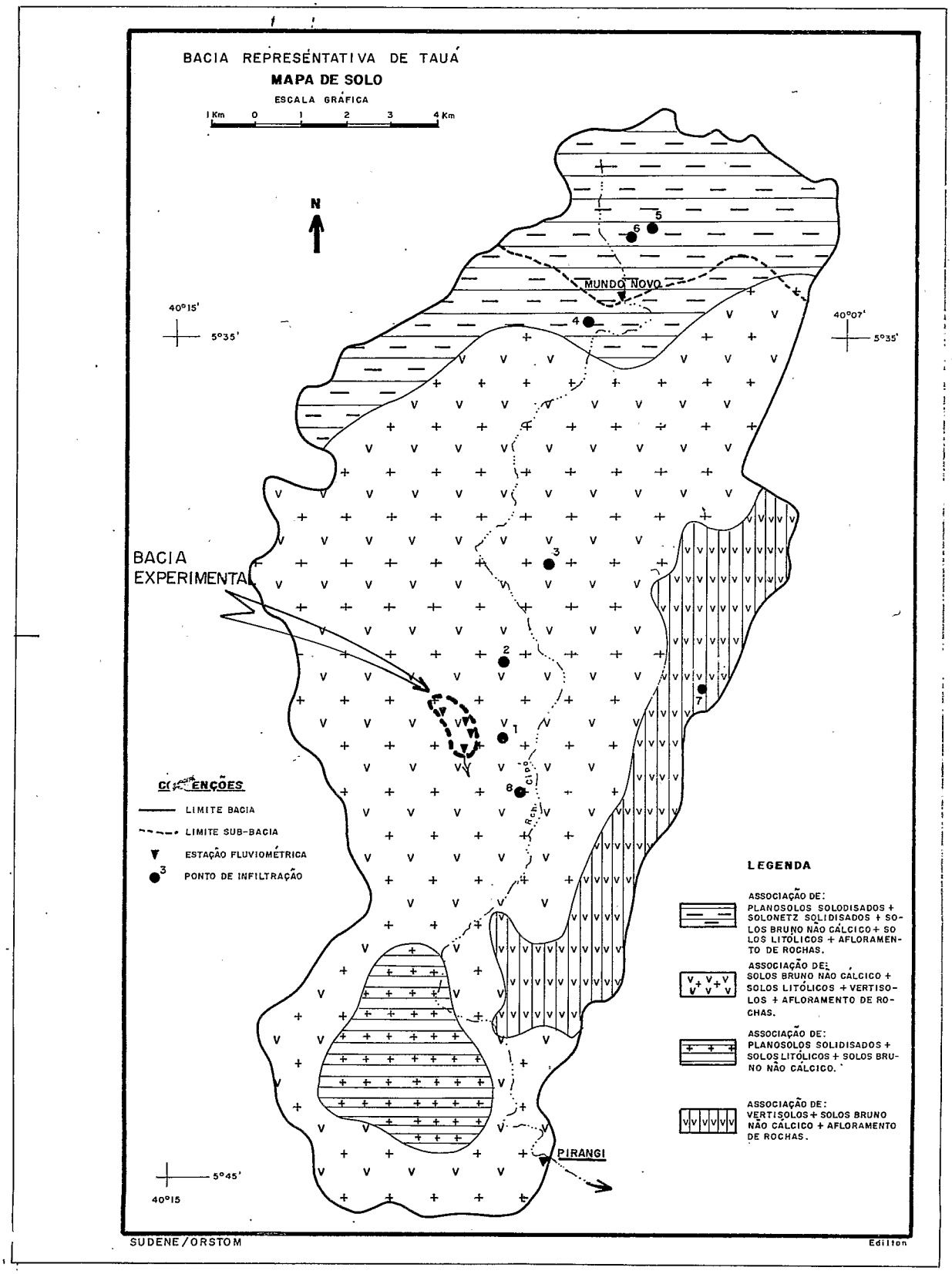
A vegetação é quase sempre constituída de caatinga densa e bem conservada. No entanto, a história das estruturas fundiárias faz com que se encontre algumas fazendas e, portanto, pequenas bacias cujas coberturas vegetais originais foram destruídas para permitir o crescimento das gramíneas. Tentamos, é claro, aproveitar-nos dessa diversidade para salientar e quantificar as variações hidrológicas que ela induz.

A tabela 3.1.1 indica as velocidades da infiltração da água após seis horas, medida pelo método de MUNTZ. Cada valor corresponde à média de três testes realizados nos locais que foram plotados na figura 3.1.1 (Fonte: Leprun *et al*, 1983).

TABELA 3.1.1 Resultados dos testes de infiltração da bacia de TAUÁ.
Método de Muntz

Teste	Tipo de solo	Valor médio após 6 horas (mm/h)
TA 01	Litólico - Plano - Caatinga natural	79
TA 02	Bruno não Cálcico vermelho (tendência a Solonetz)	37
TA 03	Bruno não Cálcico com tendência a Vertissolo	15
TA 04	Bruno não Cálcico com tendência a Solonetz	29
TA 05	Planossolo	79
TA 06	Planossolo degradado	41
TA 07	Vertissolo	24
TA 08	Bruno não Cálcico típico	34

Figura 3.1.1 : Mapa dos solos da bacia representativa de TAUÁ



BACIA DE TAUÁ
DIVERSIDADE DOS SOLOS E DAS COBERTURAS VEGETAIS

Prancha 3



Parcela de solo nu. Reparar as variações da superfície do solo



Parcela protegida do gado



Outra parcela situada a alguns metros



Vegetação degradada sobre vertissolo



Vertissolos característicos



Solo litólico nu. Reparar a barragem destruída

Relevo, morfologia e açudes

O relevo global das bacias é fraco, $R_{2/3}$ na classificação do ORSTOM (RODIER et AUVRAY, 1965). Os desníveis específicos são da ordem de 20 a 30 m; sabe-se que eles refletem, aproximadamente, os desníveis dos interflúvios. Um exame mais atento da morfologia mostra, no entanto, que a maior parte dessa bacia é composta de zonas de declividade superior a 5 %, o que é inesperado para relevo geral tão fraco. Para compensar de alguma maneira as "fortes" declividades, encontram-se zonas planas seja no alto das colinas (onde se desenvolvem Vertissolos) seja nos baixios e perto dos leitos dos rios mais importantes. Enfim, as declividades dos rios principais são fracas, o que contrubui, certamente, para o prolongamento do tempo de base das cheias.

A tabela 3.1.2 apresenta algumas características fisiográficas de seis bacias dentre as que foram estudadas.

TABELA 3.1.2: Divisão por sub-bacia das principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação da bacia de TAUÁ

Formação Geológica	Pegmatitos e Migmatitos		Migmatitos básicos anfibólitos		Xistos e Gnaisse		
Solos gerados	Afloramento e solo litólico	Solonetz	Bruno não cálcico	Vertis-solo	Litó-lico pouco espesso ou planossolo degradado	Litó-lico	Planos-sólico
Permeabilidade (mm/h)	0: Afl. 80: Lito.	8	15 a 30	Depende da saturação[1]	(41)	80	50 a 80
Capacidade de retenção d'água	nula a fraca	fraca	média	média a elevada	média	média	muito elevada
	Porcentagem por sub-bacia						
MUNDO NOVO	10%	20%	20%	-	-	-	50%
AÇ. MOQUEM e JOÃO FRAGOSO[3]		10%	5%	70%	15%	-	--
AÇUDINHO[4]	Não determinada, mas possui vegetação natural bem conservada.						
CALDEIRÃO	10%	10%	70%	10%	-	-	-
AÇ. LUZIMAR[2] e CHICO[4]	-	-	80%	20%	-	-	-
Aç. JUAZEIRO e NASCIMENTINHO	Não determinada, mas possui vegetação natural bem conservada.						

(1) Quando seus solos estão saturados, eles são impermeáveis;
(2) Vegetação natural muito degradada e solos compactados;
(3) Vegetação natural um pouco degradada;
(4) Vegetação natural bem conservada.

Fonte: LEPRUN et al (1983).

Os açudes são relativamente numerosos, uma trintena para uma superfície total de 194 km^2. Tentaremos, também, mostrar sua influência sobre os regimes hidrológicos.

A tabela 3.1.3 resume as principais características morfométricas das três bacias de TAUÁ equipadas de limnígrafos

Tabela 3.1.3: Características morfométricas das bacias de TAUÁ

Características Morfométricas	BACIA Pirangi	Mundo Novo	Caldeirão
Tamanho e forma:			
.Superfície (km^2)	194*	19*	0,77
.Perímetro (km)	70	20	3,75
.Rétângulo equivalente :			
Comprimento (km)	28,10	7,45**	1,29
Largura (km)	6,91	2,55**	0,61
.Índice de compacidade C	1,4	1,3**	1,2
Declividade e relevo:			
.Classe de relevo	R 2/3	R 2/3	R 2/3
.Altitude média (m)	490	520	510
.Diferença das cotas correspondendo a 5% e 95 % da superfície (m)	60	27	19
.Índice global de declividade (m/km)	2,1	3,6	15
.Desnivelamento específico (m)	29,7	15,8	13,1
Rede de drenagem :			
.Densidade de drenagem (km/km^2)	2,13	1,07	4,23
.Número de talvegues	721	22	19
.Comprimento total (km)	413	20,4	3,25
.Rio mais longo (km)	31	5,8	1,6
.Comprimento em linha reta (km)	23	5	1,25

* Superfície total (sem deduzir as superfícies controladas pelos açudes existentes.)
** A bacia de MUNDO NOVO tem uma forma muito compacta, mais larga que comprida. É necessário adaptar um valor de C próximo de 1 para essa bacia.

3.1.3 Dispositivo de monitoramento instalado

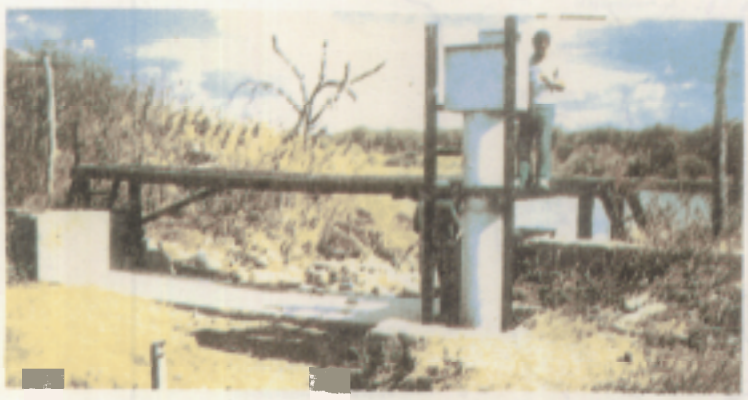
A figura 3.1.2 permite situar as principais bacias e sub-bacias estudadas

As bacias delimitadas com linhas pontilhadas forneceram dados de qualidade suficientemente boa, para permitir a modelização e a interpretação hidropluviométrica. Essas bacias são geralmente de pequeno tamanho, tendo uma superfície de algumas dezenas a algumas centenas de hectares. Foram escolhidas em função das características de seu solo e de sua vegetação.

O esquema da figura 3.1.3 mostra a rede mais densa instalada na bacia de CALDEIRÃO (0,77 km^2): 4 "microbacias" de mais ou menos 1 ha de superfície e 5 parcelas de erosão de 100 m^2, permitem conhecer melhor o comportamento de dois grandes tipos de solo dessa região: os Vertissolos e os solos Brunos Não Cálcicos (variante não Vértico e, também, Vértico).

Este dispositivo de medição é composto de fossas de sedimentos com divisor para as parcelas, e de fossas com vertedouros e linigrafos para as microbacias, semelhantes às instalações da bacia experimental de Sumé descritas no parágrafo 3.2 .

O conjunto das bacias encaixadas formado por estas parcelas (100 m^2) e microbacias (1 ha), CALDEIRÃO (0,77 km^2), o açude MOQUEM (7,76 km^2), a estação de PIRANGI (194 km^2) e a estação da rede geral do RIO JAGUARIBE, em ARNEIROZ, (6.125 km^2) forneceram algumas indicações, a respeito das variações das lâminas escoadas em função do tamanho das bacias.



Estação de Caldeirão



Fossa de sedimentos

Prancha 4

Figura 3.1.2: Bacia representativa de Tauá: Rede de medição hidropluviométrica e delimitação das bacias hidrográficas

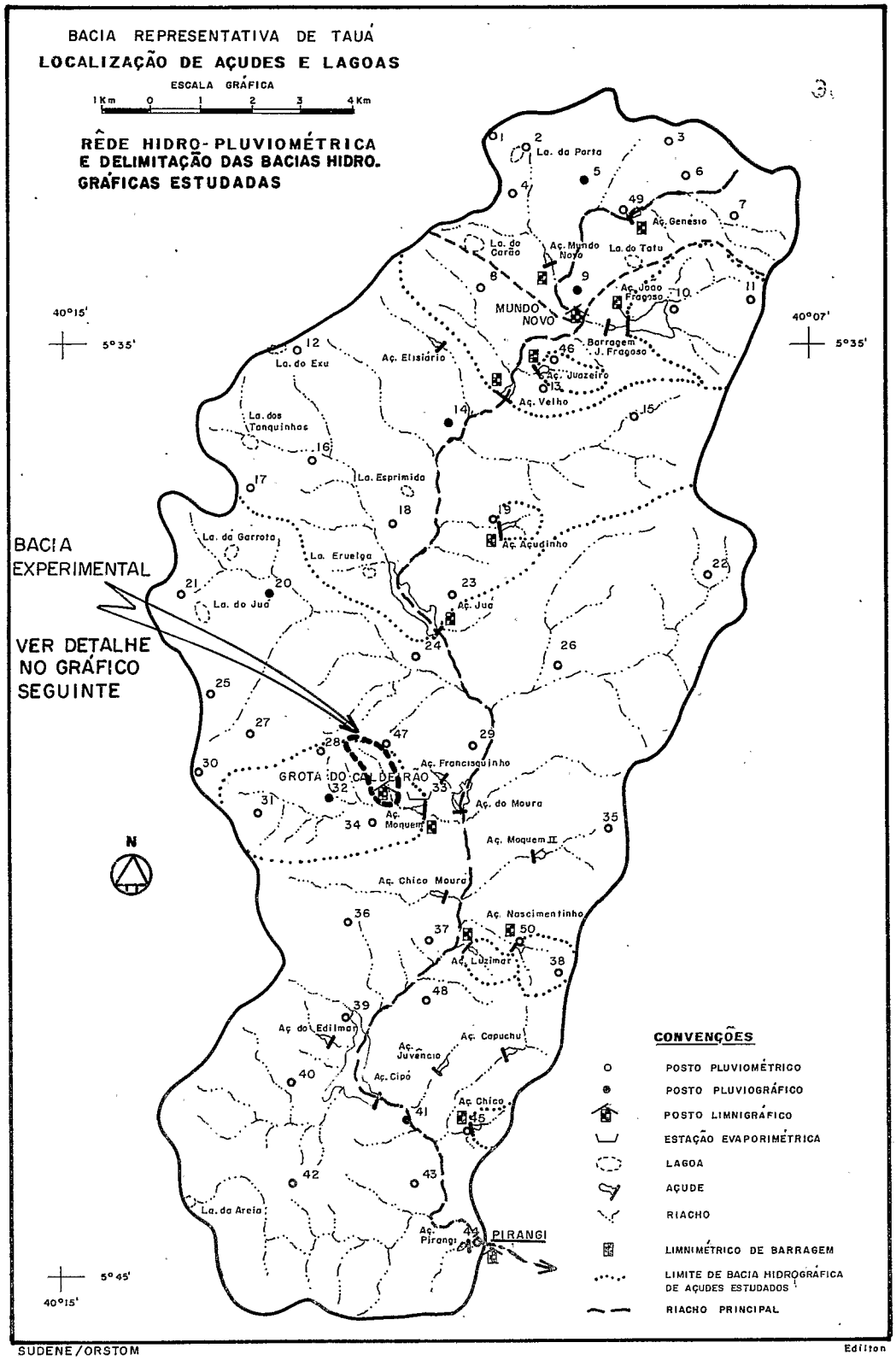
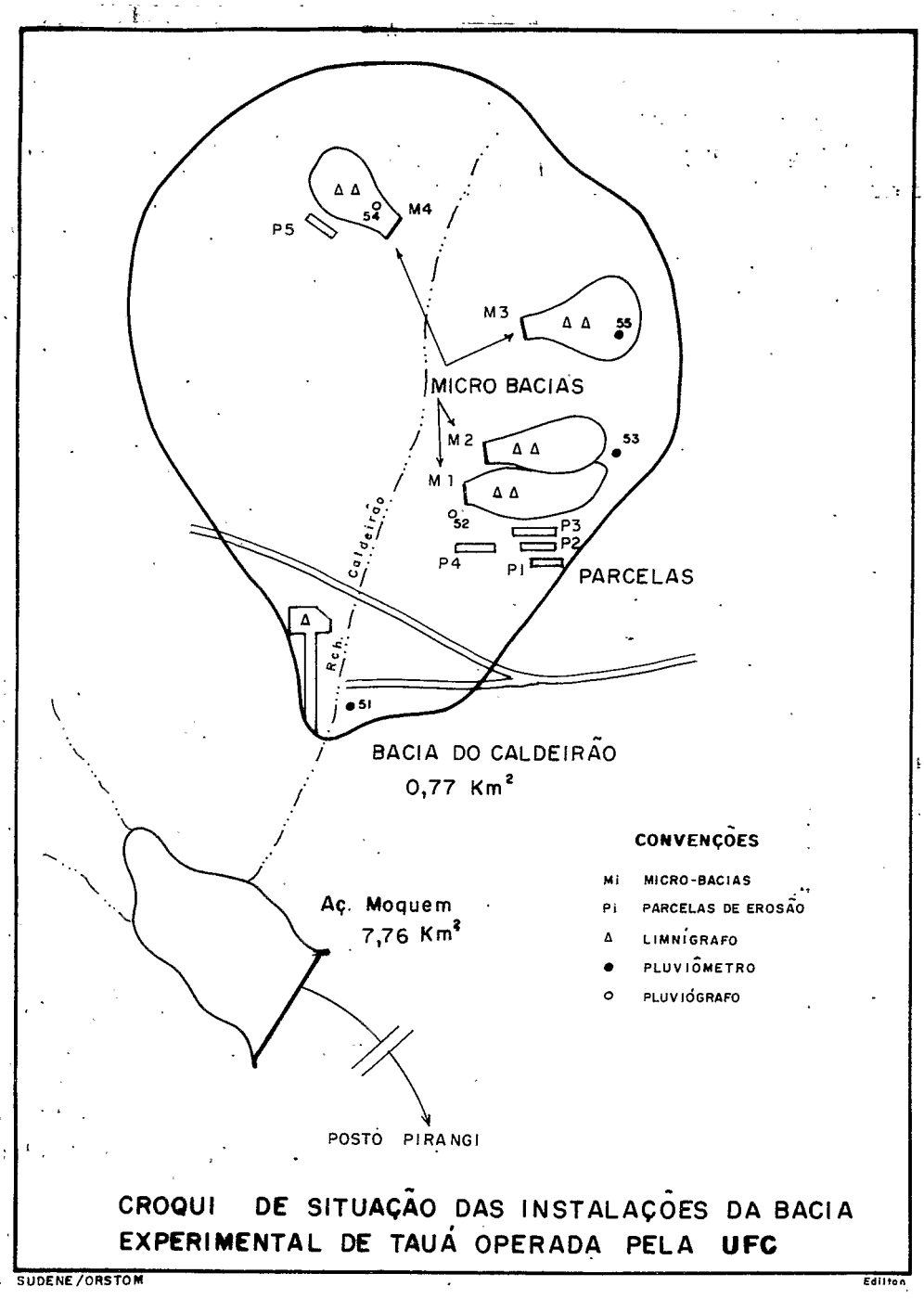


Figura 3.1.3: Croqui de situação das instalações da bacia experimental de Tauá



3.1.4 Resultados obtidos

Série das lâminas observadas

O período de observações atinge dez anos em cinco bacias, oito anos em quatro outras e sete anos em uma última.

TABELA 3.1.4: Lâmina anual escoada da bacia de TAUÁ (mm)

PERIODO	Pluvio-metria	Pirangi	N.Novo	Moq.	J.Fr.	Açud.	Cald.	Luz.	Chico	Juaz.	Nasc.
1978/79	331	0,7	0,6	6,7	1,6	2,7	-	-	-	-	-
1979/80	544	52,4	71,9	169	70	101	-	-	-	-	-
1980/81	662	139,2	274,3	212	210	161	170,4	326	149	104	-
1981/82	318	3,0	0,2	16	5,2	4,2	(12,8)	80	7,1	4,9	6,9
1982/83	216	0,0	0,1	0,9	1,2	1,0	(5,4)	24	0,4	3,9	2,9
1983/84	516	21,8	(85,6)	15	55	61	(23,1)	98	44	49	35
1984/85	1168	(172,8)	(142,7)	266	333	230	(250,1)	395	186	156	220
1985/86	707	(15,4)	(6,2)	92	60	20	(126,1)	234	81	49	49
1986/87	384	(4,7)	(2,4)	11	11	9,4	(20,9)	101	45	24	33
1987/88	625	(54,6)	(63,6)	101	138	71	(90,5)	278	136	78	130
MEDIA	548	(46,5)	(64,1)	89	89	66	(87,4)	192	81	59	68

Analisando as séries observadas no quadro 3.1.4, constatamos, no que se refere às precipitações, o seguinte:

- As médias pluviométricas calculadas nos períodos de observação estão muito próximas da média interanual de 550 mm, estimada para a bacia de TAUÁ.

- Durante esse período, observou-se ao todo[1]:

  . quatro anos claramente deficitários: 1979, 1982,1983 e 1987;
  . quatro anos excedentes : 1981,1985,1986 e 1988;
  . apenas dois anos de totais normais[2]: 1980 e 1984.

[1] Indicando o término do ano hidrológico.

[2] O número de anos qualificados de "normais" é, paradoxalmente, minoritário. Isso reflete a grande irregularidade dos regimes climáticos que nos permite dizer que no Sertão, as secas ou as inundações correspondem à maioria dos casos, a média (ou a normal) sendo, afinal de contas, o caso mais raro.

- Os anos não se assemelham, **três dentre eles são verdadeiramente excepcionais:**

  . 1985 (1.265 mm), é excepcionalmente abundante com um período de retorno da ordem de 20 anos;

  . 1981 (685 mm), apresentou um total um pouco superior à média, mas fica sobretudo caracterizado por uma concentração muito forte das chuvas em março, cujo total foi em torno de 450 mm, o que corresponde a um período de retorno superior a 20 anos;

  . 1983 (216 mm) é, inversamente, um ano de seca catastrófica, cujo período de retorno é estimado em 50 anos. Esse ano foi, circunstância aliás agravante, precedido de outro ano fortemente deficitário em termos de chuvas.

Assim, observou-se nessa região desafortunada, no decorrer do curto período de 1981 a 1985, os dois paroxismos dos castigos hidrológicos que podem atingir o sertão nordestino: secas e inundações.

- **Inundações**: 1981 e 1985 foram anos de inundações memoráveis; não se contam os casos de rompimento de barragens e perdas de cultivos por execesso de água, nas zonas mal drenadas.

- **Secas:** Em 1983, por outro lado, muitos rios não escoaram, as culturas pluviais foram, em sua quase totalidade, perdidas e o rebanho dizimado por três anos deficitários do ponto de vista agronômico. Assim, paradoxalmente, as chuvas de 1981, que provocaram inundações, pararam bruscamente no início de abril, não permitindo que fossem cumpridos, normalmente, os ciclos culturais; 1982 foi um ano de medíocre a mau e 1983, catastrófico!

Quanto aos escoamentos, constatamos nas tabelas 3.1.4 e 3.1.5 que:

- As variações relativas dos escoamentos entre os diversos anos são bem superiores às das precipitações. Praticamente, somente os anos de 1981 e 1985 **totalizam 60% dos volumes escoados no período de dez anos.** Observam-se, nesses anos, coeficientes anuais de escoamento de 20 a 30%. Por outro lado, os escoamentos de 1983 foram, praticamente nulos e os de 1978, 1982 e 1987, muito fracos.

- As lâminas médias observadas no período de 1979 a 1988 superam em 30% o valor interanual estimado. Isso mostra que, nessas regiões de variabilidade climática muito forte, um período de 10 anos de medição é absolutamente insuficiente para estimar, diretamente, as leis de distribuição dos escoamentos. Técnicas "específicas" de modelização e/ou homogeneização são absolutamente necessárias para corrigir os valores brutos observados.

TABELA 3.1.5: Variabilidade dos escoamentos anuais nas bacias de Tauá

	PERÍODO	NÚMERO DE ANOS	PRECIPITAÇÃO	LÂMINA OBSERVADA	81+85 TOTAL	L_{550} (mm)	Lobserv / L_{550}
Bacias com 10 anos:							
PIRANGI	79-88	10	547mm	46 mm	0,67%	(36)	1,28%
MUNDO NOVO	79-88	10	525	65	0,64	(57)	1,14
Aç.MOQUEM	79-88	10	543	89	0,54	70	1,27
Aç. J.FRAGOSO	79-80	10	526	89	0,61	57	1,56
Aç. AÇUDINHO	79-80	10	528	66	0,59	54	1,22
MÉDIA em 10 anos	-	-	534	-	0, 61	-	1,29
Bacias com 8 anos:							
CALDEIRAO	81-88	8	563	83	0,60	70	1,19
Aç.LUZIMAR	81-88	8	610	182	0,47	144	1,16
Aç.CHICO	81-80	8	614	77	0,51	52	1,48
Aç.JUAZEIRO	81-88	8	561	56	0,55	44	1,27
Aç.NASCIMENTINHO	82-88	7	556	68	-	67	1,01
MÉDIA (das 10 bacias)	-	-	557	-	0,58	-	1,24

L_{550} - Denomina-se L_{550} a lâmina média interanual, estimada por modelização, de uma bacia com uma pluviometria média anual de 550 mm como é o caso de TAUÁ.

As cheias

A tabela 3.1.6 resume as características das cheias unitárias das três bacias equipadas com limnígrafos:

Apresentamos nessa tabela as seguintes características das cheias:

a) Parâmetros do hidrograma unitário, segundo a teoria de SHERMANN(1932):

-os tempos de base e de subida;
-descarga máxima para uma lâmina escoada de 1 mm;
-a relação α= Qmax/Qmed que está ligada à forma do hidrograma(αvale Z para uma forma triangular)

b) Parâmetros que permitem o cálculo da cheia decenal:

- X_{10} : a lâmina escoada estimada da cheia decenal;
- K_x**med** : é a média das descargas máximas correspondentes a uma lâmina de 1 mm dos hidrogramas das 10 mais fortes cheias;
- Q_{10} : descarga de pico da cheia decenal calculada pela fórmula $Q_{10} = K_x \cdot X_{10}$.

TABELA 3.1.6: Características das cheias da bacia de TAUÁ

		Hidrograma unitário						
Bacia	Superfície	Tempos de subida	Tempos de base	Descarga Máxima p/ L_S=1mm	$\frac{Qmax}{Qmed.}$	X_{10}	K_x med.	Q_{10}
Pirangi	194 km^2	4 h	20 h	6,7 m^3/s	2,7	26mm	3,44 m^3/s	90 m^3/s
Mundo Novo	19 km^2	2 h	6 h	1,84 m^3/s	2,1	56mm	1.27 m^3/s	71 m^3/s
Caldeirao	0,77 km^2	0h40'	2 h	0,3 m^3/s	2,8	37mm	0,20 m^3/s	7,4 m^3/s

As descargas da cheia decenal de MUNDO NOVO são elevadas em relação a sua superfície, por outro lado as de PIRANGI são, anormalmente, fracas. Deve-se isso à forma alongada dessa bacia que espalha as cheias.

As lâminas escoadas características

A tabela 3.1.7 fornece os valores das lâminas escoadas anuais características de diferentes frequências, lâminas médias para a isoieta de referência de 600 mm (L_{600}) e para a isoieta de 550 mm, o que corresponde, de fato, à situação real da bacia de TAUÁ (L_{550}), lâminas acumuladas durante períodos de vários anos secos consecutivos, coeficientes médios de escoamento anual e lâminas da cheia decenal.

Esses valores foram obtidos por técnicas de modelização e extensão de séries dos dados das 14 bacias que foram julgadas exploráveis.

Tentaremos interpretar as suas variações, em função de nosso conhecimento das características fisiográficas das bacias de alimentação.

TABELA 3.1.7: Lâminas anuais escoadas características da bacia de TAUÁ (mm)

BACIA	L_{600}	$L_{(550)}$	E S C O A M E N T O S DECEN. UMIDO LA01	TRIEN. UMIDO LA033	MEDIAN. LA05	TRIEN. SECO LA067	DECEN. SECO LA09	L(3AC)	CHEIA DECEN. X_{10}	COEF. ESCOAM. MED.(%)
AÇUDE LUZIMAR	170	144	275	186	132	91	43	205	66	26
MICROBACIA Nº 3	96	82	176	101	65	37	(11)	75	52	15
MICROBACIA Nº 1	90	77	149	92	67	43	(18)	85	42	14
AÇUDE MOQUEM	82	70	176	91	56	25	(4)	60	51	13
CALDEIRAO	82	70	156	88	58	33	(13)	70	37	13
NASCIMENTINHO	79	67	149	85	57	31	(11)	67	45	12
MICROBACIA Nº 2	79	67	130	82	60	37	(14)	73	39	12
AÇUDE J.FRAGOSO	67	57	141	73	44	21	(6)	52	48	11
BACIA MUNDO NOVO	(67)	(57)	(148)	(71)	(43)	(18)	(3)	(33)	(56)	(11)
AÇUDINHO	64	54	136	71	43	19	(3)	46	45	10
AÇUDE CHICO	61	52	111	67	44	26	(9)	53	32	10
AÇUDE JUAZEIRO	52	44	93	59	37	26	(9)	56	20	8
BACIA PIRANGI	(42)	(36)	(85)	(43)	(26)	(13)	(2)	(20)	26	6,5
MICROBACIA Nº 4	33	28	74	33	(20)	(8)	(1)	16	25	5,1

Definição das lâminas escoadas características da tabela anterior:

- L_{550} - corresponde ao escoamento médio interanual estimado para a pluviometria anual de 550 mm da BHR de Tauá-CE.
- L_{600} - corresponde a um escoamento médio "padrão", relativo a uma pluviometria de 600 mm no Sertão.
- LA01, LA033, LA05, LA067, LA09 são as lâminas anuais correspondentes às probabilidades de ocorrência (ou de não serem ultrapassadas), conforme discriminação a seguir:

  .F = 0,10 lâmina decenal úmida, chamada mais adiante de LA01
  .F = 0,33 lâmina trienal úmida, chamada mais adiante de LA033
  .F = 0,50 lâmina mediana úmida, chamada mais adiante de LA05
  .F = 0,67 lâmina trienal seca, chamada mais adiante de LA067
  .F = 0,90 lâmina decenal seca, chamada mais adiante de LA09

- A lâmina correspondente ao escoamento acúmulado durante um período de três anos deficitários consecutivos é chamada também L3AC. Essa lâmina foi estimada por técnicos em modelização e corresponde a uma seca com período de retorno de cerca de 20 a 30 anos.
- X10 - a lâmina da cheia decenal, estimada por modelização.
- Além das lâminas definidas acima, a tabela apresenta o coeficiente de escoamento médio anual.

3.1.5 Interpretação: conhecimentos adquiridos através da bacia de TAUÁ

3.1.5.1 Principais tipos de comportamentos hidrológicos

Para caracterizar os diversos aspectos dos regimes hidrológicos identificados, apresentamos os coeficientes característicos seguintes:

- L_{600}: Lâmina escoada média interanual (padrão correspondente à isoieta de 600 mm na zona Sertão);

- Três coeficientes que caracterizam a irregularidade interanual:

$$\frac{LA01}{L_{550}}; \quad \frac{LA05}{L_{550}}; \quad \frac{LA09}{L_{550}};$$

- Um coeficiente caracterizando a *severidade* dos períodos de três anos secos consecutivos:

$$\frac{L_{3AC}}{L_{550}};$$

- O valor da cheia decenal X_{10} e o coeficiente: $\frac{X_{10}}{L_{550}}$

Tentamos reagrupar as bacias da tabela 3.1.7 em função de seus escoamentos e de suas características fisiográficas.
Conseguimos separar as bacias em dois grupos principais:

O grupo a, formado por todas as bacias que não possuem **açudes**[3]. Esse grupo está sub-dividido em 4 sub-grupos numerados de a.1 a a.4.

O grupo b, formado de bacias que contêm um ou vários açudes.

[3] Para isso, evidentemente, não se leva em conta o açude situado na saída, quando não existe nenhum outro açude a montante.

TABELA 3.1.8: Principais grupos ou tipos de comportamento hidrológico na bacia de TAUÁ

Grupo	L_{600}	L_{550}	$\frac{LA01}{L_{550}}$	$\frac{LA05}{L_{550}}$	$\frac{LA09}{L_{550}}$	$\frac{L3AC}{L_{550}}$	X10 (mm)	$\frac{X10}{L_{550}}$
a.1	170	144	1,91	0,92	0,3	1,42	66	0,46
a.2	75 -120	65 -100	1,9 - 2,5	0,79 - 0,90	0,06 - 0,23	0,86 - 1,10	39 - 52	0,53-0,73
a.3	60 - 80	45 - 65	1,9 - 2,5	0,77 - 0,90	0,06 - 0,21	0,85 - 1,09	32 - 48	0,58-0,84
a.4	25 - 60	20 - 45	2,1 - 2,6	0,71 - 0,84	(0,04)-(0,2)	0,57 - 1,27	20 - 25	0,45-0,89
b	30 - 60	40 - 70	2,3 - 2,6	0,72 - 0,79	0,05 - 0,06	0,56 - 0,58	26 - 56	0,72-0,98

3.1.5.2 Descrição dos principais grupos

- **O sub-grupo a.1** é representado pela única bácia do açude LUZIMAR. Essa pequena bacia caracteriza-se por escoamentos excepcionalmente elevados. L_{600} é da ordem de 170 mm e representa o maior valor observado, até a presente data, em todas as pequenas bacias do Nordeste. O coeficiente médio anual de escoamento é da ordem de 0,26.

  A regularidade do regime é muito elevada para essa região. Assim, o valor de 0,3 do coeficiente $LA09/L_{550}$ significa que o escoamento total do ano decenal seco representa ainda, mais do que a quarta parte do escoamento médio anual, enquanto que se observa, em geral, nessa região, valores decenais muito mais fracos ou nulos. Inversamente, o volume da cheia decenal só representa 46% do volume médio anual, outro sinal de regularidade.

  A pequena bacia do açude LUZIMAR é caracterizada por declives relativamente fortes, uma vegetação excepcionalmente degradada ou até inexistente, onde são encontradas faixas de solo Bruno Não Cálcico, cuja superfície é nua, lisa, compactada e que poderia ser usada como zona de demonstração para evidenciar os efeitos da compactação e de vedação dos micro-poros da superfície do solo. Essas partes da bacia, mesmo secas, são extremamente propícias ao escoamento das grandes e pequenas chuvas, o que explica a regularidade dessa bacia, sobretudo caracterizada pela abundância dos escoamentos durante os anos deficitários.

- **O sub-grupo a.2** corresponde, na região de TAUÁ, às pequenas bacias que apresentam grandes escoamentos, sem atingir os valores extremos observados na bacia do açude LUZIMAR. São bacias que possuem, em geral, declividades fortes, vegetação relativamente degradada e percentagem fraca de Vertissolos.

  As bacias dos açudes MOQUEM e NASCIMENTINHO, as microbacias n^{os} 1, 2 e 3 e a bacia CALDEIRÃO, caracterizam esse grupo. L_{600} varia entre 79 e 96 mm, a regularidade é, ainda, forte, com valores de $LA09/L_{550}$ de 0,06 a 0,23. $L3AC/L_{550}$ variando entre 0,86 e 1,10 e X_{10}/L_{550} entre 0,52 e 0,73.

Não temos, no momento, nenhuma explicação física lógica que justifique os escoamentos mais fracos calculados para a microbacia 2, comparando-a às duas outras microbacias 1 e 3. Deve-se isso à falta de precisão na modelização, na medição de descargas ou na estimação da superfície real dessas bacias, cuja parte a montante é mais plana? Ou ainda, a problemas fundamentais, tais como: às diferenças de mecanismos hidrológicos provocados, por exemplo, por variações de composição ou de declividade das rochas dessas bacias que não foram ainda identificadas?

- **O sub-grupo a.3** corresponde ao comportamento mediano das pequenas bacias da região de TAUÁ. Este grupo é representado pelos açudes AÇUDINHO, CHICO e JOÃO FRAGOSO. A vegetação das duas primeiras bacias é muito densa, e não sofre nenhuma degradação acentuada. Isso poderia explicar os valores mais fracos dos escoamentos observados nessas bacias, quando comparamo-los aos do grupo a.2.

  A bacia do açude JOÃO FRAGOSO, é maior mas apresenta declividades mais fracas do que as do açude MOQUEM. Nota-se, em JOÃO FRAGOSO, a presença de alguns baixios ou depressões aluvionares que devem reter uma parte do escoamento. Estas características poderiam explicar os escoamentos mais fracos observados no açude JOÃO FRAGOSO (em relação ao açude MOQUEM).

  Os L_{600} do sub-grupo a.3 são ainda elevados e variam entre 60 e 80 mm. A irregularidade é mais acentuada. $LA09/L_{550}$ variando entre 0,06 e 0,21, $L3AC/L_{550}$ entre 0,8 e 1,1 e X_{10}/L_{550} sendo da ordem de 0,5 a 0,9.

- **O sub-grupo a.4** corresponde às pequenas bacias que produziram os menores escoamentos. Os L_{600} são mais fracos, variando entre 30 e 60 mm. A irregularidade é bem maior. LA09 é praticamente nula, $L3AC/L_{550}$ oscilando entre 0,5 e 1,3 e X_{10}/L_{550}, entre 0,4 e 0,9.

  Esse conjunto é representado por uma bacia coberta por vegetação particularmente bem conservada, a bacia do açude JUAZEIRO, e pela micro-bacia n° 4 coberta completamente de Vertissolos que são chamados comumente de "Massapê", praticamente sem vegetação e com declividades fortes da ordem de 5% (o que é muito elevado para Vertissolo). Parece claro que as fendas e rachaduras profundas que esses solos apresentam quando estão secos, explicam sua forte capacidade de retenção com relação às primeiras chuvas. Entretanto, em condições de forte saturação hídrica, esses solos apresentam uma permeabilidade quase nula e lâminas de cheias relativamente fortes.
  Essas características foram evidenciadas na hora de ajustar os modelos de simulação hidrológica: A micro-bacia n° 4 de TAUÁ é caracterizada por um coeficiente $X_0(3)$ de 31,6 mm bastante elevado que indica uma grande capacidade de retenção; a declividade D(1) relativamente alta que implica em cheias elevadas.
  A quantificação dos escoamentos dos Vertissolos, a evidência de sua capacidade de estocagem e sua tendência a agravar fortemente a irregularidade hidrológica, constituem alguns dos resultados importantes e originais obtidos na Bacia de TAUÁ.

- **O grupo b** é constituído pelas duas bacias maiores, de MUNDO NOVO e PIRANGI, que contêm açudes importantes e numerosos os quais retêm evidentemente uma boa parte do escoamento. Os L_{600} são fracos e variam entre 30 e 60 mm; a irregularidae é muito forte; a lâmina decenal seca é praticamente nula; L_3AC/L_{550} próximo de 0,6 e X_{10}/L_{550} entre 0,7 e 1.0.

  Nessas bacias, os açudes, os baixios e os leitos maiores acentuam a irregularidade. Assim, nos anos deficitários, nenhum açude transbordará, interceptando, dessa maneira, a maior parte dos escoamentos procedentes das nascentes. Isso é verdade, sobretudo depois de 1983, para a bacia de PIRANGI, onde 90% da superfície de drenagem é controlada pelo grande açude CIPÓ, construído no ano acima referido.

  Inversamente, as maiores cheias surgirão geralmente quando as condições de saturação hídrica forem elevadas e quando os açudes estiverem cheios e incapazes de reter uma parte suplementar dos escoamentos, repassando, integralmente, para jusante, a água recebida. Isto explica o valor elevado do coeficiente X_{10}/L_{550} observado nessas duas bacias. Os açudes podem, quando muito, amortizar as cheias e diminuir suas vazões de pico, quando não contribuem, em conseqüência de sua ruptura acidental, para gerar vazões catastróficas

3.1.5.3 Variação das lâminas escoadas em um conjunto de bacias encaixadas.

Dispomos, entre as bacias observadas, de um conjunto de bacias encaixadas umas nas outras correspondendo a 5 ordens de grandeza de superfície bem diferentes: 1 ha, 1 km^2, 10 km^2, 200 km^2 e 6.000 km^2. Tentemos comparar os seus módulos.

Existem quatro bacias bem pequenas:

- Microbacia 1 (0,97 ha): (L_{550} = 77 mm)
- Microbacia 2 (1,41 ha): (L_{550} = 67 mm)
- Microbacia 3 (0,93 ha): (L_{550} = 82 mm)
- Microbacia 4 (1,09 ha): (L_{550} = 28 mm)

Essas quatro microbacias fazem parte da:

- Bacia Hidrográfica de Caldeirão (0,77 km^2)(L_{550}= 70mm), a qual está incluída na:
- Bacia Hidrográfica do Açude Moquem (7,76 km^2)(L_{550}= 70mm), que por sua vez está inserida na:
- Bacia Hidrográfica do Pirangi (194 km^2)(L_{550} = 36 mm) a qual é finalmente controlada pela grande bacia da rede geral do Rio JAGUARIBE, em ARNEIROZ (6.125 km^2), cujo escoamento médio é estimado entre 30 e 40 mm e com uma mediana entre 15 e 20 mm.

É possível fazer as seguintes constatações:

- A bacia do riacho CALDEIRÃO é composta, na sua grande maioria, de solos Brunos não Cálcicos comparáveis aos das microbacias 1, 2 e 3, e, numa proporção menor, de Vertissolos semelhantes aos da microbacia 4. O valor de L_{550} (70 mm), estimado nessa bacia, pode ser considerado como uma integração (ou uma espécie de média ponderada) dos valores das 4 microbacias, com um peso bem menor atribuído à microbacia 4. Isso mostra que não se pode evidenciar, **com os números que se dispõe**, nenhuma degradação hidrográfica (perdas dos escoamentos) entre as bacias elementares de 1 ha e as bacias de 1 km^2. Efetivamente, não existe, nessa bacia, nenhuma zona arenosa aluvial ou de baixio importante.

- A variação de lâmina escoada entre a bacia do riacho CALDEIRÃO (0,77 km^2) e a bacia do açude MOQUEM (7,76 km^2), não é significativa. Não se pode, tampouco, pôr em evidência diferenças de comportamento entre essas duas bacias, cujas coberturas pedológicas são semelhantes e sendo ambas desprovidas de baixios importantes.

- Por outro lado, a lâmina escoada L_{550} diminui de 70 para 36 mm, entre a bacia do açude MOQUEM (7,76 km^2) e a PIRANGI (194 km^2). Isso deve ser atribuído, primeiramente, à presença de mais de 30 açudes, cujo volume total pode ser avaliado entre 3.000.000 e 5.000.000 m^3, o que corresponde a uma lâmina de 15 a 25 mm, distribuída sobre toda a bacia. Nota-se, também, a proporção maior de zonas aluvionares e/ou com relevo fraco, que aumentam, naturalmente, com o tamanho da bacia. Isso é normal numa zona globalmente homogênea do ponto de vista morfológico[4].

- Enfim, comparamos os resultados observados na BHR de TAUÁ com as lâminas escoadas do rio Jaguaribe, em Arneiroz (6.125 km^2), que a engloba. Estima-se o valor da lâmina média interanual do posto ARNEIROZ, aproximado do de PIRANGI.
  Sabemos que a pluviometria anual média nessa grande bacia é da ordem de 600 mm e que seu sub-solo é cristalino, o que as coloca numa mesma categoria de bacia. No entanto, não conhecemos suficientemente suas outras características (pedologia, densidade de açudes, importância dos baixios, etc.), para tentar interpretar as diferenças constatadas.

[4] O aumento da proporção de zonas aluvionares não era sensível entre 1 e 10 km^2

3.1.6 Conclusão da Bacia de TAUÁ

As catorze sub-bacias de Tauá, que puderam ser modelizadas, forneceram numerosas informações **inéditas** sobre os regimes hidrológicos dessa região.

■ Módulo anual

A lâmina escoada anual média das pequenas bacias dessa região, assentadas sobre o embasamento cristalino pré-cambriano, cobertas de solos pouco espessos, varia entre 50 e 80 mm.

A presença de **vertissolo** ou de **vegetação** densa tende a **diminuir** fortemente este escoamento, ao contrário do que acontece quando se encontra **solonetz** ou zonas cuja **vegetação é degradada**.

A irregularidade interanual é forte. Em um ano, a cada três anos, os escoamentos não chegam a atingir a metade ou mesmo a um quarto da **média**; eles são quase nulos, a cada dez anos. A irregularidade é menos forte nas bacias que são pouco permeáveis e desprovidas de zona de retenção d'agua.

■ Novos tipos de bacias

Foi possível estudar dois novos tipos de bacias:

- Um está totalmente situado no **vertissolo**; o outro constitui o que se poderia chamar de um implúvio. Ele é recoberto de faixas de solos cuja **superfície foi degradada** pelo homem, compacta e lisa. Observamos ali os mais altos coeficientes de escoamento medidos até agora no Nordeste.

■ Tamanho da bacia

Medidas efetuadas no conjunto de bacias encaixadas, cujas superfícies variam entre 1 ha e 10 Km^2, mostram que os escoamentos anuais não variam de maneira significativa com o tamanho da bacia. Notamos que não se encontra nessas bacias qualquer zona importante suscetível de reter água.

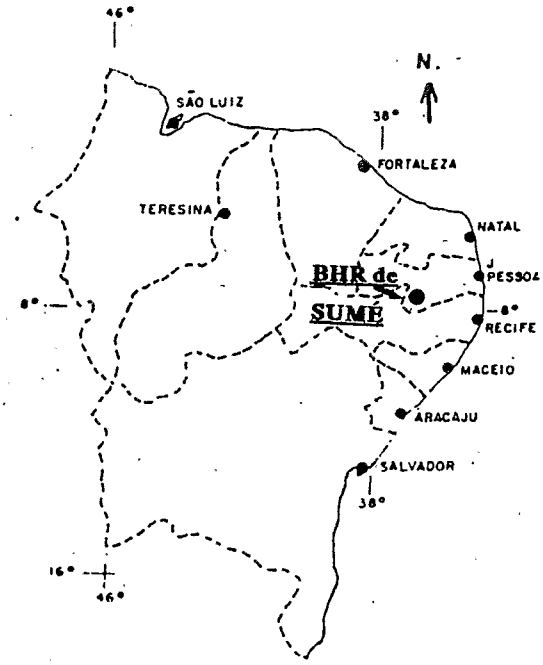
Quando o tamanho da bacia aumenta mais, até cerca de 200 km^2, os escoamentos anuais decrescem em torno de 30 mm. Isso se deve ao elevado número de açudes construídos sobre essa grande bacia e à presença de zonas arenosas nos baixios. É lamentável que não se tenha pedido comparar os escoamentos medidos sobre a BHR de TAUÁ com os escoamentos obtidos, durante o mesmo período, para o grande açude "VÁRZEA DO BOI", situado a jusante

■ Tipologia de bacias

Foi possível esboçar uma tipologia regional de bacias. Os fatores principais dessa tipologia são o solo, a vegetação e o número de açudes construídos no interior das mesmas.

3.2 A BACIA REPRESENTATIVA DE SUMÉ

As informações obtidas na bacia de SUMÉ provêm essencialmente do conjunto de parcelas experimentais com as quais se pôde evidenciar, por exemplo, um fator de aumento do escoamento da ordem de 20, provocado pela supressão da vegetação e pela degradação da superfície do solo.



3.2.1 Histórico

O objetivo inicial desse conjunto de bacias representativas era o estudo da bacia de alimentação, de 768 km^2, do açude "público" de 45.000.000 m^3, construído pelo DNOCS em SUMÉ. A rede de medição hidropluviométrica implantada a partir de 1972 pela SUDENE e pela Univesidade Federal da Paraíba (UFPB), continha 48 pluviômetros, 6 pluviógrafos, 4 limnígrafos e uma estação meteorológica.

Em **1974**, por ser demasiadamente ampla, a rede de medição revelou-se incapaz, com os meios logísticos disponíveis, de fornecer os resultados esperados, principalmente por razões de instabilidade das estações hidrométricas e de dificuldades de acesso durante a estação das chuvas. De acordo com as orientações do ORSTOM, os meios disponíveis foram concentrados na bacia de GANGORRA (137 km^2) e em duas de suas sub-bacias: JATOBÁ (27 km^2) e UMBURANA (10,7 km^2).

As seções dos postos de JATOBÁ e GANGORRA foram estabilizadas por meio de vertedouros que desempenharam o papel de seção de controle. A rede pluviométrica ficou reduzida a 36 pluviômetros. Iniciou-se, nessa época, o monitoramento dos níveis de quatro açudes.

As duas sub-bacias, JATOBÁ e UMBURANA (embora UMBURANA, infelizmente, não tenha sido estabilizada) foram escolhidas para representar dois tipos bem diferentes de bacias, situadas, uma sobre rocha plutônica e a outra sobre rocha metamórfica. Voltaremos a esse assunto mais adiante.

Em **1981**, dentro de um projeto financiado pelo CNPq, chamado "Bacia Experimental", a UFPB, a SUDENE e o ORSTOM instalaram um novo dispositivo composto de 4 e 5 microbacias, e posteriormente nove parcelas experimentais destinadas a estudar a influência da cobertura vegetal e das práticas culturais sobre o escoamento e a erosão de uma zona de solos Brunos Não Cálcicos Vérticos, semelhantes aos de uma boa parte da Bacia de UMBURANA. O monitoramento de quatro novos açudes começou nessa época.

De **1986** a **1989**, um projeto financiado por uma "*Ação Temática Programada*" (ATP) do Programa PIREN, envolvendo os órgãos franceses, CNRS, o INRA e o ORSTOM juntamente com a SUDENE e a UFPB , estudou de modo bem mais acurado os mecanismos hidrológicos.
Foram introduzidas, através desse projeto, técnicas e aparelhos ainda não utilizados nas Bacias Representativas brasileiras como, por exemplo, o infiltrômetro por aspersão , as sondas de neutrons e os tensiômetros.

Em **1990**, a UFPB permaneceu como único órgão a continuar as pesquisas nessa bacia, cuja rede de medição se restringiu aos instrumentos necessários ao monitoramento das 13 parcelas e microbacias do projeto, como também, da bacia de UMBURANA.

Os resultados obtidos na bacia de SUMÉ foram registrados em numerosas publicações. Podemos citar, desculpando-nos por possíveis esquecimentos:

- Um relatório de síntese parcial dos resultados obtidos na bacia representativa, referente ao período de 1972-80 (CADIER e FREITAS, 1983).
- Uma publicação dos primeiros resultados obtidos na bacia experimental (CADIER *et al*, 1983).
- Vários artigos foram apresentados em simpósios: CADIER *et al* (1983), MOLINIER (1985), GOMES *et al* (1987), SRINIVASAN *et al* (1988), MOLINIER *et al* (1989b)
- Dois relatórios da ATP: AUDRY *et al* (1987), MOLINIER *et al* (1989a).
- Uma tese de mestrado (GALVÃO, 1990).

3.2.2 Descrição da bacia

Instalada antes da planificação estabelecida por NOUVELOT (1974), SUMÉ encontra-se na zona homogênea $\mathbf{H_2}$, $\mathbf{P_1}$, $\mathbf{R_4}$, $\mathbf{A_2}$, com as seguintes características:

$\mathbf{H_2}$ = Total das precipitações anuais entre 400 e 600 mm
$\mathbf{P_1}$ = Sub-solo impermeável
$\mathbf{R_4}$ = Relevo moderado
$\mathbf{A_2}$ = Altitude entre 500 e 800 m.

▪ Clima, pluviometria

Situada a 250 km da costa atlântica, no SERTÃO do CARIRI, podemos alcançar SUMÉ por rodovia a 450 km de distância do Recife e a 130 de Campina-Grande, campus da UFPB.

A pluviometria dessa bacia é fraca e irregular; estima-se sua média interanual entre 550 e 600 mm, com um coeficiente de variação elevado, em torno de 40% (JACCON, 1982).

A bacia de SUMÉ encontra-se ligeiramente a Oeste do centro da depressão pluviométrica provocada pelos relevos da chapada da BORBOREMA que intercepta as massas de ar oceânicas e cria, por efeito de interceptação ou de *foehn*, uma zona cuja pluviometria média é provavelmente inferior a 400 mm, centrada em CABACEIRAS, que foi, por muito tempo, chamada "*polo da seca do Brasil*".

A análise das séries de chuvas em 24 h e de suas intensidades mostra um regime pluviométrico normal para essa parte do Sertão: chuva anual em 24 horas de 61 mm, decenal de 107 mm, intensidades decenais de 70 mm/h em 60', de 80 mm/h em 30' e de 125 mm/h em 10', etc.

Como em toda a zona norte do Sertão, a estação das chuvas centra-se em março, começando em geral entre janeiro e março, terminando em maio. A temperatura média anual é de 24°C (máxima em novembro-dezembro e mínima em julho-agosto). A evaporação anual é de 2.800 mm em tanque classe A.

■ Geologia, pedologia e relevo

Os solos da região são conhecidos graças aos levantamentos da EMBRAPA/SUDENE na escala de 1:500.000, (1971) e por um esboço em 1:100.000 da bacia de SUMÉ (LEPRUN *et al*, 1983).

Essa bacia está inteiramente situada sobre embasamento cristalino pré-cambriano. Seu sub-solo é impermeável e não existe aquífero generalizado; pode-se encontrar lençois confinados nas falhas ou nas formações aluviais superficiais, geralmente perto dos rios.

*** Grandes famílias de rochas e de solos:**

Encontram-se na bacia de Sumé, duas grandes famílias de rochas pertencentes ao embasamento cristalino pré-cambriano:

- Os granitos alcalinos que geram solos Podzólicos vermelhos a amarelos, espesso, permeáveis. Estes solos são quase sempre cultivados e estão, em sua quase totalidade, ocupados por médias e pequenas propriedades que substituíram grande parte da caatinga original por culturas. As bacias dessa zona estão cercadas por relevos rochosos e sempre por amontoamento de rochas graníticas.

- As formações metamórficas, principalmente compostas de xistos, de paranfibólitos e de gnaisses, sobre os quais se desenvolvem os solos Brunos Não Cálcicos, quase sempre Vérticos. Os gnaisses e os quartzitos geram solos Litólicos.

  Nesse segundo tipo de formação, coberta por solos menos espessos e mais difíceis de serem aproveitados, a densidade de população é menor e o tamanho das propriedades é, quase sempre, bem maior. As fazendas, tradicionalmente dedicadas à pecuária, alteram, em geral, muito pouco a vegetação natural composta de caatinga, sistema arbustivo denso e dificilmente penetrável. Essa cobertura vegetal foi, algumas vezes, destruída para produzir carvão.

*** Características das sub-bacias:**

As três sub-bacias de SUMÉ representam as seguintes zonas :

- Três quartos da bacia de JATOBÁ estão cobertos por granitos, migmatitos e solos Podzólicos.
- A bacia de UMBURANA, situada sobre rochas metamórficas, foi escolhida para representar este segundo tipo de ecossistema.
- A maior bacia, a de GANCORRA, integra as duas formações precedentes.

O relevo geral de todas essas bacias é mais forte do que o de TAUÁ, porém inferior ao do RIACHO DO NAVIO (desníveis específicos da ordem de 25 a 50 m e classe de relevo 3 a 4). No entanto, as declividades reais dos solos são, de fato, da mesma ordem de grandeza e constatamos que é mais "a amplitude" do relevo do que as declividades transversais que varia.

Enfim, notamos que se encontram sempre, nas três bacias estudadas de SUMÉ, zonas aluviais cobrindo superfícies relativamente modestas (de 1 a 7% das superfícies), mas que estão situadas a jusante, perto dos rios principais. Esses aluviões têm, evidentemente, um papel importante na transferência (e na retenção) dos escoamentos que vêm das zonas a montante.

*** Complexibilidade e variação dos solos e das rochas**

Um estudo detalhado conduzido dentro do progama do ATP/PIREN evidenciou a grande complexibilidade e variabilidade espacial da pedologia e da geologia que se refletirão, evidentemente, nos mecanismos hidrológicos.

O esquema da figura 3.2.3 mostra toda a complexidade do esquema de ditrisbuição dos solos e da circulação das soluções num interflúvio de apenas 200 m de extensão. MOLINIER *et al* (1989a) fazem referência a três tipos principais de rocha, classificados por "ordem crescente de riqueza em base e decrescente de dureza e de resistência à alteração":

- pegmatitos quartzitos feldspáticos que são encontrados, quase sempre, sob a forma de afloramentos rochosos, perto dos divisores da água, em volta dos quais encontram-se solos Brunos não Cálcicos pouco evoluídos, pouco espessos e pedregosos ou solos Litólicos ainda menos evoluidos. Estes solos são constituídos, praticamente, de um horizonte A de 20 cm de espessura, depois, diretamente, de um horizonte C. Eles possuem uma capacidade de retenção hídrica fraca;

- gnaisses com anfibólitos que geram solos Brunos não cálcicos Vérticos, apresentando, a mais do que o solo precedente, um horizonte B Vértico de mais ou menos 50 cm de espessura, argiloso, de porosidade muito fina, caracterizado, ao mesmo tempo, por uma capacidade de retenção hídrica relativamente grande e, uma fraca permeabilidade quando saturado;

- anfibólitos que geram solos Brunos não cálcico Vérticos ou Vertissolos, nas depressões.

Figura 3.2.1: Esboço geológico da bacia de SUMÉ

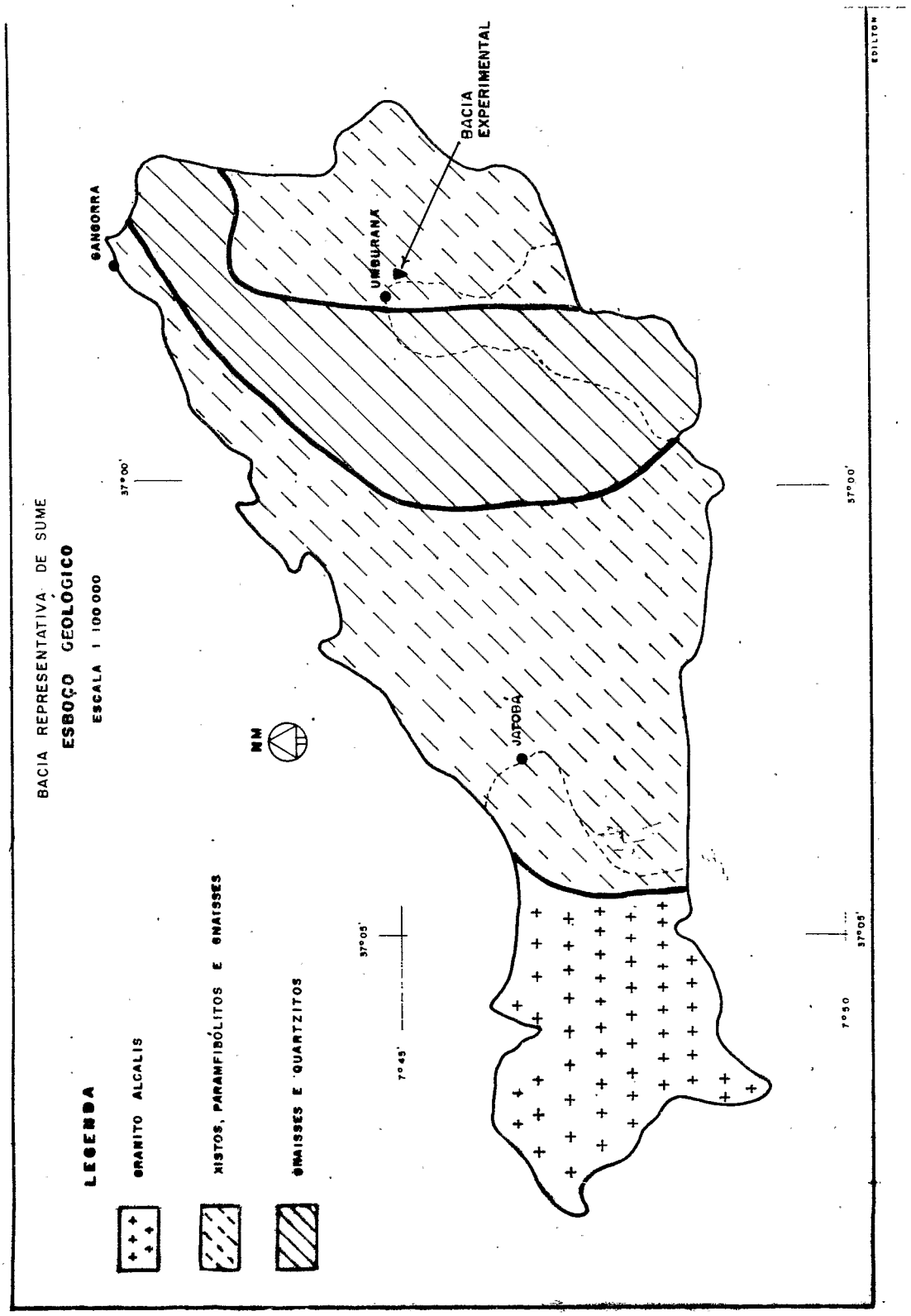
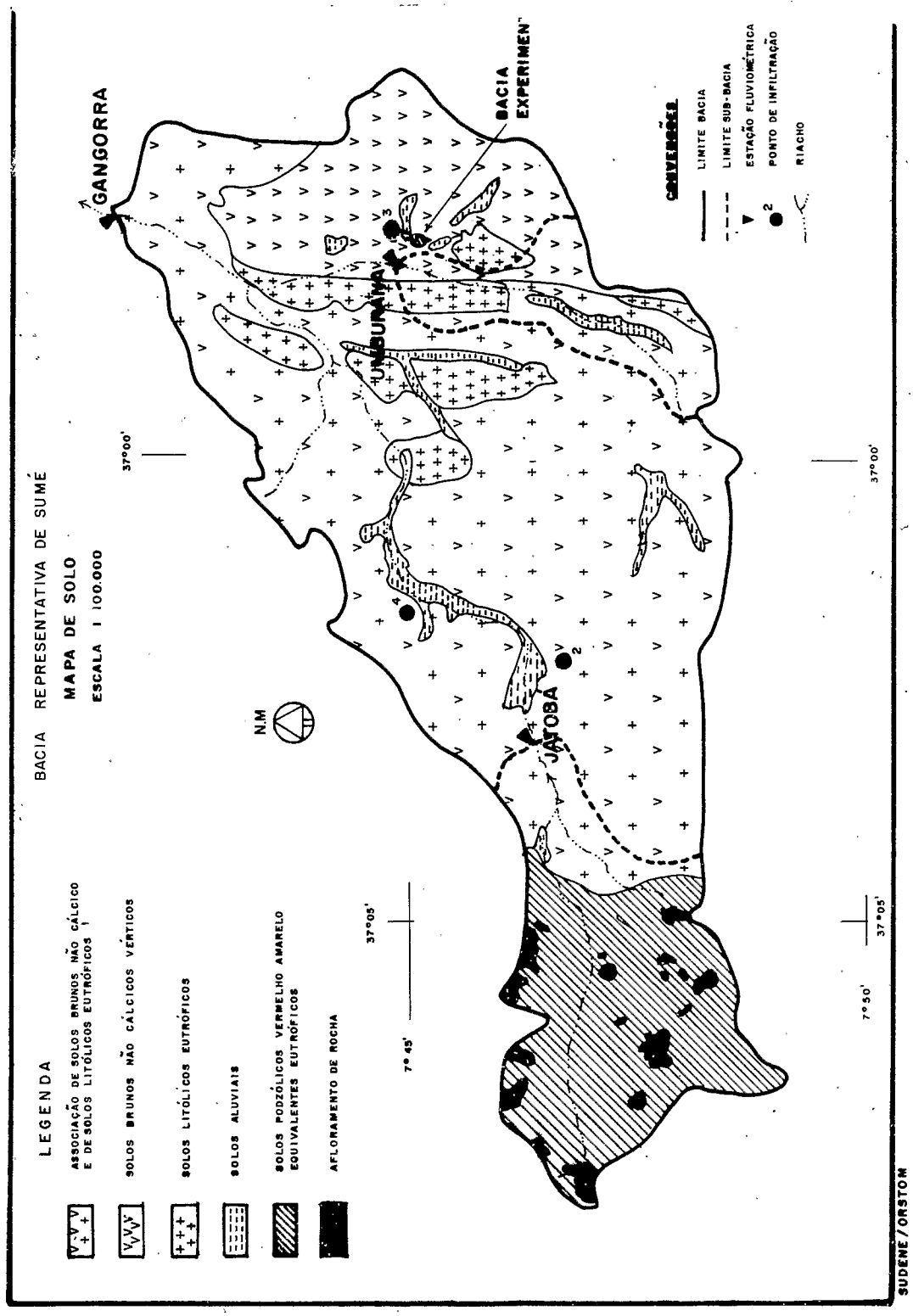


Figura 3.2.2: Mapa dos solos da bacia de SUME



Esses diferentes tipos de solos têm, evidentemente, comportamentos hídricos muito contrastantes. As variações rápidas que se constatam em alguns poucos metros e que são dificilmente previsíveis com segurança, quando não se pode abrir uma trincheira para verificar a explicação geológica, levam a que se proceda com grande prudência quanto ao objetivo "*de explicação determinista*" dos fenômenos que permitiriam tornar operacionais, técnicas de extrapolação espacial.

A tabela 3.2.1 indica as velocidades da infiltração da água após seis horas, medida pelo método de MUNTZ. Cada valor corresponde à média de três testes realizados nos locais que foram plotados na figura 3.2.2 (Fonte: Leprun *et al*, 1983).

Tabela 3.2.1 Resultados dos testes de permeabilidade da bacia de SUMÉ.
Método de Muntz

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO APOS 6 HORAS(mm/h)
SU 01	Litólico (em transição)	27
SU 02	Bruno não cálcico sob caatinga pouco elevada	34
SU 03	Bruno não cálcico sob caatinga natural	26
SU 04	Litossólico eutrófico rasos	45
SU 05	Podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico	370

■ Vegetação e ocupação do solo

Evolução das coberturas vegetais da bacia de SUMÉ

Paradoxalmente, constatou-se, nos dez últimos anos, uma evolução aleatória e rápida das coberturas vegetais da zona metamórfica, que tem, no entanto, solo menos profundo e mais pedregoso. Assim, alguns dos grandes proprietários foram levados, por diversas razões, a modificar completamente as coberturas vegetais de grandes superfícies. Por exemplo, eles substituiram a caatinga por pastagens, plantações de tomate ou de palma para forrageira (cactos destinados à alimentação do rebanho). Esta zona tinha sido, até então, relativamente poupada, enquanto que a zona coberta por solos Podzólicos, mais populosa, mais explorada, foi estabilizada desde muito tempo.

São diversas as motivações dos proprietários:

. dinamismo relativo e recente dessa região[5], ocasionado pelas novas construções de estradas pavimentadas, pela proximidade de grandes centros urbanos comsumidores, pela existência de uma fábrica de conserva de tomate e/ou pelo crescimento da cidade de SUMÉ, em volta do perímetro de irrigação do DNOCS;

[5] Nitidamente maior que nas regiões análogas das bacias de TAUÁ ou de RIACHO DO NAVIO.

. possibilidade de efetuar, de uma só vez, devido ao tamanho de suas propriedades, a valorização de grandes superfícies e assim atingir certos níveis de rentabilidade. Esses grandes proprietários têm, com freqüência, um acesso mais fácil aos créditos e dispõem de capital próprio.

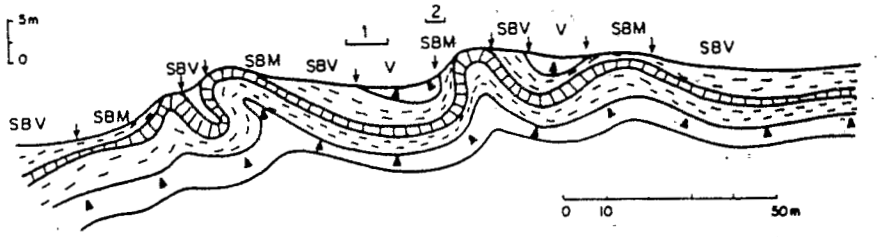
O conjunto de bacias experimentais e de parcelas, instalado em 1981 na BHR de Sumé, permitiu utilizar as modificações provocadas pelo desmatamento parcial de uma grande propriedade, propiciando a oportunidade de se poder medir a influência da supressão da caatinga e de testar diversas práticas culturais com relação ao escoamento e a erosão.
A tabela 3.2.2 indica as ligações existentes entre certas características fisiográficas das bacias estudadas.

TABELA 3.2.2: Principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação da bacia de Sumé

Formação geológica	Granito alcalino		Xisto Gnaisse		Parafibólitos quartzitos	
Solos gerados	Aflo-ramento de rocha	Solo podzólico verm. amar. Equivalente Eutrófico	Bruno não cálcico (vértico ou não vértico)		Litó - lico pouco espesso	Solos aluvi-ais
Ocupação do solo	Sem cultura	Muito cultivado	Pouco cultivado, sobretudo de caatinga nativa			Cultivado
Permeabilidade (mm/h)	0	Forte, entre 300 e 400	Fraco entre 25 e 40. Capacidade de retenção de + ou - 60 mm para os solos vérticos			Forte >500
Porcentagem por Bacia						
GANGORRA	1%	15%	73%		7%	4%
UMBURANA	-	-	74%		19%	7%
JATOBÁ	6%	74%	19%	-	-	**1%**

Figura 3.2.3: A complexidade da repartição e do funcionamento dos solos da bacia experimental de SUMÉ *(segundo AUDRY, LEPRUN e MOLINIER)*

Fig-3-2-3-a



pegmatito
gnaisse
anfibolito

REPARTIÇÃO DOS SOLOS EM FUNÇÃO DA FORMA DO RELEVO DA BACIA DE UMBURANA E DA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

SBM **Solos brunos não-cálcicos**
SBV **Solos brunos não-cálcicos vérticos**
V **Vertissolos**

Fig-3-2-3-b

Esquema de funcionamento dos solos brunos não-cálcicos vérticos. (BNCV) Solo nú

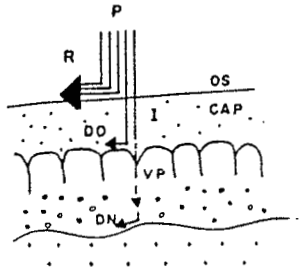
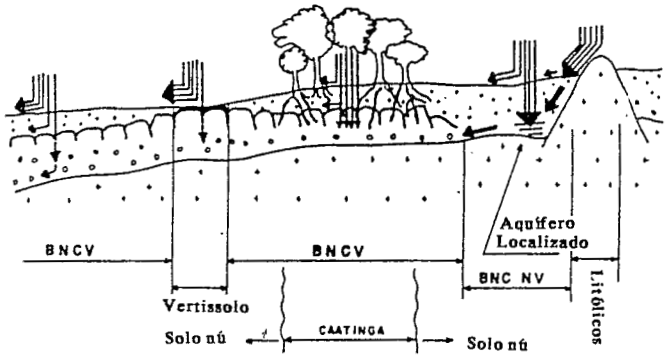


Fig-3-2-3-c

Sistema solos x vegetação



LEGENDA

Horizonte superficial estruturado, poroso, permeável — BNCV, BNC NV
Horizontes vérticos
Horizonte de alteração
Rocha-Mãe (em realidade, heterogênea)

MODIFICAÇÃO DO SOLO E DA VEGETAÇÃO NA BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ

Prancha 5



Caatinga original (L_{600} = 10mm)



Fase 1 - repouso depois do cultivo. Se vêem ainda os sulcos. 1982-1984 (L_{600} = 67mm)



Fase 1 - Repouso depois do cultivo. Se vêem ainda os sulcos. 1982-1984 (L_{600} = 67mm)



Fase 2 - Impedindo a vegetação de crescer 1984-1986 (L_{600} = 95mm)



Fase 3 - O solo foi erodido 1987-1988 (L_{600} = 180mm)

■ Relevo e morfologia

A tabela 3.2.3 resume as principais características morfométricas das três bacias:

TABELA 3.2.3 Parâmetros morfométricos das três direfentes sub-bacias de Sumé.

CARACTERES MORFOMETRICOS	GANGORRA	UMBURANA	JATOBA
Tamanho e forma:			
.Superfície(km^2)	137,4	10,7	26,8
.Perímetro (km)	69,5	18,2	28,5
.Comprimento do retângulo equivalente(km)	30,2	7,65	12,0
.Largura do retângulo equivalente(km)	4,55	1,40	2,23
.Indice de compacidade C	1,66	1,55	1,54
Declive e relevo:			
.Classe de relevo	R_3	R_3	R_3
.Altitude média (m)	590	590	650
.Indice global de declividade (m/km)	3,9	6,8	9,3
.Desnível específico (m)	46	26	48
Rede de drenagem:			
.Densidade de drenagem (km/km^2)	2,3	1,9	1,3
.Relaçao de comprimento Rl	2,2	-	2,6
.Relaçao de confluência Rc	4,5	4,5	3,2

3.2.3 Rede de medição hidrometeorológica instalada

As figuras 3.2.4 a 3.2.6 mostram o conjunto dos instrumentos de medição instalados na bacia representativa e na bacia experimental.

3.2.3.1 Bacia representativa : 1974-1989

Os dados da bacia representativa são, em geral, de qualidade sofrível pelas seguintes razões: dificuldades para encontrar observadores competentes ou responsáveis, instabilidade dos leitos, dificuldades de acesso e de realização de medição de descarga com águas altas (as cheias acontecem geralmente à noite), pouquíssima manutenção dos limnígrafos. Os anos anteriores a 1975 são inexploráveis; o período de 1976 a 1981 é utilizável; em 1982 e 1983, os rios, praticamente, não escoaram e constata-se, depois de 1984, uma baixa sensível na qualidade das informações recolhidas no campo.

Infelizmente não foi possível explorar sistematicamente, como em TAUÁ, os dados limnimétricos de um conjunto de açudes, porque os açudes de SUMÉ são menos numerosos e têm coberturas vegetais mais complexas , mais difíceis de serem definidos de uma maneira simples. Além disso, a maior parte desses açudes têm bacias embutidas uma dentro da outra, o que complica a interpretação de seu comportamento. A superfície média controlada por pluviômetro é de 3,8 km^2.

3.2.3.2 Bacia Experimental: 1981-1990

- O equipamento foi instalado para estudar a **influência da cobertura vegetal** de acordo com os seguintes princípios:

  - Assegurar o monitoramento hidrológico e sedimentológico de dois pares de microbacias de 0,5 a 1 ha de superfície; as duas primeiras cobertas com vegetação natural e as duas outras sem vegetação.

  - Manter, em certo número de parcelas de 100 m^2, as condições mais próximas possíveis daquelas das microbacias citadas acima. Utilizar as outras parcelas para testar livremente diversas coberturas vegetais e/ou práticas culturais.

- Os solos dominantes são **Bruno Não Cálcicos Vérticos**, associados a solos Litólicos e a Vérticos.

- Os **declives** variam entre 4 e 9%.

- As **coberturas vegetais** testadas são as seguintes:

  - **Caatinga nativa** descrita por FOTIUS,(1983), que assegura ótima proteção do solo e cuja altura máxima varia entre 3 e 6 m (microbacias 1 e 2 e parcela 5).

  - **Zonas sem vegetação** (microbacias 1 e 2, e parcelas 4 e 6). Na realidade, várias modalidades de tratos culturais e de manejo do solo foram aplicadas sucessivamente, o que permitiu testar diferentes casos:

    . Entre 1982 e 1984, as zonas chamadas "*sem vegetação*" estavam recobertas por uma capoeira, que cresceu espontaneamente depois do abandono da cultura de tomate, onde existiam sulcos que seguiam as curvas de nível e eram utilizados para a distribuição de água para irrigação. Os sulcos foram progressivamente aterrados ao longo dos anos. Como os anos de 1982 e 1983 foram muito secos, essa capoeira, praticamente, não cresceu durante estes anos. No entanto, as primeiras chuvas de 1984 provocaram, literalmente, uma explosão da vegetação arbustiva regeneradora da caatinga primitiva, tornando as zonas chamadas "sem vegetação" completamente cobertas de rebentos de arbustos espessos, frondosos e densos.

Figura 3.2.4: Rede de medição do açude SUMÉ

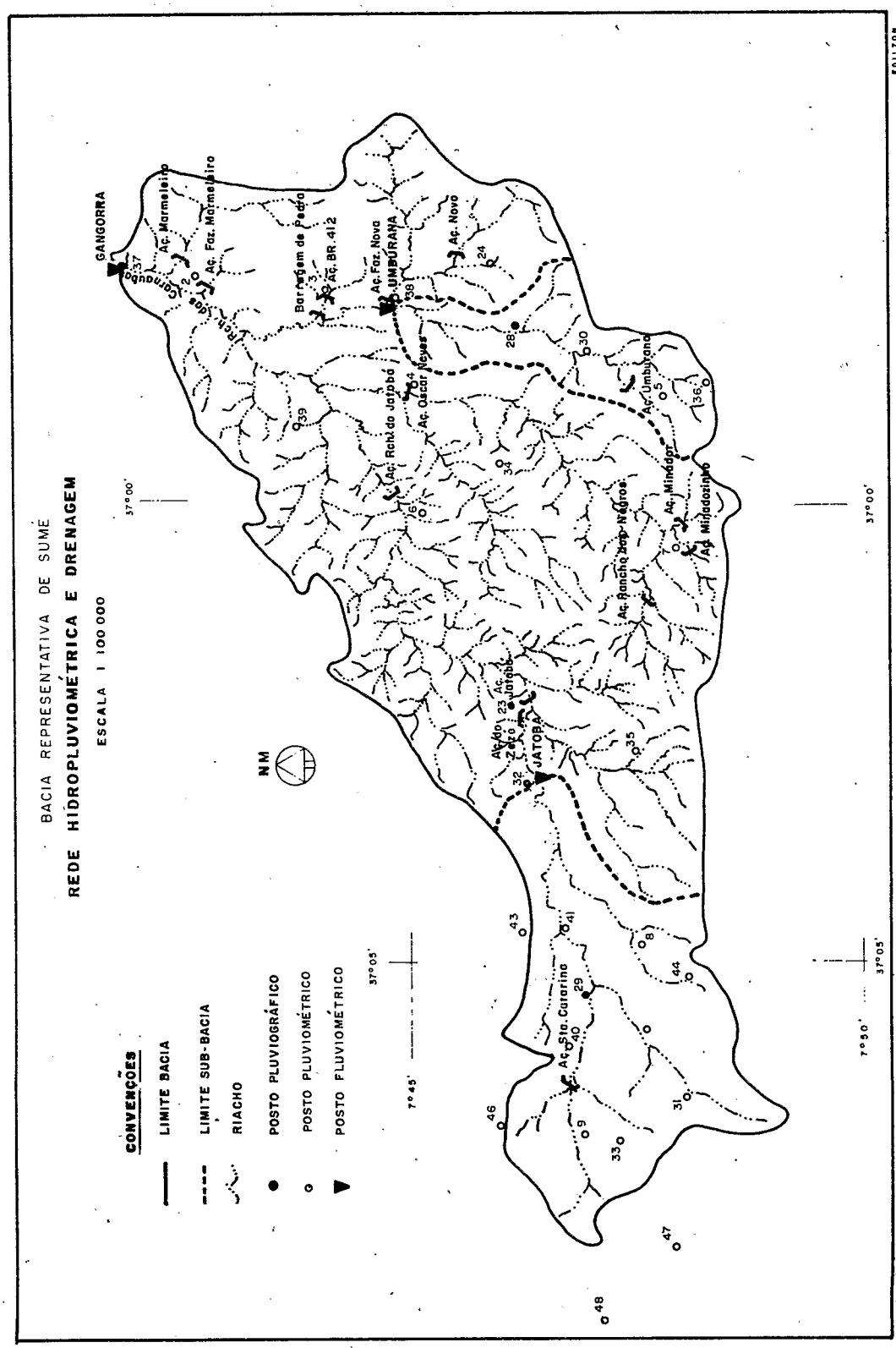
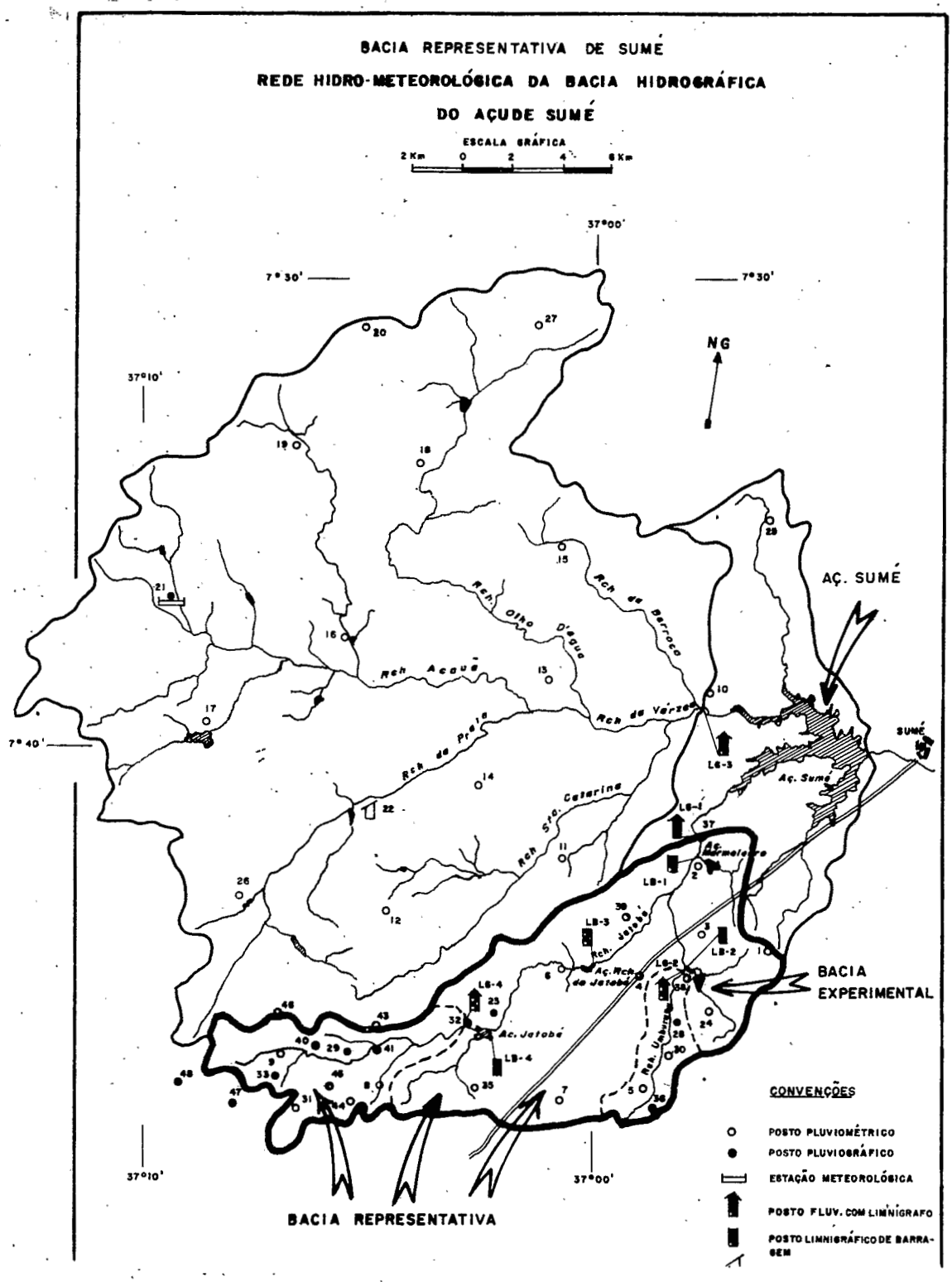


Figura 3.2.5: Rede hidropluviométrica e hidrográfica da BHR de SUMÉ



. A partir de 1985, um controle rigoroso dessa cobertura vegetal levou a que se arrancasse, sistematicamente, todos os rebentos ou ervas para conseguir as condições de erosão máxima recomendadas por WISCHMEIER.

. Depois disso, progressivamente e, sobretudo a partir de 1987, observou-se o desaparecimento impressionante das primeiras camadas do solo pela erosão, o que se traduziu por um aumento muito sensível dos escoamentos e do aparecimento de pedras e rochas.

- Outras coberturas vegetais foram testadas nas **parcelas:**

. culturas de palmas forrageiras com sulcos, seja em contorno seja morro abaixo (parcelas 6 e 7);
. regeneração da caatinga durante vários anos depois de sua destruição (parcelas 8 e 9);
. tentativas de manter, durante vários anos, uma camada de capim denso de 25 cm de altura máxima (parcelas 2 e 3).

O **dispositivo de medição** descrito por CADIER *et al* (1983) é formado dos seguintes equipamentos:

- **Para as microbacias**: (ver figura 3.2.7) uma fossa de sedimento de 1 m de largura e de 3,25 de comprimento, equipada com um vertedouro triangular, com parede fina e com 90^{o} de abertura. Esse vertedouro começa a escoar quando o nível da água atinge 80 cm acima do fundo da fossa. O nível da água nessas fossas é registrado por dois limnígrafos, um funcionando permanentemente e outro muito mais rápido e preciso que deve ser ligado no início de cada cheia. As fossas retêm os sedimentos mais grosseiros; é preciso recolher, manualmente, as amostras dos sedimentos em suspensão carregadas pelos sangramentos. A descarga máxima do vertedouro é de 270 l/s.

- **Para as parcelas de 100 m2** (de acordo com as normas de WISCHMEIER e SMITH, 1978), são instalados dois reservatórios de fibra de cimento de 1.000 litros, separados por uma divisória que permite recolher na segunda fossa a nona parte dos escoamentos oriundos da primeira (ver figura 3.2.8).

As medições dos escoamentos são feitas pela leitura direta das réguas graduadas em mm, cujos valores são traduzidos em volumes, e, para os transportes sólidos é utilizado um protocolo de amostragem da mistura água-sedimento recolhida das alturas d'agua registradas pelas réguas graduadas em mm. Para o trasporte sólido, utiliza-se um roteiro de amostragem da mistura água-sedimento recolhida. É preciso, naturalmente, multiplicar por 9 tudo o que é medido no segundo reservatório, a jusante do divisor.

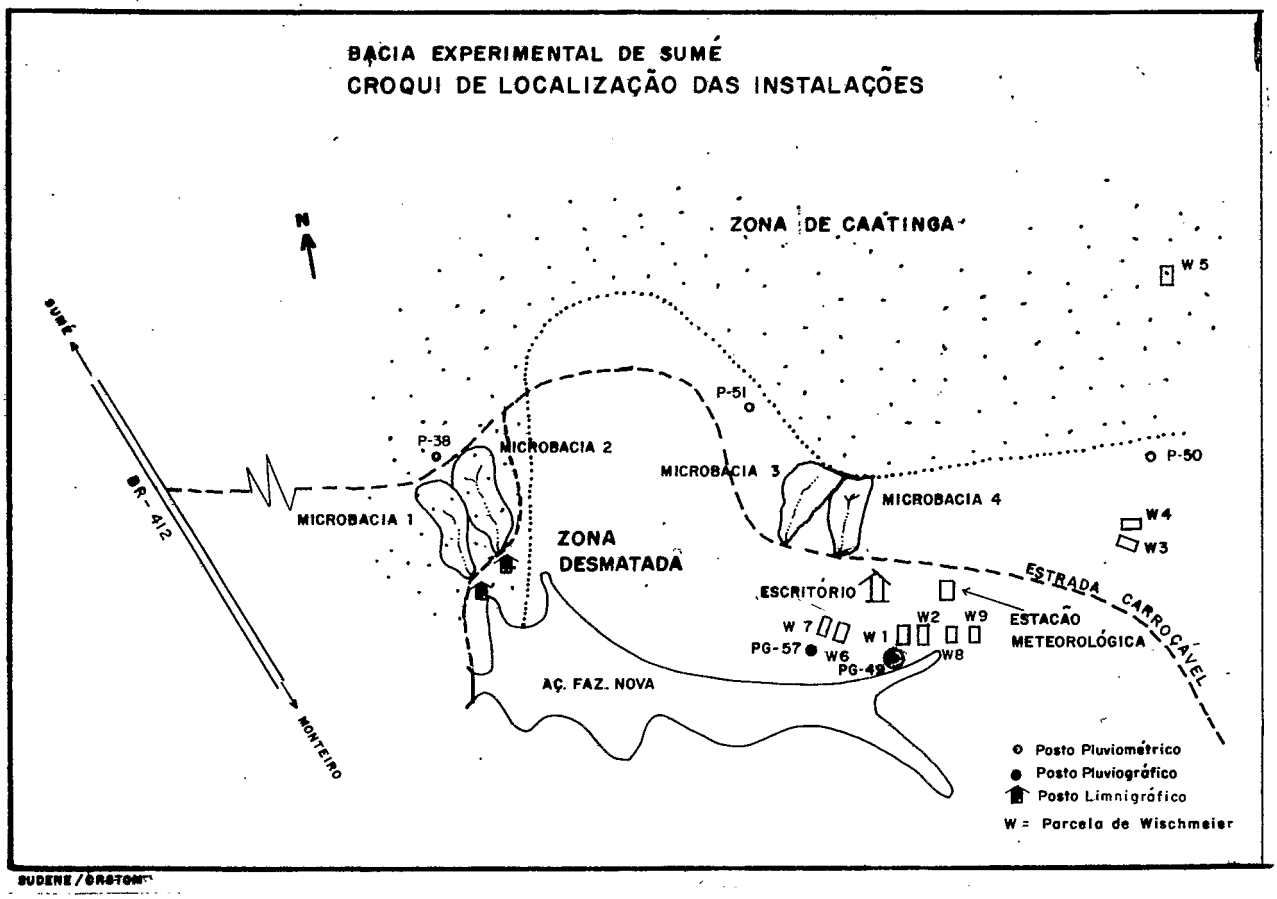


Figura 3.2.6: Croqui de situação da bacia experimental de Sumé

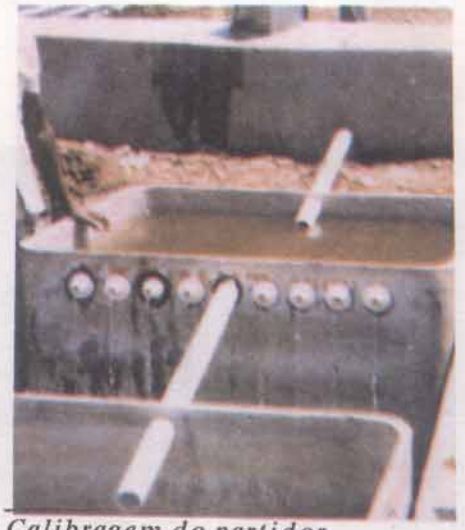
Esse dispositivo de medição funcionou no campo, desde o início, de maneira bastante satisfatória, graças à presença permanente de um técnico. Pôde-se, rapidamente, evidenciar diferenças significativas de comportamento. Os maiores problemas encontrados estavam relacionados ao controle da homogeneidade e da reprodutividade das características da cobertura vegetal, cujo crescimento e/ou perda de folhas é dificilmente controlável. Por outro lado, aconteceu, por uma ou duas vezes, que as cheias mais fortes das microbacias e parcelas **sem vegetação** alagaram ou entupiram com lama os equipamentos que retêm os sedimentos.

BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ
DIVERSIDADE DAS MEDIÇÕES REALIZADAS

Prancha 6



Uma fossa de captação de sedimento



Calibragem do partidor



Uma bateria de parcelas



Como recolher os escoamentos fracos



Os tensiômetros (A.T.P)



Simulador de chuva (A.T.P)



Medição volumétrica de descarga na estação principal de Gangorra

OUTROS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Prancha 7



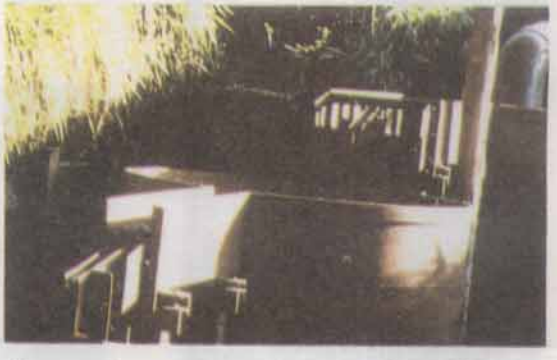
Simulador de chuva tipo "SWANSON"
na bacia do Riacho do Navio



Outro dispositivo de partição d'água



Bateria de parcelas de erosão
em Alagoinha(PB)(instalada em 1944)



Outro dispositivo de partição d'água

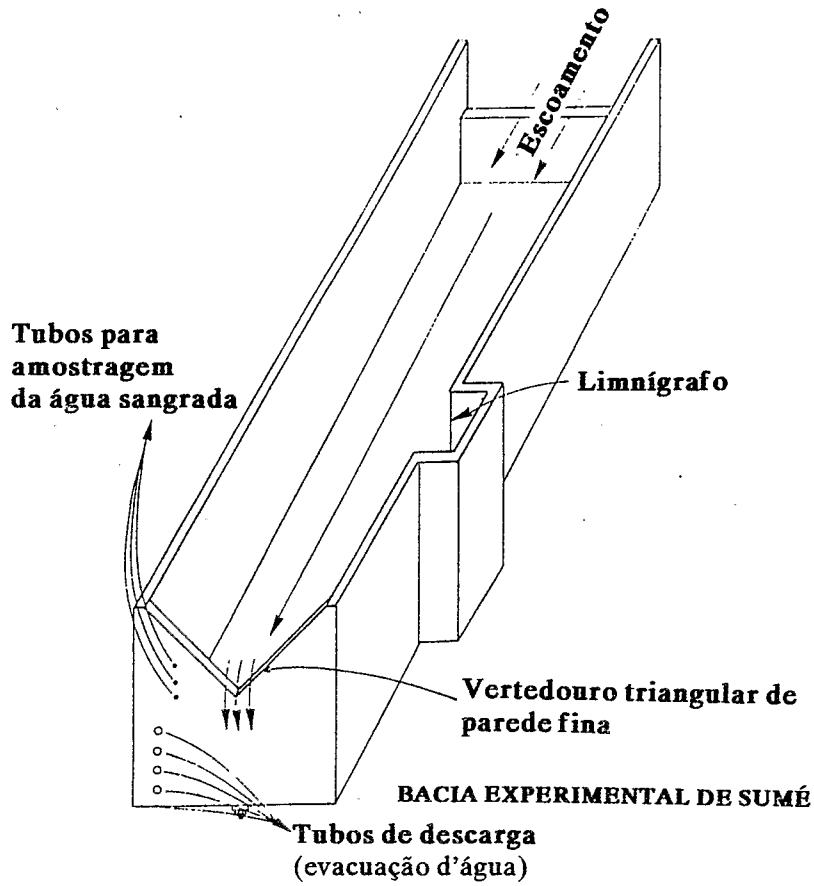


Figura 3.2.7: Fossa de sedimentos das micro-bacias

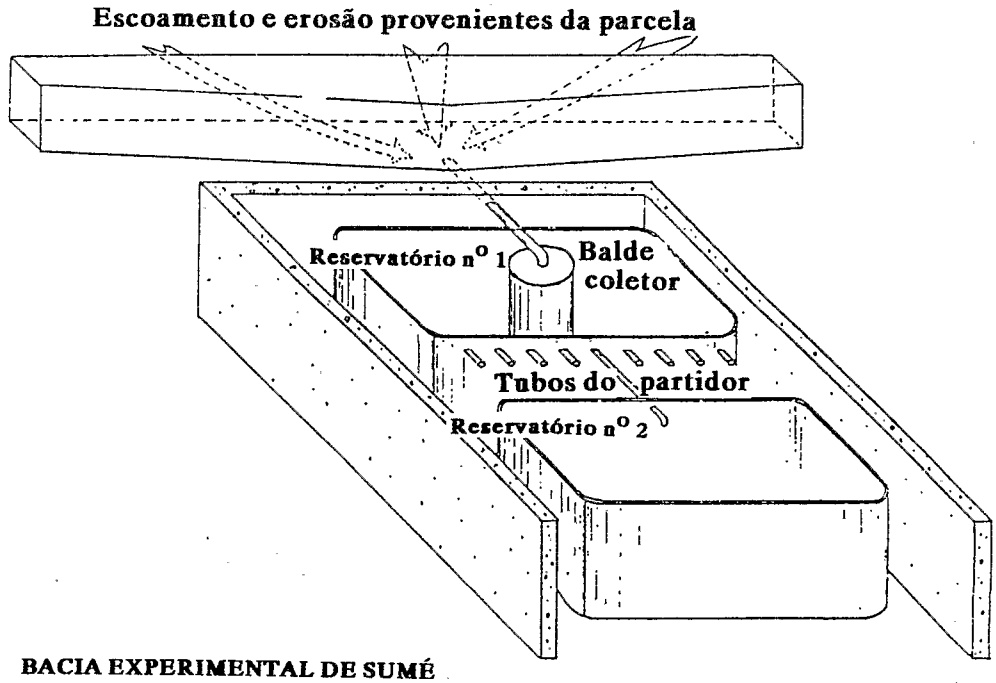


Figura 3.2.8: Reservatórios coletores das parcelas de WISCHMEIER

3.2.3.3 Ação Temática Programada (ATP) (ORSTOM/CNRS/SUDENE/UFPB)

Medições e análises muito mais precisas dos mecanismos hidrológicos nesse conjunto de "bacias experimentais" foram empreendidas entre 1986 e 1989 no âmbito de uma Ação Temática Programada (A.T.P.), do programa PIREN[6], beneficiando-se de um financiamento CNRS-ORSTOM. O objetivo dessa pesquisa era estudar a "*dinâmica da água e das matérias num ecossistema representativo do Nordeste brasileiro*", como também, "*as condições de extrapolação espacial em escala regional*".

Foram introduzidas novas técnicas de medição, tais como a simulação de chuva, o emprego de tensiômetro e de sondas de neutrons, a fim de realizar campanhas de medição intensivas dos fluxos hídricos e químicos, ao nível do perfil pedológico ou da porção de interflúvio. Essas medições evidenciaram, rapidamente, um certo número de comportamentos hidrodinâmicos inesperados que refletiam uma realidade mais complexa em relação com as previsões dos esquemas iniciais, isso está bem ilustrado na figura 3.2.3. Medições de características hidrodinâmicas dos solos e das variações de carga química da água sobre monolitos e sobre perfis, judiciosamente escolhidas nas toposeqüências, permitiram compreender melhor os funcionamentos hídricos ao nível do interflúvio e de definir, assim, certas condições de transposição espacial dos resultados.

3.2.4 Resultados obtidos no conjunto do dispositivo

Série das lâminas escoadas:

A tabela 3.2.4 resume a série das lâminas escoadas e precipitadas nas diferentes sub-bacias.

Constatamos, mais uma vez, a extrema irregularidade dos escoamentos:

a) **De um ano para outro.** Os escoamentos de um único ano (1985) são comparáveis à soma de todos os outros escoamentos observados no período. Os escoamentos da bacia de Umburana foram nulos em 1980,1983 e 1987. A irregularidade dessa bacia parece ser a mais forte.

b) **De uma bacia para outra.** As lâminas das microbacias 3 e 4 são bem superiores às das outras e sobretudo as das microbacias 1 e 2. As lâminas médias das grandes bacias de UMBURANA e JATOBÁ são comparáveis, mas, em alguns anos, as diferenças são grandes. Essa variabilidade mostra a necessidade de observar longas séries ou de homogeneizar os dados. Uma análise apenas do ano de 1977, levaria por exemplo, a estimar um valor três vezes maior para UMBURANA do que para JATOBÁ; o inverso do que se poderia concluir a partir, unicamente, dos resultados do ano de 1984.

Lembramos finalmente que os dados das três grandes bacias são de qualidade medíocre. Isso é verdadeiro sobretudo para a bacia de Umburana cujo leito não foi estabilizado. Será, então, necessário considerar com uma certa reserva seus resultados.

[6] PIREN - Programe Intégré de Recherche pour le Dévéloppement.

TABELA 3.2.4 Série das lâminas escoadas da bacia de SUMÉ (mm)

ANO	PLUV.	BACIA			PLUV.	MICROBACIA			
		GANGORRA	JATOBA	UMBURANA		MB1	MB2	MB3	MB4
75	907,2	-	68.44						
76	581,1	9.6	11.1	10.5	-	-	-	-	-
77	816,9	68.7	22.3	69.7	-	-	-	-	-
78	716,4	34.8	72.0	57.3	-	-	-	-	-
79	483,7	2.7	13.2	2.9	-	-	-	-	-
80	361,5	0.2	11.7	0.0	-	-	-	-	-
81	598,0	80.9	121.5	125.6	-	-	-	-	-
82	377,9	2.2	13.1	17.0	307,7	0.8	0.8	21.0	15.7
83	328,0	0.6	2.1	0.0	247,8	0.0	0.0	2.1	0.5
84	764,8	32.4	122.5	76.7	714,3	5.1	18.2	89.2	42.1
85	1383,4	259.8	351.7	398.1	1438,2	67.9	211.0	468.9	383.7
86	1049,8	81.1	95.7	168.3	994,9	31.8	59.8	301.6	270.6
87	454,2	1.6	2.0	0.0	407,2	0.1	0.1	84.5	52.1
88	628,5	3.9	4.8	28.7	761,9	0.6	2.1	273.5	247.0
Méd 75/88	675,1	41,3	65,2	68,2					
Méd 82/88	712,4	54,5	84,5	98,4	696,0	15,2	41,7	177,3	144,5
L_{600}		31,4	37,0	36,0		6,7	12,7	66 à 195	66 à 163

Características das cheias

A tabela 3.2.5 resume as características das cheias das três sub-bacias equipadas com limnígrafos, retomando as convenções utilizadas para a bacia de TAUÁ

TABELA 3.2.5 Características das cheias da bacia de SUMÉ

Bacia	Superfície (Km^2)	HIDROGRAMA UNITÁRIO Tempo de subida	Tempo de base	Descarga máxima para Ls=1mm	X_{10} (mm)	K_X (méd)	Q_{10} (m^3/s)
Gangorra	137	2h30	8h	15,0	19	6,37	121,0
Jatobá	26,8	1h40	5h30	3,0	26	2,22	58,0
Umburana	10,7	1h10	5h	1,6	32	0,81	26,0

Lâminas escoadas características

A tabela 3.2.6 mostra as variações das diferentes lâminas escoadas características.

TABELA 3.2.6 Lâminas escoadas características da bacia de SUMÉ(mm)

	E S C O A M E N T O S								
BACIA	L_{600}	DECEN. UMIDO LA01	TRIEN. UMIDO LA033	MEDIANA LA05	TRIEN. SECO LA067	DECEN. SECO LA09	L(3AC)	CHEIA DECEN. X_{10}	COEF. ESC.MEDIO (%)
Gangorra (137 km_2)	31	74	34	19	8	(1)	17	19	5.2
Jatobá (26,8 km_2)	37	88	40	23	10	(2)	19	26	6,0
Umburana (10,7 km_2)	36	102	46	26	11	(3)	21	32	6,0
MICROBACIA COM CAATINGA:									
Microbacia 1	6,7	19	6	2,4	0	0	0,8	12	1,1
Microbacia 2	12,7	36	6	2,1	0	0	0,4	25	2,1
Média Microbacias 1 e 2	9,7	28	6	2,3	0	0	0,6	19	1,6
MICROBACIA SEM VEGETAÇAO:									
Microbacia 3 período 1982-84	66	148	80	52	26	6	49	45	11,0
Microbacia 4 período 1982-84	66	158	81	48	22	4	47	46	11,0
Média micros 3 e 4,período 82-84	66	153	81	50	24	5	48	46	11,0
Microbacia 3 período 1984-86	114	220	139	102	62	24	126	57	19,0
Microbacia 4 período 1984-86	80	171	95	65	35	12	63	51	13,0
Média micros 3 e 4,período 84-86	97	196	117	84	49	18	95	54	16,0
Microbacia 3 período 1987-88	195	326	233	179	145	85	322	62	33,0
Microbacia 4 período 1987-88	163	294	199	148	109	53	232	60	27,0
Média micros 3 e 4,período 87-88	179	310	216	164	127	69	277	61	30,0

3.2.5 Conclusões: os resultados obtidos da bacia de Sumé

As variações das lâminas escoadas da tabela 3.2.6 são muito instrutivas e permitem conceber certo número de hipóteses e conclusões novas quanto à quantificação da influência da cobertura vegetal sobre os escoamentos. Trata-se de uma informação nova e inédita no Nordeste que constitui, sem dúvida, a contribuição de maior relevância trazida pela bacia de SUMé para a hidrologia desta região. Obtem-se assim, alguns elementos de respostas objetivas às questões muito atuais das consequências hidrológicas provocadas pela ação do homem.

3.2.5.1 Variações das lâminas escoadas em função da vegetação

A influência da vegetação e da erosão do solo sobre os escoamentos, resumida na tabela 3.2.7, parece-nos bastante significativa:

Tabela 3.2.7 Evolução dos escoamentos em função do solo e da cobertura vegetal da bacia de SUMÉ

Período	Solo e cobertura vegetal	L_{600} média	Erro PROVÁVEL
1982-89 Microbacias 1 e 2	Caatinga muito bem conservada	9,7 mm	60% ou 6 mm
1982-83 Microbacias 3 e 4 fase 1	Desnudada, cultivada em curva de nível deixando o solo abater-se; fraco crescimento da vegetação, porque estes anos são deficitários.	66 mm	30% ou 20 mm
1984-86 Microbacias 3 e 4 fase 2	Os sulcos desaparecem; arranca-se todos os novos brotos de vegetação	97 mm	30% ou 25 mm
1987-88 Microbacias 3 e 4 fase 3	Os sulcos desapareceram os horizontes superiores do solo foram cortados, o horizonte (B) argiloso e as pedras afloram. Os escoamentos aumentam consideravelmente.	179 mm	20% ou 35 mm

Constata-se que a eliminação da caatinga provoca, desde o primeiro ano, o aparecimento de um fator multiplicativo de 6 a 7, nos escoamentos anuais.

Depois de alguns anos, quando os primeiros decímetros do solo forem erodidos, os escoamentos anuais serão novamente multiplicados por 3, o que corresponde a um **acréscimo total por um fator 20**, em relação ao escoamento da bacia original, protegida por sua cobertura de caatinga.

3.2.5.2 Variações dos escoamentos entre microbacias semelhantes

Constatamos, primeiramente, que as variações de lâminas escoadas são importantes dentro de cada par de bacias chamadas "gêmeas", cujas coberturas vegetais foram "conduzidas" de maneira idêntica e para as quais poder-se-ia esperar diferenças menores. Assim sendo, as lâminas escoadas, duplicam praticamente entre as duas microbacias gêmeas 1 e 2 cobertas com caatinga natural.

Chega-se pois à conclusão de que a eliminação da caatinga provoca, desde o primeiro ano, um aumento de 6 a 7 vezes nos escoamentos médios anuais.

Essas diferenças são ainda da ordem de 20 a 30% nas bacias desmatadas contíguas que apresentam escoamentos bem superiores.

Esses desvios mostram que grandes diferenças podem aparecer entre duas pequenas bacias aparentemente semelhantes e lembram a complexidade das toposeqüências evidenciadas pelo estudo da ATP-PIREN. Isso deve levar a uma grande cautela quanto à validade da transposição dos resultados numéricos e à precisão das extrapolações. Estamos, com efeito, na impossibilidade prática de estimar seriamente o intervalo de confiança desses resultados, visto que, infelizmente, só possuímos amostras de dois elementos para cada tipo de bacia estudada. Lembramos que o aumento dessa amostra é dispendioso e requer anos de observações de campo.

3.2.5.3 Lâminas escoadas nas Bacias Representativas

A análise das diferenças de comportamento hidrológico das bacias de UMBURANA e de JATOBÁ sugere muitas hipóteses.

A lâmina escoada L_{600} da **bacia de UMBURANA** é de 3,6 mm. A análise das séries de lâminas escoadas mostram uma forte irregularidade. Duas características dessa bacia poderiam explicar esse fato:

- Grande parte da bacia de UMBURANA é composta de solos Brunos não Cálcicos **Vérticos**, com uma cobertura vegetal formada de caatinga bem conservada e, portanto, semelhante às microbacias 1 e 2, com, eventualmente, alguma zona cultivada.

- Os fundos dos vales dessa bacia estão cobertos por depósitos aluvionais importantes, representando 7% da superfície total da bacia e beirando os principais rios. Essas zonas devem interceptar uma fração importante dos escoamentos vindos das encostas, sobretudo no início da estação chuvosa e durante os anos de seca. Isso, certamente, deve diminuir os escoamentos médios, mas, também, acentuar a irregularidade do regime dessa bacia, (com um coeficiente de X_{10}/L_{600} = 0,9, por exemplo).

Na nossa opinião, a fraqueza e a irregularidade dos escoamentos de UMBURANA podem, perfeitamente, ser explicadas por essas considerações, as quais mostram porque UMBURANA apresenta, ao mesmo tempo, escoamentos fracos e irregulares, e, por outro lado, cheias devastadoras.

A bacia de JATOBÁ apresenta escoamentos comparáveis aos de UMBURANA (L_{600} = 37 mm) mas de maior regularidade (X_{10}/L_{600} = 0,37). Nenhum ano foi totalmente desprovido de escoamento.

Esta bacia, se bem que coberta em 74% por solos Podzólicos relativamente espessos, arrenosos e permeáveis, com uma rede hidrográfica muito pouco densa, contém afloramentos rochosos notáveis (6% da bacia). Além disso, as zonas aluviais da bacia de JATOBÁ são muito menos importantes do que as de UMBURANA.

Parece, portanto, que são algumas zonas montanhosas cobertas de rochas e a fraqueza das zonas aluviais, dessa bacia, que lhe asseguram escoamentos superiores aos de UMBURANA e, sobretudo, maior regularidade.

Quanto à **bacia de GANGORRA** (137 km^2, L_{600} = 31 mm, X_{10}/L_{600} = 0,6), pode-se estimar que é composta de dois terços ou três quartos de bacias semelhantes à de UMBURANA, o restante aproximando-se de JATOBÁ. Os valores das lâminas escoadas calculadas refletem, plenamente, estas proporções.

A análise dos escoamentos recebidos pelo grande açude Sumé, situado a jusante, infelizmente não pôde ser efetuada.

3.3 A BACIA REPRESENTATIVA DO RIACHO DO NAVIO

A bacia do Riacho do Navio é a mais antiga das BHR instaladas. A interpretação dos resultados desta bacia é delicada em virtude de sua grande extensão e de sua complexidade. Constatou-se que as zonas cobertas de Regossolos não produzem muito escoamento. Concluiu-se, também, que era necessário observar bacias menores e mais homogêneas. Os termos do balanço do açude CONCEIÇÃO foram analisados durante um longo período. A análise do funcionamento deste açude permitiu propor uma fórmula de cálculo da evaporação dos açudes a partir da evaporação medida em tanque.



3.3.1 Histórico e descrição da bacia

Implantada e operada pela SUDENE, a rede hidropluviométrica da Bacia Representativa do RIACHO DO NAVIO funcionou entre julho de 1970 e setembro de 1977.

Das cinco bacias operadas, três forneceram dados cuja qualidade permitiu uma interpretação: SALOBRO (15,6 km^2), OSCAR BARROS (45 km^2) e MATRIZ (468 km^2).

Instalada antes da planificação realizada por NOUVELOT (1974), a BHR do RIACHO DO NAVIO encontra-se na zona homogênea H_2, P_1, R_5, A_{1-2}, cujas características são:

H_2: Precipitação anual entree 400 e 600 mm.
P_1: Sub-solo impermeável.
R_5: Relevo bastante forte.
A_{1-2}: Altitude inferior a 800 m.

Esta bacia foi objeto de um relatório pedológico (GOMES e SANTOS, 1977), de um relatório hidrológico de síntese preliminar (NOUVELOT e FERREIRA, 1977) e de um relatório hidrológico final (NOUVELOT *et al*, 1979). A primeira síntese e a modelização dos dados desta bacia foram efetuadas por CAMPELLO (1979). Retiramos destes dois últimos trabalhos, uma grande parte das informações apresentadas.

■ Clima, pluviometria

Situada na parte mais baixa e mais árida do Sertão do PAJEU, no centro do Estado de Pernambuco, a mais ou menos 300 km da costa atlântica, a bacia do RIACHO DO NAVIO caracteriza-se por uma pluviometria fraca e irregular. A média interanual varia entre 500 e 550 mm, sendo a bacia de SALOBRO, situada mais ao Norte, a mais chuvosa. Os coeficientes de variação da distribuição dos totais anuais aproximam-se de 0,40; os valores decenais secos e úmidos sendo, respectivamente, de 300 e de 850 mm.

Nessa região do Sertão Norte, a maior parte das precipitações cai entre os meses de janeiro e maio, sendo o mês de março o mais abundante.

A análise das séries das intensidades de diversas durações mostram que esta região se situa na média do Sertão Norte, com, por exemplo, totais entre 24 h de frequência anual de 59 mm, decenal de 103 mm, intensidades decenais de 63 mm/h em 1 hora e de 122 mm/h em 10 minutos.

As variações da temperatura são fracas. A média anual situa-se em torno de 25 °C, com uma máxima em novembro e uma mínima em agosto. A média mensal das máximas varia entre 35 e 28°C e a das mínimas entre 17 e 21°.

A umidade do ar atinge sua máxima no fim do período das chuvas, em abril-maio, e sua mínima em setembro. Os ventos são geralmente fracos, com direção preponderante Sul-Este.

A insolação média varia entre 6 hs por dia em junho-julho e 9 hs em outubro.

A evaporação medida em tanque classe A atinge sua máxima em outubro-novembro (9 a 10 mm por dia), porém fica inferior a 6 mm por dia em maio-junho. Os totais anuais evaporados variam entre 2500 e 3000 mm.

■ Geologia, solos e vegetação

Esta bacia situa-se sobre embasamento cristalino pré-cambriano e, infelizmente, está desprovida de aquíferos generalizados.

Na sua parte ocidental e na pequena bacia de SALOBRO encontram-se, sobretudo, migmatitos, micaxistos e paragnaisses que geram Regossolos Eutróficos pouco espessos. No resto da bacia encontra-se, quase sempre, granito intrusivo que favorece o desenvolvimento de solos Litólicos, Regossolos profundos e Planossolos.

A tabela 3.3.1 indica as velocidades da infiltração da água após seis horas, medida pelo método de MUNTZ. Cada valor corresponde à média de três ensaios realizados nos locais que foram plotados na figura 3.3.3 (Fonte: Leprun *et al*, 1983).

TABELA 3.3.1: Resultados dos testes de permeabilidade da bacia do Riacho do Navio *Método de Muntz*

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO APÓS 6 HORAS (mm/h)
RN 01	Litólico eutrófico com A fraco	86
RN 02	Regossolo indiscriminado	86
RN 03	Regossolo eutrófico	101
RN 04	Regossolo eutrófico profundo	145
RN 05	Regossolo eutrófico pouco espesso	35
RN 06	Litólico profundo	173
RN 07	Planossolo solodizado	73
RN 08	Planossolo solodizado	72
RN 10	Bruno não cálcico	28
RN 11	Litólico indiscriminado	106

A distribuição complexa dos solos e das coberturas vegetais obedece ao esquema da Tabela 3.3.2 adaptada de Leprun *et al* (1983).

TABELA 3.3.2 Principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação. Esquema das ligações entre subsolo, solo e vegetação da bacia do RIACHO DO NAVIO

FORMAÇÃO GEOLÓGICA	**Diversos**	**Granito intrusivo**	**Migmatitos\Micaxistos ou Paragnaisse**		
Solo	Afloramento de rocha + solos Litólicos	Litólico + Bruno não Cálcico	Planossolo* (forte capacidade de retenção)	Regossolo espesso	Regossolo pouco espesso ou Bruno não Cálcico
Ocupação cobertura vegetal	Pouco cultivados Caatinga densa	Pouco cultivados Caatinga densa	Pouco cultivados grandes árvores-dispersas	Geralmente cultivados	Pouco cultivados Caatinga densa
Permeabilidade do solo (mm/h)	0 afloramento 80-120 Litólico	80-120 Litólico 20-40 Bruno n.Cálc.	70-100	90-150	25-40
% por sub-bacia					
OSCAR BARROS	38%	17%	0%*	39%	6%
SALOBRO	55%	0%	0%	38%	7%

* Os Planossolos só existem na bacia de MATRIZ.

A densidade da população é fraca. Portanto, esta bacia, em geral, é pouco cultivada a não ser nas zonas cobertas de Regossolos espessos, de Planossolos ou de aluviões. No resto da bacia, a caatinga é, na sua maior parte, densa e pouco degradada.

Figura 3.3.1: Esboço geológico da bacia do RIACHO DO NAVIO

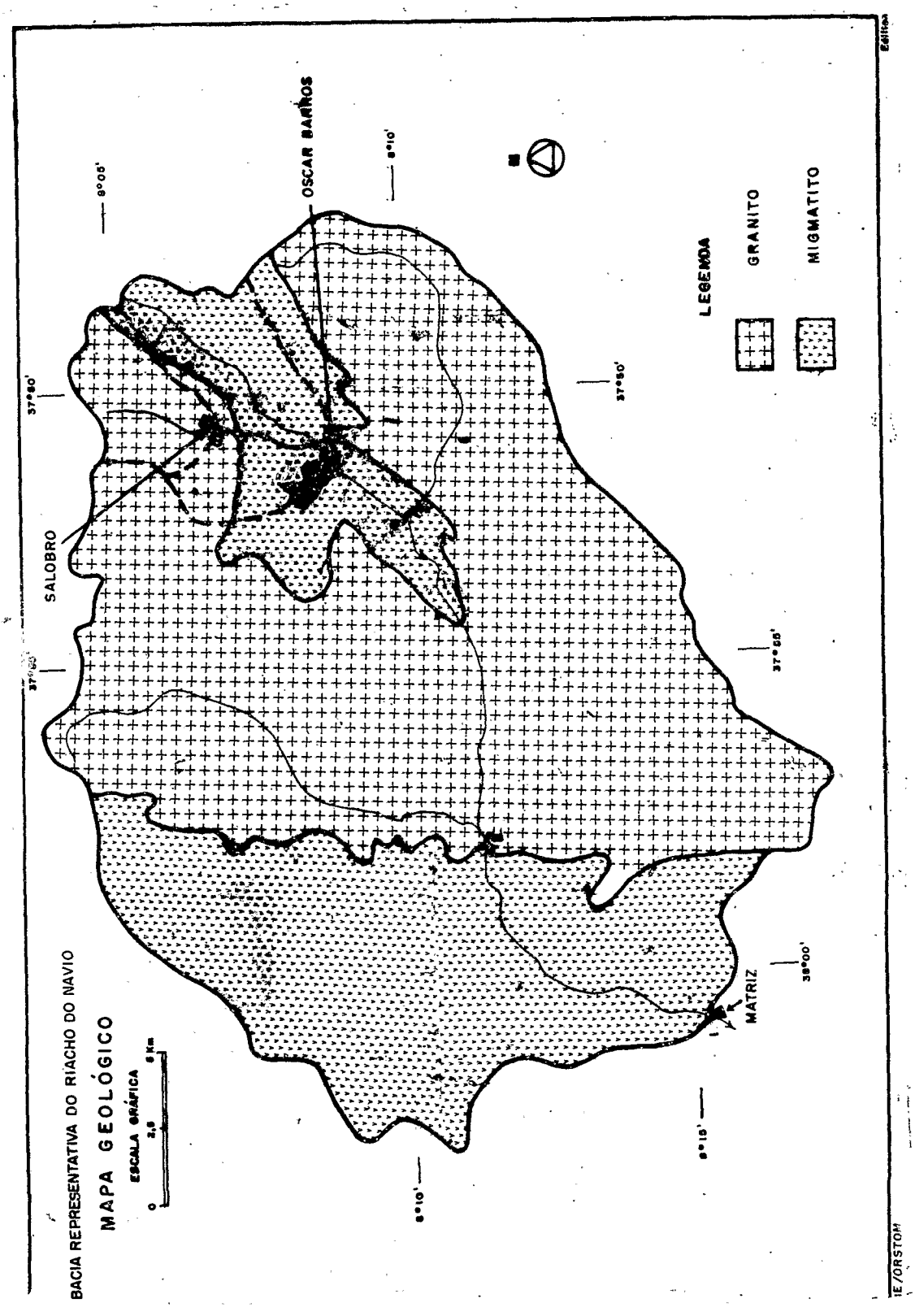


Figura 3.3.2: Esboço pedológico da bacia do RIACHO DO NAVIO

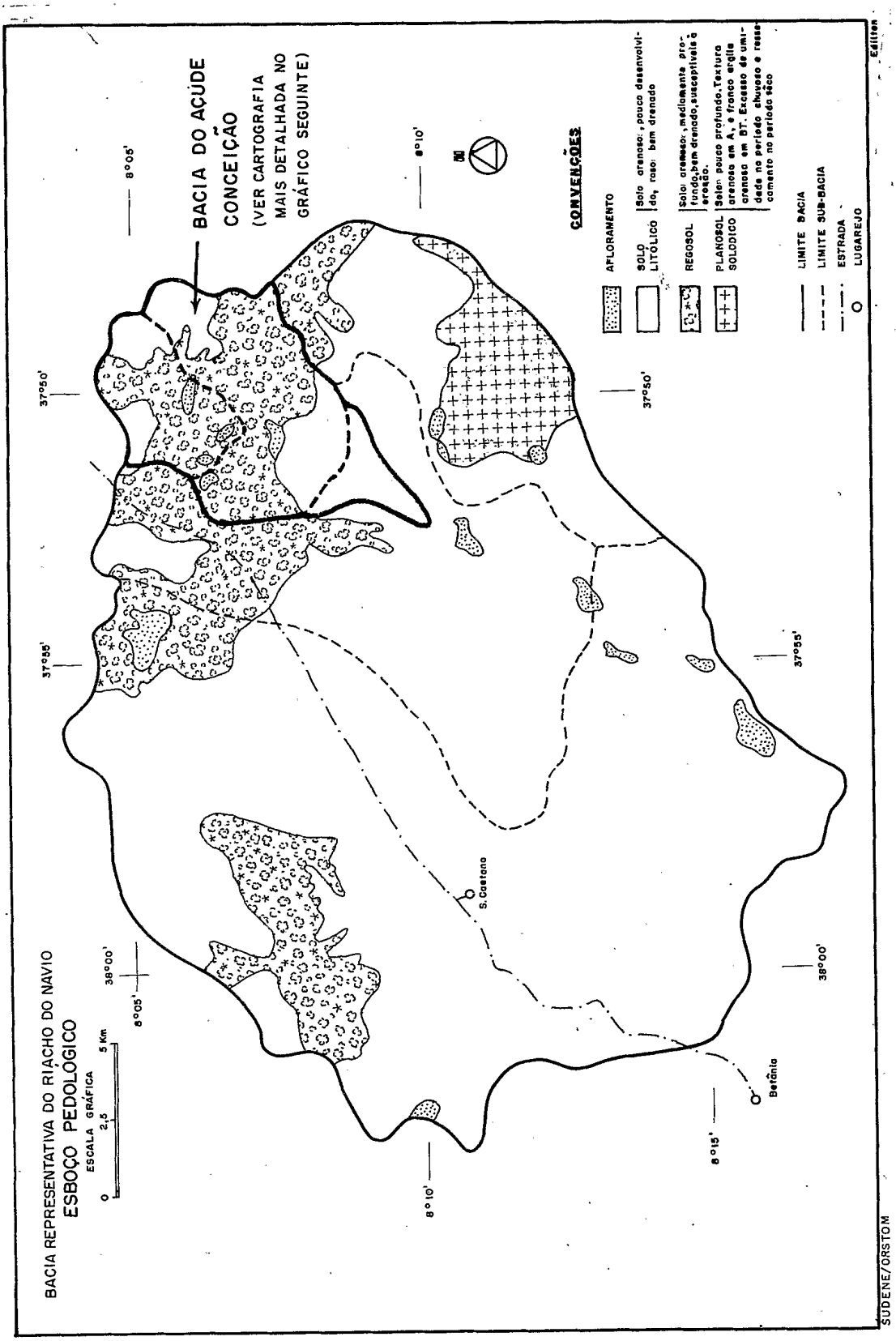
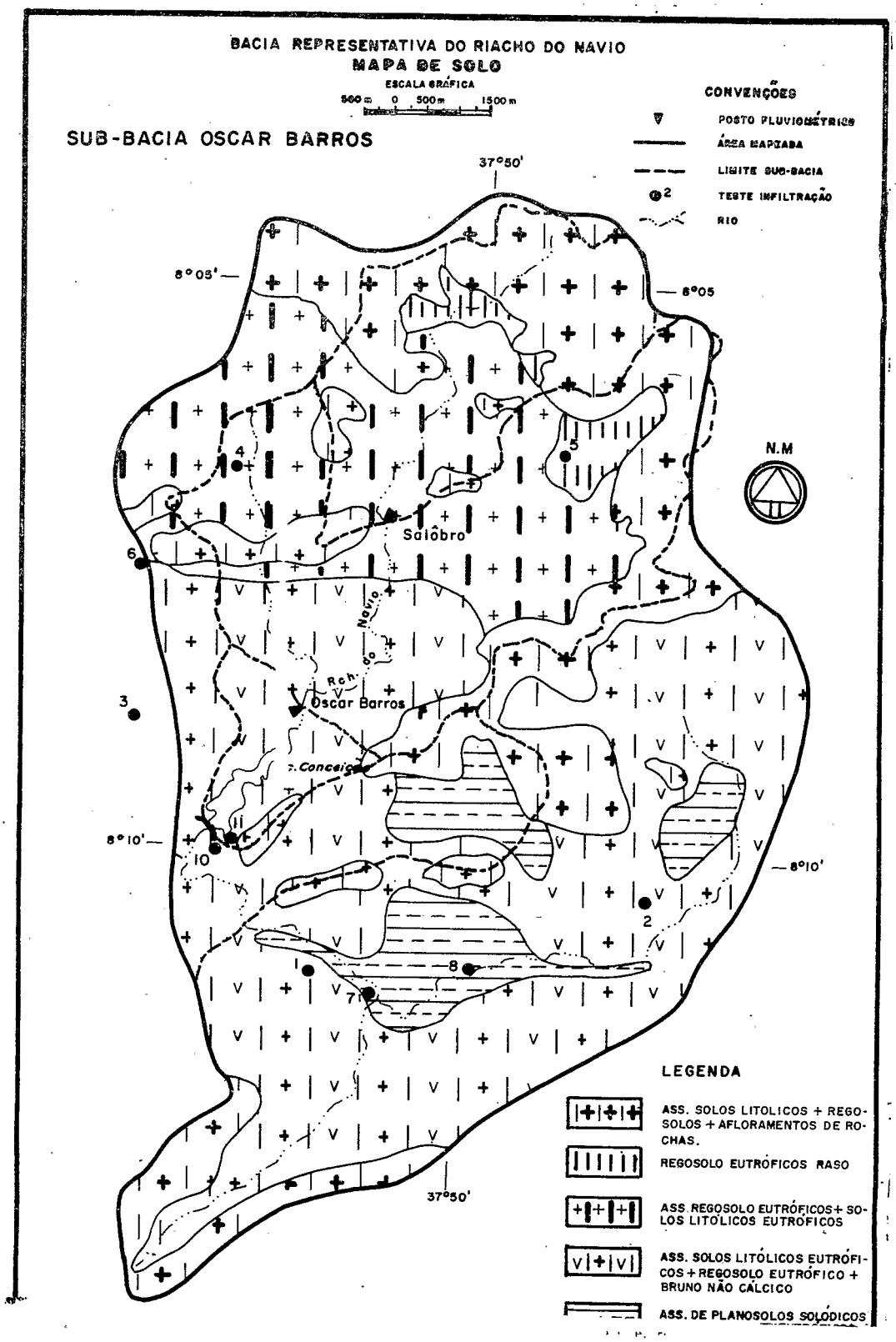


Figura 3.3.3: Mapa dos solos da parte oriental da bacia do RIACHO DO NAVIO



■ Morfologia: relevo, forma das bacias e rede de drenagem

A tabela 3.3.3, a seguir, resume as características morfológicas das três bacias e sub-bacias estudadas:

TABELA 3.3.3 Características morfométricas das bacias de RIACHO DO NAVIO

CARACTERES MORFOMETRICOS	MATRIZ	SALOBRO	O. BARROS
Tamanho e forma:			
.Superfície(km^2)	468	15,6	45,2
.Perímetro (km)	90	18	29,5
.Indice de compacidade C	1,2	1,3	1,2
Declive e relevo:			
.Classe de relevo	$R_{4/5}$	$R_{4/5}$	$R_{4/5}$
.Altitude média (m)	530	600	580
.Indice global de inclinaçao (m/km)	9	7	17
.Desnível específico (m)	200	110	125
Rede de drenagem:			
.Densidade de drenagem (km/km^2)	1,4	1,7	1,4
.Relaçao de comprimento Rl	2,0	1,2	1,7
.Relaçao de confluência Rc	3,9	3,3	3,6

■ Densidade de açudes

Como nas regiões vizinhas, a densidade de açudes nesta bacia é relativamente baixa, provável conseqüência de sua pequena população.

Não existe nenhum açude no interior das Bacias de SALOBRO e de OSCAR BARROS.

Na Bacia principal de MATRIZ encontram-se seis açudes. Eles controlam uma superfície de 120 km^2, ou seja, mais de 25% da superfície total da bacia.

A bacia de alimentação do açude CONCEIÇÃO (49 km2) é, praticamente, controlada totalmente pela estação de OSCAR BARROS (45,2 km2). Um estudo detalhado do comportamento desse açude e a avaliação dos diferentes termos do seu balanço hídrico permitiram, por exemplo, melhorar a avaliação dos coeficientes que intervêm no cálculo da evaporação, a partir das observações realizadas em tanque de classe A. Esses dados foram utilizados por POUYAUD (1985), para comparar os comportamentos evaporimétricos dos lagos das regiões semi-áridas africanas e brasileiras.

▪ Comparação com as outras bacias estudadas sobre embasamento cristalino

Confrontando-se o conjunto da bacia do Riacho do Navio aos dois outros grandes conjuntos de bacias de SUMÉ e de TAUÁ[1], ambos situados sobre embasamento cristalino entre as isoietas de 500 e 600 mm, podemos assinalar as seguintes diferenças:

As classes de relevo e os desníveis específicos da bacia do RIACHO DO NAVIO são superiores aos de SUMÉ e, sobretudo, aos de TAUÁ. Um exame mais atento desse problema mostra-nos que as declividades médias dos solos dessas diferentes bacias são, na realidade, comparáveis entre si e que é preciso, talvez, buscar a explicação das diferenças desses índices nas variações da "*amplitude do relevo*" que esses índices representam.

Encontra-se na bacia do RIACHO DO NAVIO um tipo de solo que, praticamente, não existe nas bacias de TAUÁ e SUMÉ: Regossolos.

Por outro lado, existem poucos solos Brunos Não Cálcicos, conquanto esses solos pareçam onipresentes nas duas outras bacias.

Infelizmente, na bacia do RIACHO DO NAVIO, não foi possível estudar pequenas ou micro-bacias, nem parcelas, nem pequenos açudes, como aconteceu com SUMÉ e TAUÁ. Ficou demonstrado que um monitoramento de pequenas bacias pode ser muito instrutivo e necessário para explicar os fenômenos, mas esse tipo de estudo só teve início no princípio dos anos 80, muito depois da desativação da bacia do RIACHO DO NAVIO.

3.3.2 Rede de monitoramento instalada

A figura 3.3.4 dá uma idéia da rede hidropluviométrica dessa bacia, a qual funcionou de julho de 1970 a setembro de 1977, com: 44 pluviômetros, 5 estações limnigráficas, 4 estações limnimétricas de barragem e 7 pluviógrafos.
A superfície média controlada por estes instrumentos varia entre 11 km^2 por pluviômetro e 67 km^2 por pluviógrafo, para a maior bacia de MATRIZ, e 1,3 km^2 por pluviômetro e 16 km^2 por pluviógrafo para a menor, de SALOBRO.

Duas estações meteorológicas foram instaladas: uma em BETÂNIA perto do escritório da bacia e outra perto do açude CONCEIÇÃO, já citado.

A qualidade das observações pluviométricas, pluviográficas, limnimétricas e da calibragem das estações hidrométricas é, em geral, boa. Deve-se isso, sobretudo, ao grande esforço logístico efetuado pela SUDENE que manteve uma presença quase permanente de técnicos, no campo, durante a estação chuvosa por um período de 7 anos.

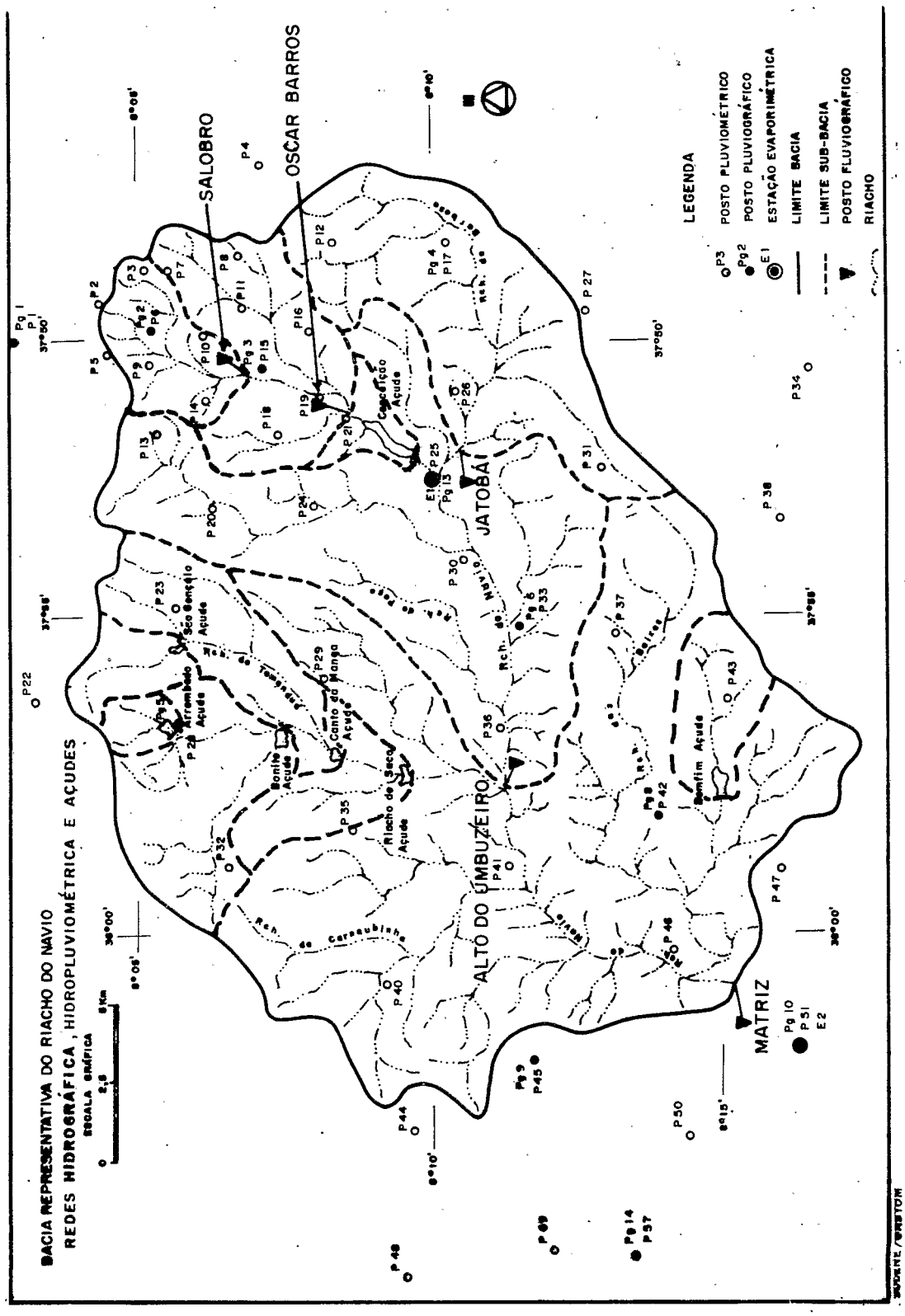
[1] Não compararemos a Bacia do RIACHO DO NAVIO à bacia de JUATAMA a qual representa uma região cristalina com forte relevo e com muitos afloramentos, beneficiando-se de uma pluviometria maior, visivelmente muito diferente dos três primeiros conjuntos.

Verificou-se que somente as estações hidrométricas providas de seção de contrôle de alvenaria (SALOBRO, OSCAR BARROS E MATRIZ) permitiram uma análise contínua de suas informações, graças à estabilidade de sua calibragem.

O funcionamento dos limnígrafos situados longe dos leitos e conectados aos rios por canos ou "tubos comunicantes" não foi perfeito. O intenso transporte de carga sólida existente nesses rios provocou entupimentos freqüentes. Uma parte dos registros de OSCAR BARROS e de SALOBRO, infelizmente, são suspeitos ou devem ser rejeitados por essas razões.

A técnica da construção de largas soleiras, em cimento, com nível de alguns decímetros mais alto em relação ao perfil natural do leito, mas com limnígrafos em comunicação direta com o rio foi utilizada, posteriormente, com sucesso nas outras bacias representativas do Nordeste.

Figura 3.3.4: Rede hidropluviométrica da bacia do RIACHO DO NAVIO



3.3.3 Resultados obtidos

■ Série das lâminas observadas

A tabela 3.3.4 apresenta os totais anuais das lâminas precipitadas e escoadas.

TABELA 3.3.4: Série das lâminas precipitados e escoadas da bacia do RIACHO DO NAVIO, em mm.

ANO	Frequência estimada da pluviometria	MATRIZ		OSCAR BARROS		SALOBRO	
		Prec.	Escoa.	Prec.	Escoa.	Prec.	Escoa.
1970-71	0,50	585	7,86	515	1,21	507	3,51
1971-72	0,45	562	4,28	598	3,39	624	11,2
1972-73	0,45	571	2,85	579	0,48	609	5,10
1973-74	(0,05)	1042	119,0	1058	104,0	1079	149,0
1974-75	(0,07)	945	15,9	1056	29,2	1086	67,2
1975-76	0,55	502	7,22	491	6,4	519	16,6
1976-77	0,20	819	13,0	767	3,33	840	24,8
Média	-	718	24,3	732	21,1	752	39,6
L_{600}	-	-	35,0	-	31,0	-	47,0

*** Série das precipitações**

Constata-se que nenhum dos sete totais pluviométricos anuais é realmente deficitário.
Os anos de 1971, 1972, 1973 e 1976 estão próximos da mediana. O ano de 1977 tem um período de retorno quinquenal úmido e os anos de 1974 e 1975 são excepcionalmente abundantes, com um período de retorno da ordem de 20 anos.

A média das precipitações no período de 1971 a 1977 é de 720 mm. É superior em 31% ao da média interanual, que foi estimada em 550 mm nesta bacia.

*** Série das lâminas escoadas**

A série das lâminas escoadas é, evidentemente, muito mais irregular. Constata-se que 60 a 70% do volume total escoado, durante sete anos, aconteceram unicamente durante o ano de 1974, 80 a 85% desse volume ocorreram durante os dois anos de 1974 e 1975. Se não tivesse sido observado o ano de 1974, as médias das lâminas escoadas observadas do período diminuiriam em 60%.
Uma comparação dos dois anos, 1974 e 1975, cujos totais pluviométricos anuais são semelhantes, constata que os escoamentos de 1975 só representam um terço daqueles do ano de 1974. Deve-se isso a uma melhor repartição estacional das precipitações em 1975 do que em 1974.

*** Irregularidade dos escoamentos. Necessidade de técnicas de modelização**

Chegou-se à conclusão de que, em média, 50% do volume anual são escoados em menos de 15 dias consecutivos e que os rios estão completamente secos durante mais da metade do ano.

Tudo isso mostra que é ilusório querer estimar diretamente as distribuições dos escoamentos sem recorrer a técnicas de correção e de homogeneização de dados, tais como a **modelização**.

Os modelos escolhidos devem funcionar com pequenos intervalos de tempo, pois os intervalos de tempo anuais e mensais não são suficientes, como pudemos observar na comparação feita dos anos de 1974 e 1975.

Pode-se, pois, dizer que, de fato, a pluviometria do período de 1971-1977 é, **superior em 30%** à "*média de longa duração*", enquanto que os escoamentos desse mesmo período são **inferiores em 30%** às estimativas da média de longa duração dos escoamentos!

A figura 3.3.5 ilustra bem a dispersão da relação chuva anual x escoamento anual. Calculamos que, com a supressão do ano de 1974 , a pluviometria seria, ainda assim, superior em 25% à média de longa duração, enquanto que os escoamentos **seriam inferiores** à média, em 70% !

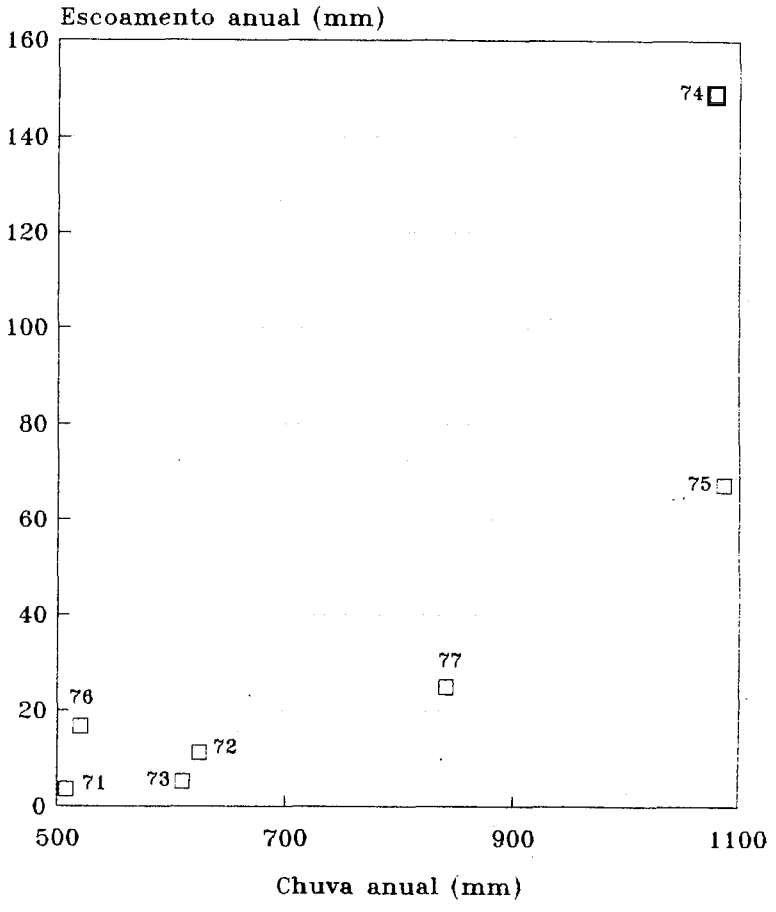


Figura 3.3.5: Dispersão da relação entre as chuvas e os escoamentos anuais.

▪ Características das cheias

A tabela 3.3.5 resume as características das cheias unitárias das três bacias estudadas, seguindo as convenções expostas para a bacia de Tauá.

TABELA 3.3.5: Características das cheias da bacia de RIACHO DO NAVIO

BACIA	SUPERFÍCIE	HIDROGRAMA UNITÁRIO TEMPO DE SUBIDA	TEMPO DE BASE	DESCARGA MÁXIMA PARA L_S=1 mm	Qmax / Qmed.	X_{10} mm	K_X med.	Q_{10} m³/s
Matriz	468 km²	4 h	13 h	26,7m³/s	2,65	12,0	19,7	236,0
O.Barros	45,2 km²	1 h	9 h	5,5m³/s	3,9	25,0	3,55	89,0
Salobro	15,6 km²	0h 45'	6h 15'	2,55m³/s	3,6	27,0	1,47	40,0

A figura 3.3.6 mostra a relação entre as chuvas, as cheias e o índice de saturação prévio IK. Este tipo de gráfico foi utilizado para o início do ajustamento do Modelo SUDENE/ORSTOM.

Os números na figura representam os valores de IK

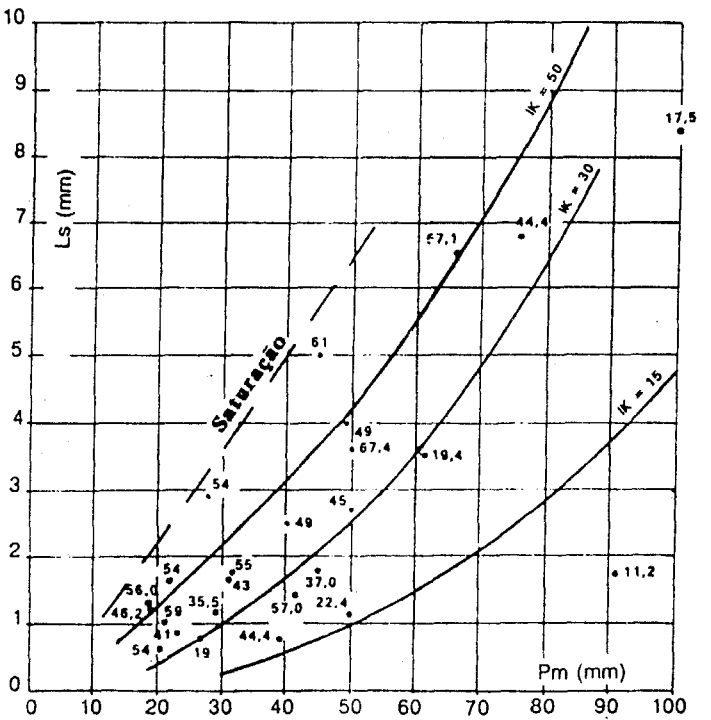


Figura 3.3.6: Relação entre chuva (PM), escoamento das cheias (Ls) e o índice de saturação prévia das cheias(IK).

Lâminas escoadas características.

A tabela 3.3.6 apresenta as lâminas escoadas características de uma forma semelhante às outras bacias (ver as definições na BHR de TAUÁ).

TABELA 3.3.6: Lâminas escoadas características da bacia do RIACHO DO NAVIO

	E S C O A M E N T O S (em mm)								
BACIA	L600 1	DECEN. ÚMIDO LA01	TRIEN. ÚMIDO LA033	MEDIAN. LA05	TRIEN. SECO LA067	DECEN. SECO LA09	L(3AC)	CHEIA DECEN. X_{10}	COEF. ESCOL. MEDIO %
MATRIZ	35	108	43	24	9	3	23	12	5.8
OSCAR BARROS	31	110	30	14	4	1	12	25	5.2
SALOBRO	47	122	56	31	11	2	31	27	8.2
ILHA GRANDE*	20 à 25								4.2

* O posto da rede geral de ILHA GRANDE controla uma bacia de 2.372 km2 a qual engloba a do RIACHO DO NAVIO. Sua lâmina anual média está estimada em 17.8 mm. O valor de 20 a 25 para L600 é obtido depois da correção através da pluviometria. Ela é fraca em comparação com as outras BHR do cristalino e confirma os fracos valores das lâminas das três outras bacias do Riacho do Navio.

3.3.4 Interpretação: resultados obtidos da bacia do Riacho do Navio

O pequeno número e a relativa complexidade dessa bacia (levando em conta sua grande dimensão) impedem que se possa propor, como para TAUÁ, uma classificação ou uma tipologia das bacias da região do RIACHO DO NAVIO, em função de suas características fisiográficas e hidrológicas.

Apresentamos aqui, igualmente, os resultados de dois estudos, que não foram repetidos para outras bacias. Trata-se de uma tentativa de ajustamento de um modelo de simulação mensal e do estudo dos termos do balanço hídrico do açude Conceição durante sete anos, que permitiu propor uma fórmula de cálculo da evaporação do açude a partir da evaporação medida no tanque.

3.3.4.1 Os regimes hidrológicos

■ Escoamentos anuais

São relativamente fracos para uma bacia situada em uma zona cristalina, embora comparáveis aos de SUMÉ, distante 100 km em linha reta e cuja pluviometria é semelhante.
Os coeficientes de escoamento anual médio variam entre 5 e 8%, os coeficientes medianos sendo, de apenas 2 a 5% do total precipitado.
Apesar da fraca densidade de açudes nessas bacias, vários outros fatores podem explicar os fracos escoamentos:

- A boa conservação da cobertura vegetal.
- A porcentagem relativamente elevada de solos espessos e permeáveis, tais como os Regossolos espessos ou os Litólicos espessos que margeiam, muitas vezes, os afloramentos rochosos.

Uma confrontação das lâminas e dos volumes escoados nas duas bacias encaixadas de SALOBRO (L_{600} = 47 mm; S = 15,6 km^2) e OSCAR BARROS (L_{600} = 31 mm; S= 45,2 km^2) sugere que a maior parte dos escoamentos dessas bacias provêm das zonas de afloramentos rochosos, com relevo forte associados a solos Litólicos espessos.

Com efeito, calcula-se, por diferença, que a lâmina L_{600} da bacia intermediária entre SALOBRO e OSCAR BARROS, de superfície S = 45,2 - 15,6 = 29,6 km^2, deve ser somente de 23 mm. Ora, esta bacia intermediária está praticamente desprovida de afloramentos rochosos.
Teria sido interessante estudar, através de pequenas bacias menores, estrategicamente localizadas, os mecanismos que regem os escoamentos dessas diferentes zonas.

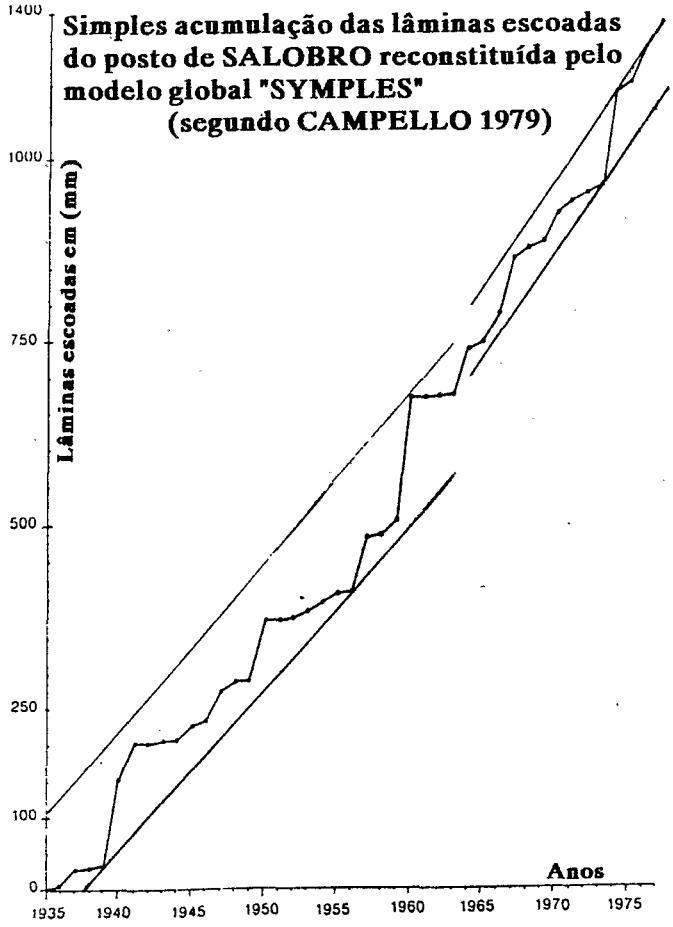


Fig.3.3.7 - Simples acumulação das lâminas escoadas no posto de SALOBRO.

■ Anos secos consecutivos

A figura 3.3.7 representa a simples acumulação das lâminas escoadas na estação de SALOBRO. Este gráfico mostra bem a contribuição excepcional de alguns raros anos e a existência de grupos ou de anos consecutivos deficitários. A regularização dos recursos hídricos, durante esses períodos deficitários, constitui o principal problema a resolver, para garantir a sobrevivência das populações nessa região.

Regularidade relativa dos regimes:

As lâminas das cheias decenais dessas bacias são as mais fracas entre todas as bacias estudadas no cristalino. Variam entre 10 e 30 mm. Isso reforça, ainda mais, a hipótese do **não-escoamento-superficial** de certas partes da bacia, explicando, ao mesmo tempo, os escoamentos anuais pouco elevados e a debilidade das vazões oriundas das fortes cheias.

3.3.4.2 Tentativa de ajustamento de um modelo simplificado utilizando um índice pluviométrico

NOUVELOT *et al* (1979) tentaram ajustar um modelo simplificado que permitisse o cálculo direto das lâminas escoadas anuais, a partir de um índice pluviométrico da forma

$$Ip = \sum_{mês=1}^{12} (Pmensal - 65)$$

Este índice é calculado para cada ano, tendo como base os totais pluviométricos mensais e permite o cálculo direto das lâminas escoadas anuais Le, com a ajuda das seguintes fórmulas:

Para MATRIZ	Ip < 184 mm: $Log_{10}(Le) = 0{,}01204\ Ip - 1{,}322$
	Ip > 184 mm: $Log_{10}(Le) = 0{,}00277\ Ip + 0{,}377$
Para O.BARROS	Ip < 192 mm: $Log_{10}(Le) = 0{,}01655\ Ip - 2{,}415$
	Ip > 192 mm: $Log_{10}(Le) = 0{,}00305\ Ip + 0{,}185$
Para SALOBRO	Ip < 213 mm: $Log_{10}(Le) = 0.00701\ Ip - 0{,}358$
	Ip > 213 mm: $Log_{10}(Le) = 0{,}00274\ Ip + 0{,}457$

Ouando se compara os escoamentos calculados com a ajuda do modelo mensal (na tabela 3.3.7) aos resultados obtidos com modelos diários, utilizados agora, sistematicamente, para todas as bacias, constata-se que, no caso do RIACHO DO NAVIO, as lâminas escoadas são subestimadas por este modelo mensal. Comparamos, igualmente, o ajustamento efetuado por Campello (1979) com o modelo de simulação SYMPLES que funciona também com intervalo diário.

TABELA 3.3.7: Comparação entre as lâminas da bacia do RIACHO DO NAVIO, calculadas pelo modelo simplificado mensal e pelo modelo diário.

Frequência de ultrapassagem	Modelo SUDENE/ORSTOM			Modelo SIMPLES		Modelo MENSAL	
	MATRIZ	SALOBRO	O.BARROS	SALOBRO	O.BARROS	SALOBRO	O.BARROS
0,1	108	122	110	75	54	59	29
0,5	24	31	14	11	5	4,9	1,4
0,9	3	2	1	0,8	0,2	0	0

A comparação dos resultados obtidos através dos três tipos de modelos é um pouco decepcionante. No entanto, a simplicidade do modelo mensal é muito vantajosa.

Poder-se-ia testar novas formas de modelos, a fim de tentar representar de maneira simples os diversos regimes hidrológicos identificados. A elaboração de modelos simplificados, corretamente ajustados, e validados com a ajuda de modelos mais sofisticados deveria ser um dos resultados lógicos deste programa de estudo de pequenas bacias hidrográficas representativas.

3.3.4.3 Funcionamento do açude CONCEIÇÃO.

■ Superdimensionamento do açude CONCEIÇÃO

Este açude quando está cheio, tem uma profundidade de 10 m, um volume de 1.400.000 m^3 (seja, 0,9 vezes o volume médio escoado) e uma superfície máxima de 385.000 m^2.

O volume deste açude equivale ao dobro do volume recomendado por Cadier *et al* (1990) ou Molle (1991c), para um pequeno açude que não assegura uma regularização interanual.

Com uma profundidade relativamente grande para um açude situado em um pequeno rio, poder-se-ia pensar que isto lhe permite desempenhar, parcialmente, o papel de regularizador no caso de certas secas plurianuais, o que justificaria o seu superdimensionamento.

Tentaremos analisar, dentro dessa perspectiva, as variações de nível desse açude as quais foram registradas durante 20 anos entre 1970 e 1990, muito tempo depois da desativação da bacia. (Ver figura 3.3.9)

■ Perdas por evaporação

Indicamos, primeiramente, algumas ordens de grandeza referentes aos volumes evaporados para diversos níveis de enchimento desse açude:

- O açude CONCEIÇÃO praticamente não é utilizado para a irrigação. O coeficiente de passagem Ka da evaporação em tanque classe A, à evaporação desse açude é, em média, de

0,83[2] (ver figura 3.3.8). Isso mostra que as perdas por infiltração e as amostragens são fracas e provavelmente negligentes diante dos volumes evaporados. Lembramos que a lâmina anual evaporada, medida no tanque classe A, varia entre 2.500 e 3.000 mm.

- Constata-se que, levando em consideração as precipitações diretas sobre a represa, que são em geral superiores a 300 mm por ano, o rebaixamento efetivo médio de um açude, apresentando perdas por infiltração desprezíveis e sendo pouco utilizado, raramente ultrapassa 2 m por ano.

- Quando o açude CONCEIÇÃO está cheio, a evaporação de uma lâmina de água de 2 m corresponde aproximadamente a 600.000 m^3, o que equivale a um volume ligeiramente inferior ao volume escoado mediano (cálculo feito levando-se em conta uma profundidade média de 9 m).

- Quando o açude está quase vazio, a evaporação de uma lâmina de água de 2 m corresponde, aproximativamente, a 100.000 m^3, o que equivale, mais ou menos, ao volume escoado quinquenal seco (cálculo efetuado para uma profundidade média de 3 m).

Isso mostra a importância das perdas por evaporação.

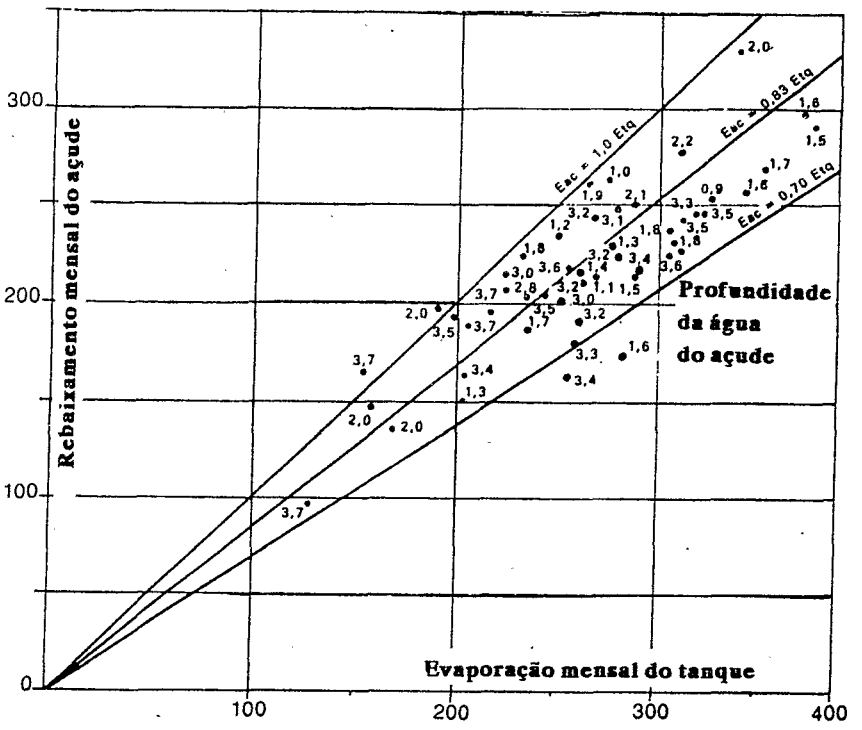


Figura 3.3.8: Rebaixamento do açude CONCEIÇÃO em função da evaporação do "tanque" e da profundidade do açude

[2] Esse valor de Ka=0,83 confirma os coeficientes propostos por GIRARD (1966) e foi precisado e justificado, posteriormente, por MOLLE (1989).

■ Funcionamento do açude

Constatamos na figura 3.3.9 que, durante os anos observados, este açude jamais secou. No entanto, isso quase aconteceu no fim do ano de 1973. É provável que este mesmo açude, se tivesse sido utilizado para irrigação, tivesse secado nos anos 1971, 1972, 1973 e 1982.

Constatamos, igualmente, que durante o período de 1970-90 não se observou nenhum período de mais de três anos consecutivos realmente deficitários.

Uma análise das séries dos escoamentos, reconstituídas por simulação com a pluviometria de BETÂNIA, situada a 25 km do açude CONCEIÇÃO (ver figura 3.3.7), mostra-nos dois períodos críticos durante os quais este açude, provavelmente, teria secado: 1950-1956 e 1941-1946 (nos quais se observam 5 anos deficitários consecutivos com uma lâmina escoada média de 3 mm).

Como conclusão, parece-nos que este açude de 10,5 m de profundidade pode garantir uma utilização volumetricamente importante e assegurar a irrigação de um perímetro inferior a 5 ha durante períodos deficitários **de um ou dois anos secos consecutivos.** Se não for utilizado para irrigação, esse tipo de açude poderá ficar com água e atender a necessidades tais como a alimentação humana e do rebanho **durante três anos secos consecutivos**, porém secará, certamente, se sobrevier uma seca de maior duração, como a que já aconteceu no passado.

Um açude "superdimensionado" como o açude CONCEIÇÃO só sangra a cada três ou quatro anos o que, evidentemente, é muito penalizante para os ribeirinhos situados a jusante.
Este açude poderá reconcentrar os sais dissolvidos na água escoada.

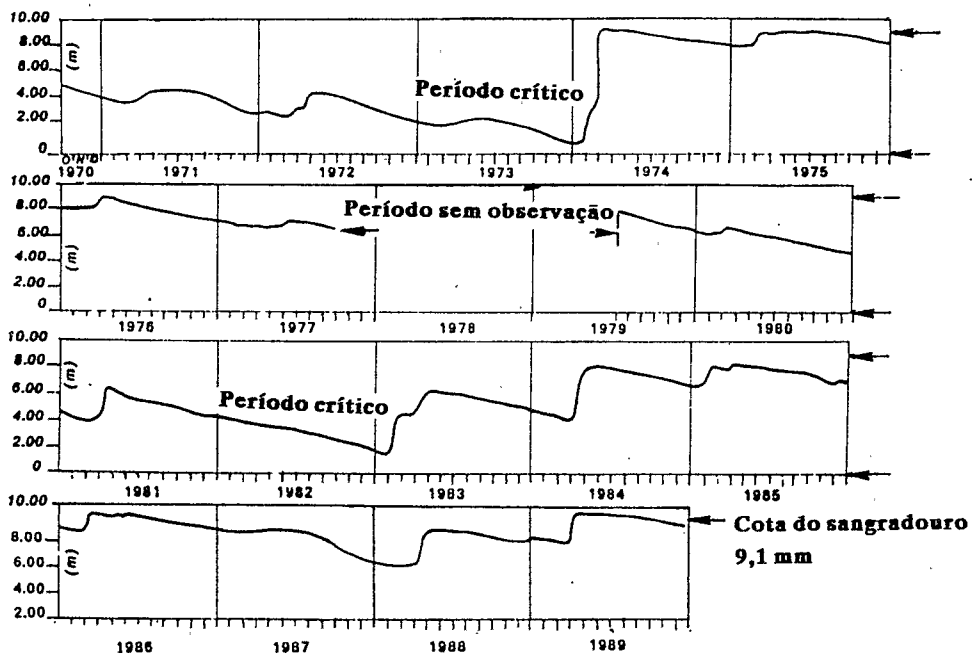


Figura 3.3.9: Variações do nível do açude Conceição

3.3.5 Conclusões dos estudos da Bacia do Riacho do Navio

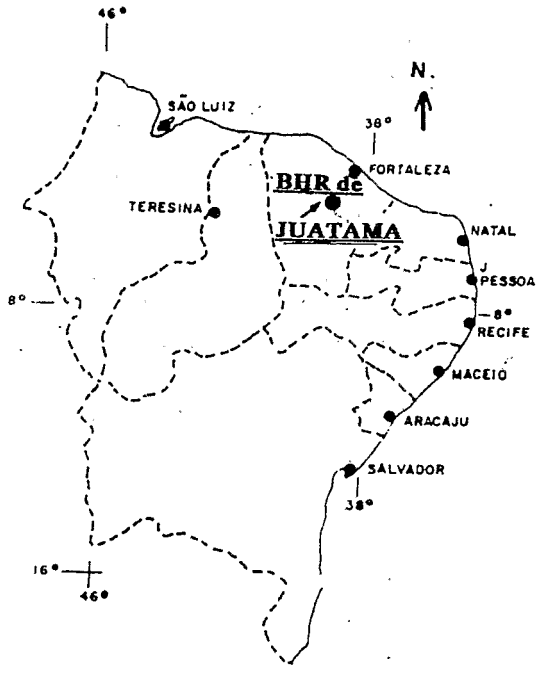
Os escoamentos e as cheias das três bacias que compõem o Riacho do Navio são fracos para as bacias situadas sobre o embasamento cristalino. Esse baixo índice pode, sem dúvida, ser atribuido à grande proporção dessas bacias cobertas de **regossolos** e à boa conservação de sua cobertura vegetal. A diminuição das lâminas escoadas entre as bacias de SALOBRO e OSCAR BARROS, nos sugere que os afloramentos rochosos produzem a maior parte dos escoamentos nessas duas bacias.

A complexidade desses mecanismos e o pequeno número de bacias estudadas nos impedem de ir mais longe na estruturação desse tipo de conclusão.

A análise do balanço do açude CONCEIÇÃO, permitiu por sua vez, propor um coeficiente de passagem entre as evaporações do tanque e do açude, coeficiente confirmado e precisado anteriormente por MOLLE (1991). Vinte anos de observações limnimétricas mostram que este açude de dez metros de profundidade quase chegou a secar duas vezes: em 1973 e em 1983. A bacia desse açude não teve portanto um tamanho suficiente para garantir a alimentação de um perímetro de irrigação com um risco aceitável que permitisse culturas perenes.

3.4 A BACIA REPRESENTATIVA DE JUATAMA

JUATAMA é a única bacia representativa que já tinha sido estudada pelo programa do GEVJ. O seu estudo demonstra que os mecanismos hidrológicos dessas regiões acidentadas e rochosas são complexos. Os antagonismos entre as zonas impermeáveis e as zonas que retêm os escoamentos são muito fortes. Enfim, os escoamentos são, mais fracos do que aqueles que os numerosos inselbergs e afloramentos rochosos dessa região poderiam deixar prever.



3.4.1 Histórico

Situada no centro do Estado do Ceará, perto da cidade de OUIXADÁ, a 800 km de FORTALEZA e a 800 km de RECIFE, a bacia representativa de JUATAMA, que controla uma superfície de 19,2 km^2, foi instalada em 1963, no âmbito dos estudos de valorização do Vale do Jaguaribe (GEVJ). Seu principal objetivo era complementar, rapidamente, as informações disponíveis fornecidas pela rede geral sobre o comportamento hidrológico da parte cristalina do grande vale estudado.

O estudo do funcionamento de pequenas bacias dessa região, onde os pequenos açudes são numerosos, foi empreendido, simultaneamente, com outros estudos similares na região do CARIRI, também no Estado do CEARÁ, mas praticamente desprovida de açudes, permitindo, assim, melhor compreender a influência dos açudes sobre os regimes hidrológicos daquela região.

Duas campanhas foram realizadas nessa época: 1963-64 e 1964-65.

Nove anos depois, no âmbito do programa de estudo de pequenas Bacias Hidrográficas Representativas, da SUDENE, o monitoramento hidrológico da bacia de JUATAMA foi retomado, com uma rede de medição hidropluviométrica praticamente idêntica à do primeiro período, resultando em três novas campanhas de medição: 1974-75, 1975-76 e 1976-77.

Os resultados obtidos na primeira campanha foram resumidos na monografia hidrológica do Vale do Jaguaribe (DUBREUIL *et al*, 1968) e em relatórios mais detalhados (GEVJ, 1965). Os que se referem ao segundo período são objeto de um relatório de campanha (VIANA, 1977) e de um relatório de síntese final (HERBAUD *et al* (1989b). Uma primeira síntese e modelização dos dados desta bacia foram efetuadas por CAMPELLO (1979).

BACIA DE JUATAMA

Prancha 8



Paisagens características



Afloramentos rochosos e solos litólicos

Solos podzólicos: Poços e grandes árvores são indicadores de retenção d'água

Solonetz

Planossolos: retenção d'água

3.4.2 Descrição da bacia

A bacia de JUATAMA foi instalada antes da planificação realizada por NOUVELOT (1974), encontra-se na zona homogênea H_3, P_1, R_5, A_1.

H_3 = precipitação anual entre 600 e 800 mm,
P_1 = sub-solo impermeável,
R_5 = relevo bastante forte,
A_1 = altitude inferior a 500 m.

■ Clima e pluviometria

A pluviometria anual média da bacia de JUATAMA é mais elevada do que a das bacias anteriores; estima-se em 820 mm, ou seja superior ao limite correspondente à supracitada zona homogênea. Sua variabilidade é forte, seu coeficiente de variação está avaliado em 0,42, o total decenal úmido em 1.270 mm, decenal seco em 430 mm e centenal seco em 263 mm.

As outras características pluviométricas e meteorológicas dessa bacia são normais para o Sertão Norte: estação das chuvas entre janeiro e maio, centradas em março; precipitação em 24 h de período de retorno anual: 62 mm; decenal: 103 mm; temperatura média anual próxima de 27°C com máxima em outubro e mínima em julho, ventos dominantes do Este, geralmente fracos (velocidade média anual de 1,50 m/s); totais anuais de evaporação em tanque classe A, variando entre 2.500 e 3.000 mm, etc.

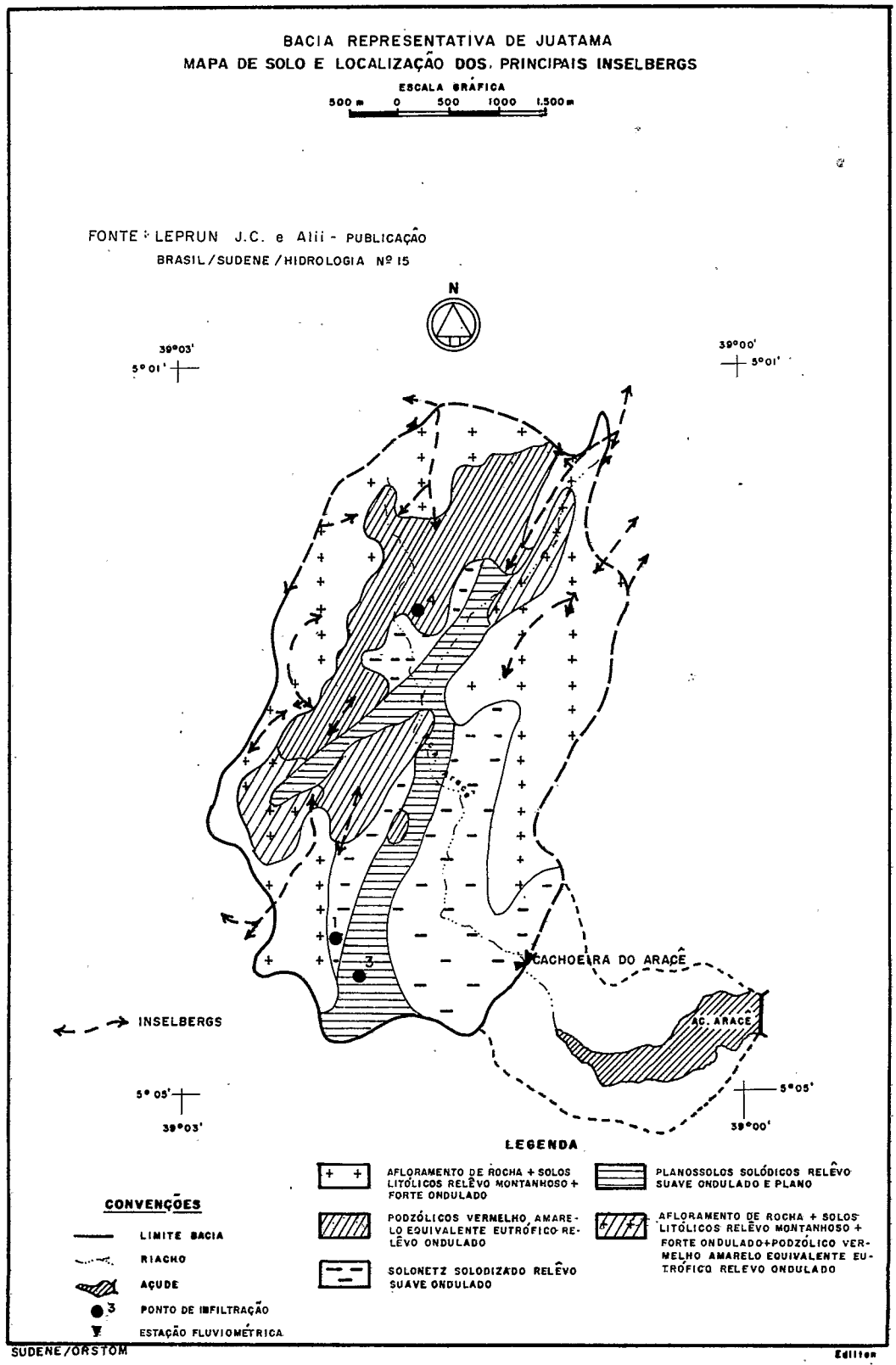
■ Geologia, solo e vegetação

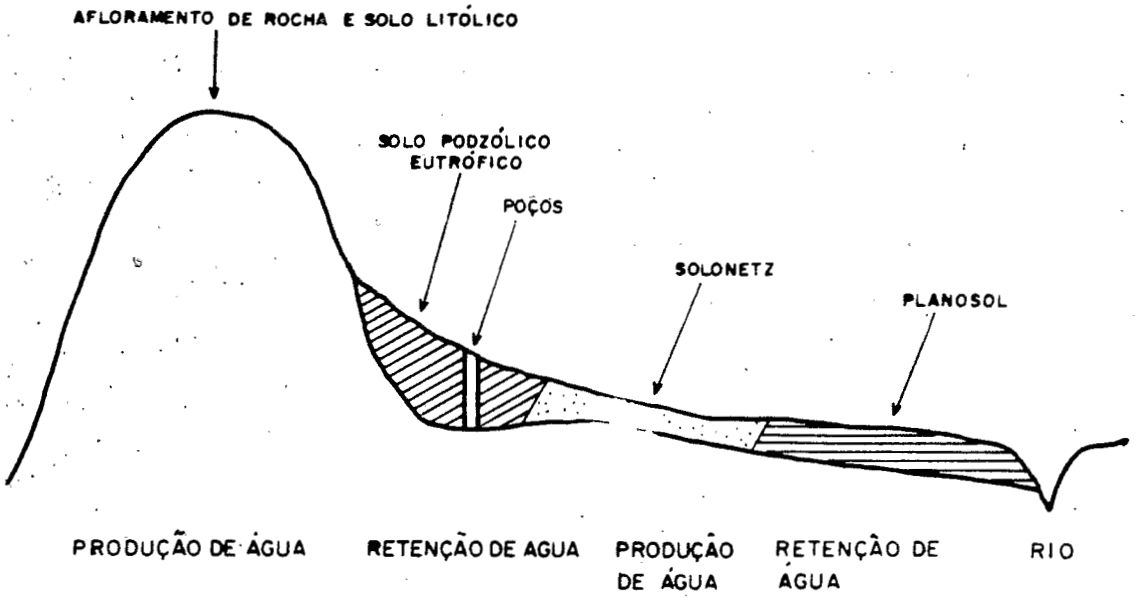
A bacia de JUATAMA está inteiramente situada sobre embasamento pré-cambriano composto de granito e de dioritos graníticos que podem aflorar em inselbergs, que cobrem aproximadamente 25% da superfície da bacia.

Os afloramentos rochosos associados a um forte relevo constitui a característica mais visível dessa bacia e contribui para a beleza de sua paisagem.

O mapa da figura 3.4.1 mostra a repartição dos principais tipos de solos e a figura 3.4.2 indica o esquema da sucessão de solos ao longo de uma vertente ou toposeqüência típica. Imediatamente abaixo dos afloramentos que constituem implúvios importantes são encontrados, sempre, solos Litólicos bastante permeáveis e solos Podzólicos Eutróficos profundos, com forte capacidade de retenção, provavelmente capazes de reter ou de retardar uma boa parte dos escoamentos provenientes dos afloramentos, sendo esta estocagem aproveitada pela população, que cavou numerosos poços.

Figura 3.4.1: Mapas dos solos da bacia de JUATAMA





TOPOSEQUÊNCIA TÍPICA NA REGIÃO DE JUATAMA

Figura 3.4.2 Toposeqüência típica na região de JUATAMA

Mais abaixo, na toposequência, encontram-se Solonetz impermeáveis e com fraca capacidade de retenção que estão acima dos Planossolos arenosos, mais espessos, mas que se tornam impermeáveis quando estão saturados.

Constataremos, mais adiante, que essa bacia é caracterizada por tempo de base mais alto e coeficientes de escoamento mais fracos do que deixariam prever seu forte relevo e a importância de seus afloramentos. Essas anomalias encontram, provavelmente, sua explicação em uma, outra ou nas duas zonas de retenção da toposeqüência, assinaladas anteriormente.

A Tabela seguinte indica as velocidades da infiltração da água após seis horas, medidas pelo método de MUNTZ. Cada valor corresponde à média de três testes realizados nos locais plotados na figura 3.4.1 (Fonte: Leprun *et al*, 1983).

TABELA 3.4.1 Resultados dos testes de infiltração na bacia de JUATAMA.

Método de Muntz.

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO APÓS 6 HORAS (mm/h)
JU 01	Solonetz	8,3
JU 03	Planosolo	205
JU 04	Podzólico vermel. amarelo equiv. eutrófico	57

A tabela 3.4.2 mostra as relações existentes entre certas características fisiográficas das diferentes bacias estudada.

TABELA 3.4.2 Principais formações geológicas, tipos de solo e vegetação da bacia de JUATAMA

Toposequência ou
--->---->---->---->---->---->---->---->---->---->---->---->---->
Sentido do escoamento e de acordo com a declividade

Tipo de solo	Afloramento associado com Litólico	Podzólico * eutrófico	Solonetz	Planossolo
Relevo	Muito forte	Forte	Médio	Fraco
Ocupação do solo	Vegetação muito natural (caatinga)	Cultivado cultivado	muito	cultivado
Permeabilidade	Nula para a rocha Elevada para o Litólico** (84mm/h)	Média 57mm/h	Muito fraca 8mm/h	Forte 200mm/h
Porcentagem na bacia	5%	22%	21%	12%

* Estes solos, caracterizados por uma grande capacidade de retenção, devem interceptar uma boa parte dos escoamentos provenientes de montante.

** Medida em outras bacias.

■ Cobertura vegetal

Essa bacia é habitada por uma população rural e dispersa, mas relativamente importante.

As zonas mais favoráveis foram cultivadas, sobretudo, os solos Podzólicos, mais ricos, e Planossolos com fraco relevo, ambos com grande capacidade de retenção. Perto de 30% dos solos da bacia são cultivados, principalmente, com algodão, milho e feijão.

As zonas de Solonetz têm uma vegetação muito rala por causa da fraca espessura de seu horizonte A arenoso e da impermeabilidade e da compacidade de seu horizonte B, argiloso.

Nas outras zonas geralmente não cultivadas da bacia (Podzólicos e Litólicos), encontra-se uma caatinga relativamente densa.

■ Relevo e morfologia

O forte relevo e a importância dos afloramentos rochosos são os aspectos que chamam mais atenção nessa bacia. As encostas lisas e abruptas dos inselbergs, de configuração geralmente arredondada, em forma do " Pão de Açucar", dominam rampas escarpadas e, depois, o resto da paisagem com várias centenas de metros.

O quadro 3.4.3 resume as principais características morfométricas da bacia de JUATAMA.

TABELA 3.4.3 Características morfométricas da bacia de JUATAMA

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	
Tamanho e forma:	
.Superfície (km2)	19,2
.Perímetro (km)	18,6
.Retângulo equivalente:	
.Comprimento (km)	6,2
.Largura (km)	3,1
.Índice de compacidade C	1,19
Declive e relevo:	
.Classe de relevo	R5
.Altitude média (m)	660
.Diferença das cota corresp. com 5% e 95% da superfície (m)	200
.Índice global de declividade(m/km)	32
.Densidade específica (m)	142
Rede de drenagem:	
.Densidade de drenagem (km/km2)	5,42

■ Açudes

*** Os pequenos açudes**

TABELA 3.4.4 Pequenos açudes cadastrados na bacia de JUATAMA

Período	Número de açudes	Superfície total controlada km^2	% da bacia	Volume total estimado (m^3)
1964-65	3	3,02	16%	85.000
1974-77	8	5,31	28%	(150.000)

Observa-se entre os dois períodos um acréscimo de 50% da superfície controlada e do volume total desses açudes.

Comparado com a superfície total da bacia de 19 km^2, este número de pequenos açudes é normal nessa região. O volume médio de cada açude, é de 16.000 m^3 e sua profundidade é, geralmente, compreendida entre 3 e 6 m. Notamos que seu volume total é nitidamente inferior ao volume recomendado por Molle e Cadier (1992), que é de 320.000 m^3 [3].

■ O açude ARACÊ

O açude chamado ARACÊ, de maior dimensão, (1.400.000 m^3 e 12 m de profundidade), retém as águas do rio principal a 2 km a jusante do exutório da bacia de JUATAMA. Controla uma bacia de 23,3 km^2, isto é, 21% a mais do que a bacia representativa.

Este açude está corretamente dimensionado segundo as normas de dimensionamento da SUDENE para os pequenos açudes. Se se quizer utilizá-lo para uma regularização plurianual é necessário que se determinem normas que permitam ampliá-lo.

3.4.3 Rede de monitoramento instalada

A figura 3.4.3 permite situar o equipamento de medição instalado que foi quase idêntico para os dois períodos. No entanto, foram acrescidas réguas suplementares para controlar os açudes construídos recentemente.

Esse equipamento era formado de dezoito pluviômetros, quatro pluviógrafos, uma estação meteorológica, dez estações limnimétricas que controlavam os açudes e uma estação hidrométrica chamada "Cachoeira do Aracê", que controlava os escoamentos da bacia. A estação da Cachoeira do Jatobá era estável e não apresentava maiores problemas. As superfícies médias cobertas por cada pluviômetro e pluviógrafo eram, respectivamente, 1 km^2 e 5 km^2.

[3] Calculado da seguinte maneira: 320.000 m^3 = 0,5 x 5,31 x 120 x 1000 com: 0,5 = 50% do volume escoado anual, segundo as normas da Sudene
5,31 km^2 = superfície controlada por esses açudes
120 mm = estimativa da lâmina escoada média anual
1000 = para obter m^3

3.4.4 Resultados obtidos

Séries das lâminas escoadas

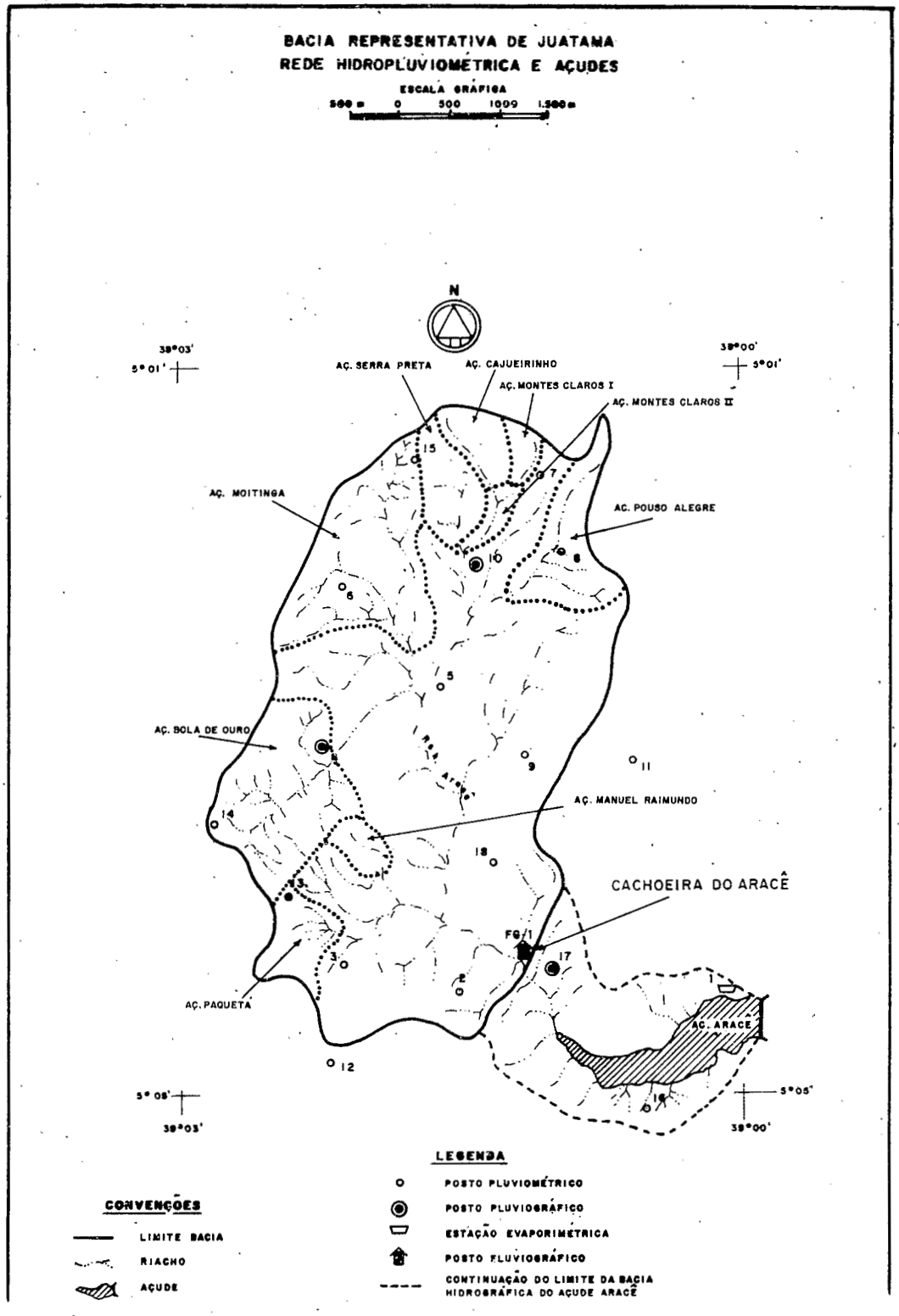
TABELA 3.4.5 Série dos termos do balanço hidrológico da bacia de JUATAMA

ANO	LÂMINA PRECIPITADA (mm)	FREQUÊNCIA DE ULTRAPASSAGEM	LÂMINA ESCOADA (mm)	COEFICIENTE DE ESCOAMENTO (%)
1963-64	1570	0,05	470	30%
1964-65	835	0,50	93	11,1
1974-75	1052	0,20	113	10,8
1975-76	646	0,70	8	1,2
1976-77	1171	0,15	133	11,4
MÉDIA Observada :	**1055**		**163**	**15,5**
MÉDIA Interanual :	**820**		**120**	**14,6**

Os totais pluviométricos são, em geral, excedentes. A média dos cinco anos é de 1.095 mm e ultrapassa em 33% a média interanual, estimada em 820 mm. Tendo como base esses números, essa bacia não pode mais ser qualificada de "semi-árida", ao menos durante esse período. A média dos escoamentos observados é de 163 mm e ultrapassa em 35% a média interanual cujas estimativas variam entre 100 e 140 mm. Os coeficientes de escoamento anuais observados são de 15% e estão próximos de seu valor interanual. Seus valores são elevados em relação às outras bacias do SERTÃO.

A irregularidade dos escoamentos é, evidentemente, bem maior do que a das precipitações. A relação entre os totais anuais precipitados e escoados não é muito estreita. Assim, os fracos escoamentos observados em 1976 são explicados por seu baixo total anual, como também pelos déficits pluviométricos concentrados no fim da estação chuvosa, em abril, maio e junho, meses durante os quais os coeficientes de escoamento são os mais elevados. Esse comportamento confirma o papel das zonas de retenção d'água, evidenciadas no esquema de toposeqüência anterior.

Figura 3.4.3: Rede hidropluviométrica da bacia de JUATAMA



Mais da metade dos escoamentos observados durante esse período de cinco anos são oriundos da única estação chuvosa de 1964-1965, cujo período de retorno é superior a vinte anos e durante a qual o coeficiente de escoamento anual atinge um valor de 30%, absolutamente excepcional.

De acordo com as publicações do GEVJ (1965), 41% do volume escoado durante os anos de 1964 e 1965 provêm do escoamento superficial direto, sendo o restante oriundo do escoamento retardado e de base.

Essa fraca proporção do escoamento superficial evidencia, novamente, o papel das zonas de retenção existentes nessa bacia.

Os modelos ajustados por CADIER (1984) são diferentes para os dois períodos 1964-1965 e 1975-1977. O do segundo período gerando escoamentos inferiores a 12% em relação ao do primeiro. Pode-se explicar, parcialmente, este fato, levando em conta a construção de novos açudes entre os dois períodos, capazes de estocar 3 a 4% do escoamento e que controlam uma superfície suplementar de 13% da bacia.

Características das cheias

A tabela 3.4.6 resume as principais características das cheias da bacia de Juatama, seguindo as mesmas convenções adotadas para a bacia de Tauá.

TABELA 3.4.6 Características das cheias da bacia de JUATAMA

	Hidrograma unitário						
Superfície (km^2)	Tempo de subida	Tempo de base	Descarga máxi para L_s=1 mm (m^3/s)	Qmax / Qméd.	X_{10} (mm)	K_X (méd)	Q_{10} (m^3/s)
19,1	1 h	6 h	2,18	2,45	33	1,88	62

A figura 3.4.4 mostra a relação entre as chuvas, as cheias e o índice de saturação hídrica prévia IK. Esse tipo de gráfico foi utilizado como ajustamento inicial do modelo SUDENE/ORSTOM.

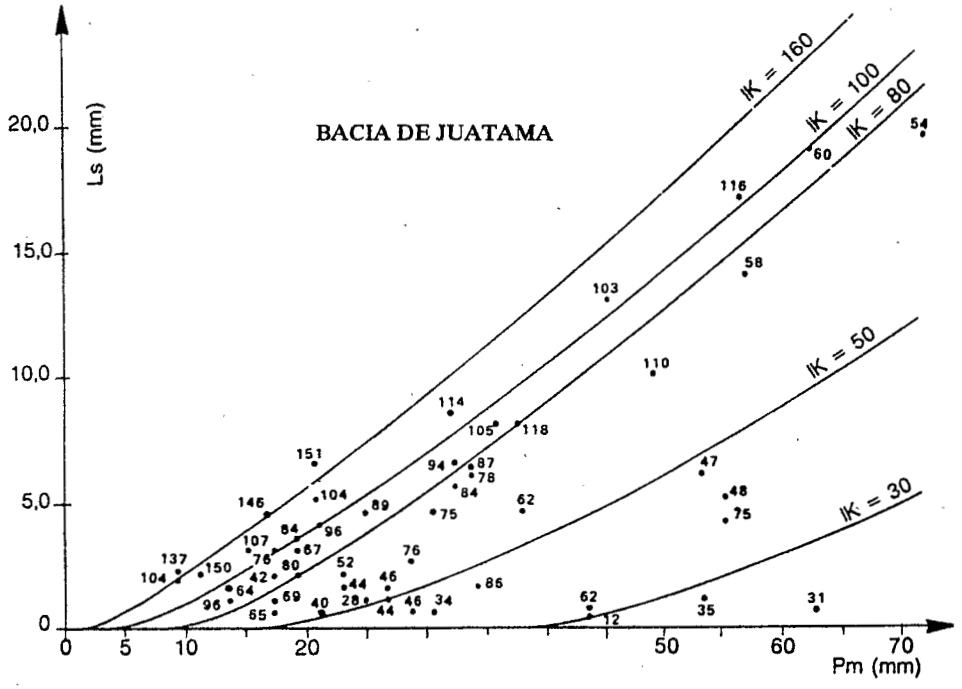


Figura 3.4.4: Ligação entre a chuva (Pm), o escoamento das cheias (Ls) e o índice de saturação hídrica prévia da bacia (IK)

Lâminas escoadas características

A tabela 3.4.7 fornece as lâminas escoadas características da bacia de JUATAMA para os dois períodos de observação da bacia.

TABELA 3.4.7 Lâminas escoadas características da bacia de JUATAMA (mm)

			E S C O A M E N T O							
Período	L_{600} (1)	$L_{(820)}$ (2)	DECEN. ÚMI. LA01	TRIEN. ÚMI. LA033	MEDIAN LA05	TRIEN. SEC LA067	DECEN. SEC LA09	L(3AC)	CHEIA DECEN. X_{10}	COEF ESCOA. MÉDIA(%)
1964-66	68	140	358	157	93	35	8	85	38	17,7
1974-77	49	100	307	124	64	23	2	58	28	13,7
MODELO SYMPLES	-	120	350	-	62	-	10	-	-	14,6

Como ilustração, mostramos os valores encontrados por CAMPELLO (1979) que ajustou o modelo SYMPLES, sobre os mesmos dados. Os resultados fornecidos pelos dois modelos são coerentes.

3.4.5 Conclusões e interpretação: os resultados

As lâminas escoadas e os coeficientes de escoamento dessa bacia são os mais elevados entre todas as bacias representativas estudadas. No entanto, esses grandes valores são, sobretudo, devidos a uma pluviometria superior, em aproximadamente 300 mm, às das outras bacias estudadas, embasadas sobre cristalino.

Uma vez corrigidos esses valores, para que se obtenha as condições pluviométricas-padrão de 600 mm, os mesmos tornam-se modestos, inferiores, por exemplo, aos da maior parte das sub-bacias de TAUÁ. Além disso, apesar do forte relevo e da relativa compacidade dessa bacia, observamos que os valores de tempo de base das cheias são comparáveis aos das outra bacias de mesma superfície, mas, sem afloramento e de declive bem mais fraco. Tudo isso leva-nos a formular e a reforçar a hipótese de um funcionamento hidráulico complexo. Certas zonas de retenção retardam, provavelmente, uma parte importante dos escoamentos provenientes dos afloramentos, antes de ficarem saturadas. O conjunto produz, finalmente, muito menos água , do que se poderia esperar.

Teria sido importante poder verificar, diretamente, essas hipóteses, com a ajuda de medições no campo, implantando e monitorando uma rede de medição composta, por exemplo, de pequenas bacias que permitissem medir os fluxos a montante e a jusante dos solos Podzólicos ou dos Planossolos, a fim de avaliar a sua retenção de água efetiva. Esta rede deveria ser reforçada com perfis hídricos e medições piezométricas estrategicamente repartidos sobre a bacia de JUATAMA.

Enfim, notamos que a complexidade dos mecanismos e os contrastes dos comportamentos hídricos das diversas zonas identificadas tornarão **difícil e arriscada a transposição dos resultados** obtidos em JUATAMA para as outras bacias do mesmo tipo, aparentemente semelhantes, porém onde as mesmas unidades ou "atores" hidrológicos antagonistas existem em proporções diferentes.

No entanto, as zonas montanhosas com funcionamento complexo desse tipo são relativamente freqüentes no Nordeste e parecem concentrar uma grande parte do potencial de recursos em água da superfície do Nordeste, o que reforça a necessidade de melhor abranger os mecanismos evidenciados na BHR de JUATAMA para racionalizar a estocagem e a utilização dessa água durante todo o ano.

Além dos poços, dois tipos de aproveitamento das águas superficiais merecem ser destacados:

- Os açudes muito pequenos situados a montante das principais zonas de retenção de água, para aproveitamento dos coeficientes de escoamento elevados.

- Os açudes mais importantes e mais fundos (10 m ou mais), capazes de resistir a uma seca, represando os cursos d'água principais, como o açude ARACÊ.

3.5 BACIA REPRESENTATIVA DE IBIPEBA

A bacia de IBIPEBA encontra-se a cerca de 1.000 km a sudoeste de todas as outras bacias. Ela possui um clima diferente caracterizado por duas estações de chuva. Situada inteiramente sobre um tabuleiro calcário, algumas vezes kárstico, ela não pode ser comparada diretamente às outras bacias situadas sobre formações geológicas sedimentares, as quais foram estudadas pelo GEVJ e que estão nas encostas de um tabuleiro. A bacia de IBIPEBA é única em seu gênero. Nela, os escoamentos são fracos e constatam-se perdas consideráveis de água ao longo dos rios.



Bacia de Ibipeba



Paisagem característica de cambissolos e latossolos. Uma região rica, produtora de feijão.

Prancha 9

3.5.1 Histórico e descrição da bacia

Instalada e operada pela SUDENE, a rede pluviométrica dessa bacia que controla uma área de 321 km^2 funcionou de outubro de 1976 a agosto de 1981.

Sua implantação foi efetuada de acordo com a planificação de NOUVELOT (1974) para representar a "zona homogênea" H_{2+}, P_2, R_5, A_{23}, isto é:

- H_{2+} Total das precipitações anuais compreendidas entre 400 e 600 mm, com um regime pluviométrico complexo, caracterizado por uma "dupla" estação chuvosa.
- P_2 Permeabilidade do sub-solo fraca a média.
- R_5 Relevo bastante forte (desnivel específico entre 100 e 250 m).
- A_{23} Altitude variando entre 300 e 1.000 m.

HERBAUD *et al* (1989a) efetuaram uma interpretação do zoneamento proposto por NOUVELOT, mostrando que os resultados da bacia de IBIPEBA podem ser diretamente utilizados sobre uma superfície de aproximadamente 60.000 km^2.

Uma análise mais detalhada das características das cinco bacias instaladas evidencia algumas distorções e particularidades em relação ao estudo preliminar e simplificador da planificação de NOUVELOT.

■ Clima e Pluviometria

Situada na parte central do Estado da Bahia, quase a 1.000 km a Sudoeste de Recife, o clima da região de IBIPEBA, é semi-árido e bem diferente do das outras bacias. Sua principal característica é a existência de uma estação chuvosa (ou, melhor dito, de uma estação durante a qual as chuvas podem ocorrer...) muito mais longa, estendendo-se de outubro a abril.

De **outubro a janeiro**, a bacia pode ser atingida por **um sistema de perturbação que vem do Oeste** e que provoca tempestades e algumas chuvas de monção. Esse tipo de perturbação só atinge, muito raramente, as outras bacias situadas mais ao Norte. Entre **janeiro e abril**, as precipitações são provocadas pelo deslocamento em direção ao Sul da **Zona de Convergência Intertropical** (ZCIT) que constitui o único tipo de perturbação que atinge as outras bacias situadas mais ao Norte.

Os meses de junho a setembro são, praticamente, os únicos durante os quais a probabilidade de fortes precipitações suscetíveis de provocarem um escoamento é realmente muito fraca.

---

[2] Cujos resultados são apresentados em anexo.

A presença, nessa região, de "Chapadas" - tabuleiros de origem sedimentar - dominando as regiões circunvizinhas em várias centenas de metros, complicam ainda mais os fenômenos, criando obstáculos e microclimas. A rede geral pluviométrica e meteorológica dessa região, tem uma densidade relativamente fraca o que torna, algumas vezes, problemática a seleção de um pluviômetro ou de uma estação meteorológica, ao mesmo tempo de boa qualidade e representativa do microclima estudado.

Um exame atento das séries das precipitações mensais mostra-nos que uma, ou a outra, ou as duas "estações chuvosas", mencionadas, podem ser defasadas ou mesmo não acontecerem. Os agricultores aproveitam-se dos "anos bons" para efetuar duas colheitas anuais, com resultados sempre aleatórios.

O total pluviométrico anual médio dessa bacia, é estimado em **600 mm**, os valores decenais secos e úmidos em 340 e 870 mm, os coeficientes de variação C_V sendo da ordem de 0,30 a 0,35, isto é, nitidamente mais fracos do que nas outras bacias mais setentrionais.

Curiosamente, a distribuição estatística dos **totais pluviométricos em 24 h** (e, provavelmente, a das intensidades), assim como, as descargas calculadas pelos modelos hidropluviométricos com intervalos de tempo diário não são muito diferentes da região SERTÃO NORTE. O total em 24 hs de período de retorno anual é de 65 mm e o decenal de 105 mm. Parece claro, esses valores devem depender, principalmente, da origem convectiva das fortes chuvas.

Essa bacia está situada a mais de 11° de latitude Sul, seu **clima é tropical**, no entanto, observam-se variações climáticas nitidamente ligadas aos contrastes das estações, entre o verão e o inverno. Os principais parâmetros variam da seguinte maneira:

- **Temperaturas**: média anual de 23,1°, sendo julho o mês mais frio (21°); a máxima média é atingida entre novembro e março (25°). A média mensal das máximas varia entre 26° e 36° e a das mínimas entre 12° e 22°.

- **Umidade relativa**: as médias mensais variam, de maneira lógica, entre 40 e 75%, em função das precipitações e das temperaturas.

- **Ventos**: são fracos, de velocidade geralmente inferior a 1 m/s e do setor Este-Oeste dominante.

- **Insolação**: a média mensal varia entre 150 e 250 h, em função da duração no dia e das precipitações. A média geral calculada para todo o período é de 7,1 horas por dia.

- **Evaporação**: as médias, em tanque classe A, variam entre 4 e 8,5 mm/dia, de maneira coerente com a insolação, a umidade e as precipitações. A média geral de todo o período é de 5,8 mm/dia, ou seja, um total anual de 2.100 mm.

■ Geologia, solos e vegetação

A região de IRECÊ, onde se encontra a bacia de IBIPEBA, é célebre pela riqueza de seus solos gerados pelo sub-solo calcário quase sempre kárstico. Este sub-solo pertence ao grupo dos **calcários** litográficos e dos calcários dolomíticos do grupo Una do protozóico superior caracterizado por aquíferos de grande potência, geralmente utilizados para a irrigação. O relevo é suave e de grande amplitude; os solos gerados são os **Cambissolos**, os **Latossolos** e os **solos Podzólicos** espessos, todos permeáveis. Os Cambissolos são os mais férteis e possibilita a cultura do feijão que é exportado para outras regiões.

A quinta parte, Noroeste da bacia, é muito diferente. O relevo é muito mais forte, o sub-solo é composto de **quartzitos** e de **arenitos** que afloram sempre e geram solos **Litólicos** Distróficos arenosos, pobres, pouco espessos, mas permeáveis. Eles restituem rapidamente a água sob forma de escoamento de base, devido ao substrato impermeável.
Nas partes baixas dessa zona encontram-se **areias quartzosas** de vários metros de espessura que retêm a maior parte dos escoamentos oriundos das partes a montante. A sub-bacia de LAGEDO DE BAIXO está inteiramente situada nessa zona de solos litólicos que, praticamente, não são cultivados.

A tabela 3.5.1 indica as velocidades da infiltração da água após seis horas, medida pelo método de MUNTZ. Cada valor corresponde à média de três testes realizados nos locais plotados na figura 3.5.1 (Fonte: Leprun *et al*, 1983).

TABELA 3.5.1 Resultados dos testes de infiltração da bacia de IBIPEBA
Método de Muntz.

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO DEPOIS DE 6 HORAS (mm/h)
IB 01	Areias distróficas	426
IB 02	Solos Litólicos distroficos	71
IB 03	Latossolo verm. amarelo d. e. - solo nu não cultivado	115
IB 04	Latossolo verm. amarelo d. e. com vegetação natural	150
IB 05	Latossolo verm. amarelo d. e. com cultura	246
IB 06	Solo podzólico	116
IB 07	Cambissolo - com pouca vegetação natural	139
IB 08	Cambissolo - com cultura	288

A tabela 3.5.2 e a figura 3.5.1 apresentam e resumem as características do solo, do sub-solo e da vegetação, para cada sub-bacia.

TABELA 3.5.2 Principais formações geológicas, tipos de solo e vegetação da bacia de IBIPEBA.

	Calcário				
Formação Geológica	Dolomítico	não kárstico	Kárstico	Quartzitos	e Arenitos
Solo gerado e características hidrodinâmicas	Cambissolo. Pode haver um fraco escoamento quando o declive é forte e o solo não trabalhado.	Cambissolo e solo podzólico Nenhum escoamento	Latossolo relevo plano. Espessura de 2 a. 3 m. Permeável. Nenhum escoamento.	Solo litólico associado aos afloramentos rochosos. Este solo é muito permeável, mas pouco espesso. O escoamento de base é rápido e importante	Areias Quartzosas muito permeáveis que retêm todos os escoamentos que vêm de montante
Ocupação do solo	Freqüentemente cultivado		Muito pouco cultivado		
Permeabilidade (mm/h)	140 Vegetação natural e cultura	290 (cultivado)	115 a 250 de acordo com a cobertura vegetal	71	426
PORCENTAGEM POR SUB-BACIA					
1. Lagoa Grande	27%	21%	32%	17%	3%
2. Lajedo de Baixo	-	-	-	100%	-
5. Faz. Isabel	69%	-	31%	-	-
6. Faz. Passagem	86%	-	14%	-	-
7. Lagoa do Canto	23%	44%	33%	-	-

(Adaptado de LEPRUN et al 1983).

■ Morfologia: relevo, forma das bacias e rede de drenagem

A tabela 3.5.3 apresenta, com as convenções habituais, as características morfométricas das diferentes bacias.

TABELA 3.5.3 Características morfométricas da bacia de IBIPEBA

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	BACIAS				
	1.Lagoa Grande	**2.Lajedo de Baixo**	**5.Fazenda Isabel**	**6.Fazenda Passagem**	**7.Lagoa do Canto**
Tamanho e forma					
.Superfície (km^2)	321,0	19,1	47,0	14,8	61,0
.Perímetro (km)	101,0	19,0	34,0	18,0	32,0
.Retângulo equivalente					
. Comprimento (km)	43,10	6,80	13,80	6,80	10,2
. Largura (km)	7,45	2,82	3,38	2,16	6,0
.Índice de compacidade C	1,60	1,20	1,40	1,30	1,2
Declive e relevo:					
.Classe de relevo	R_5	R_5	R_4	R_3	R_3
.Altitude média (m)	750,0	93,0	710,0	730,0	785,0
.Índice global de declividade (m/km)	9,6	36,5	10	13,8	4,6
.Desnível específico (m)	172,0	160,0	70	53,0	36,0
Rede de drenagem:					
.Densidade de drenagem (km/km^2)	0,57	0,48	0,94	0,69	0,07
.Relação de comprimento	1,94		1,73	-	-
.Relação de confluência	3,02		3,00	2,65	-

■ Representatividade das diferentes sub-bacias

As diferentes sub-bacias da BHR de IBIPEBA foram escolhidas para representar as principais unidades geológicas e pedológicas existentes nessa região.

Destacam-se três principais:

- As bacias 5 e 6 sobre **calcário dolomítico não-kárstico** estão cobertas com Cambissolos e Latossolos, e caracterizadas por um relevo bem mais fraco (Desnível específico, Ds de 50 a 70 m) e densidades de drenagem variando entre 0,7 e 1 km/km^2

- A bacia 7 sobre **calcário litográfico kárstico** é caractrizada por um relevo ainda mais fraco (Ds = 36 m) e, sobretudo, por uma rede hidrográfica quase inexistente cuja densidade de drenagem é inferior a 0,1 km/km^2.

- A bacia 2, sobre **quatzitos e arenitos**, caracterizada por um forte relevo (Ds da ordem de 200 m) e uma densidade de drenagem da ordem de 0,5 km/km^2.

[2] Cujos resultados são apresentados em anexo.

- A bacia principal, nº 1, integra todas essas unidades. Constatam-se perdas importantes ded água, em relação às contribuições das diferentes bacias situadas a montante. Essas perdas são devidas à presença de um lago no percurso do curso principal e, provavelmente, a fenômenos kársticos.

3.5.2 Equipamento de medição instalado

A figura 3.5.2 mostra o equipamento instalado que funcionou entre setembro de 1976 e agosto de 1981.

Esse equipamento era formado por 49 pluviômetros, seis pluviógrafos, uma estação meteorológica, cinco estações limnigráficas e duas estações limnimétricas em pequena barragem.

A superfície média coberta por pluviômetro, no conjunto da bacia, é de um aparelho para 6,5 km^2, porém atinge um pluviômetro para 2 km^2 nas zonas mais densas.

Essa bacia foi objeto de 5 relatórios parciais de campanha: PEREIRA (1978), ZELAQUETT (1980), LINS (1982), ASSUNÇÃO (1982 e 1984) e de um relatório de síntese final (HERBAUD *et al*, 1989a) donde foi tirada a maior parte dos resultados aqui apresentados.

Figura 3.5.1 Mapas de solos da bacia de IBIPEBA

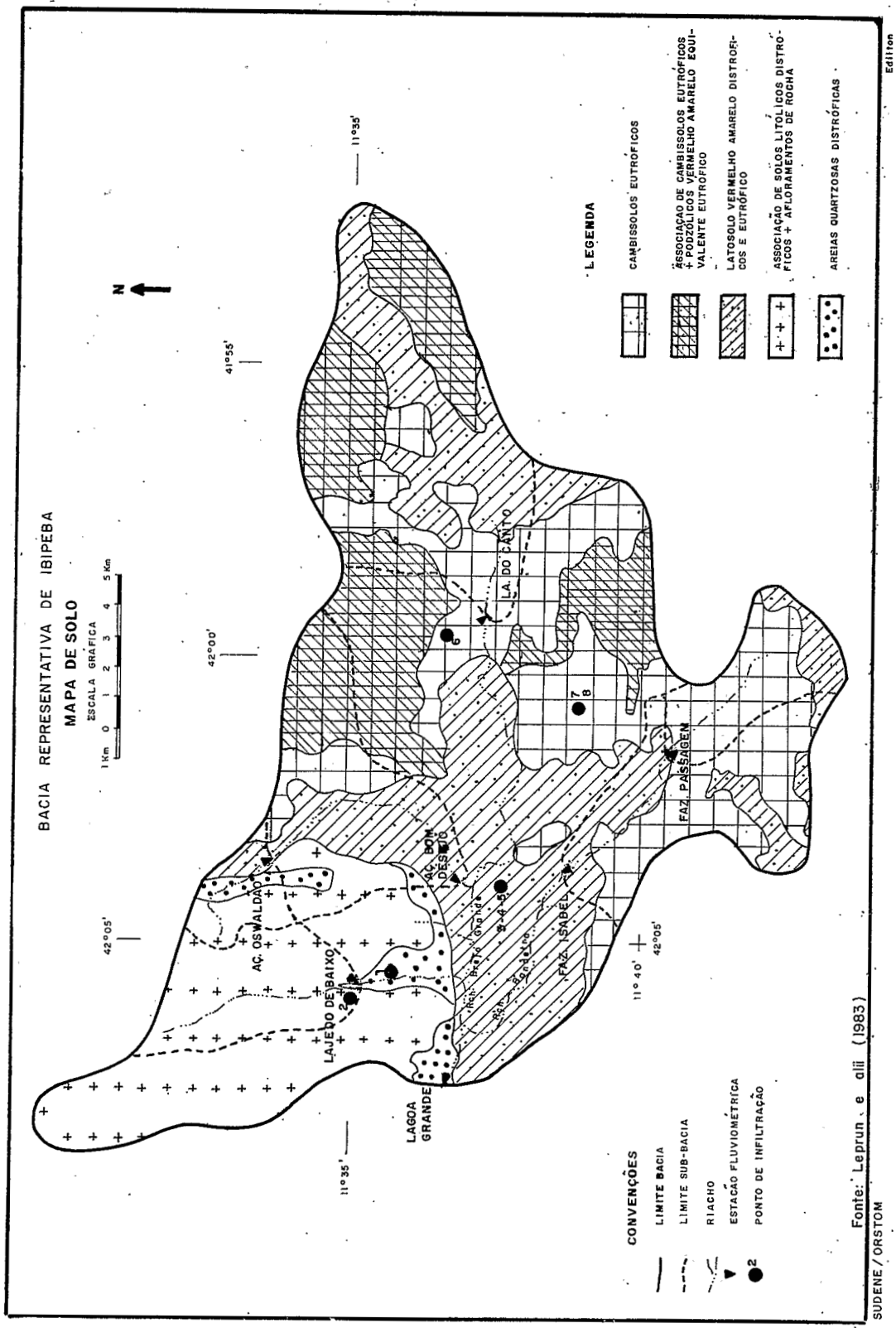
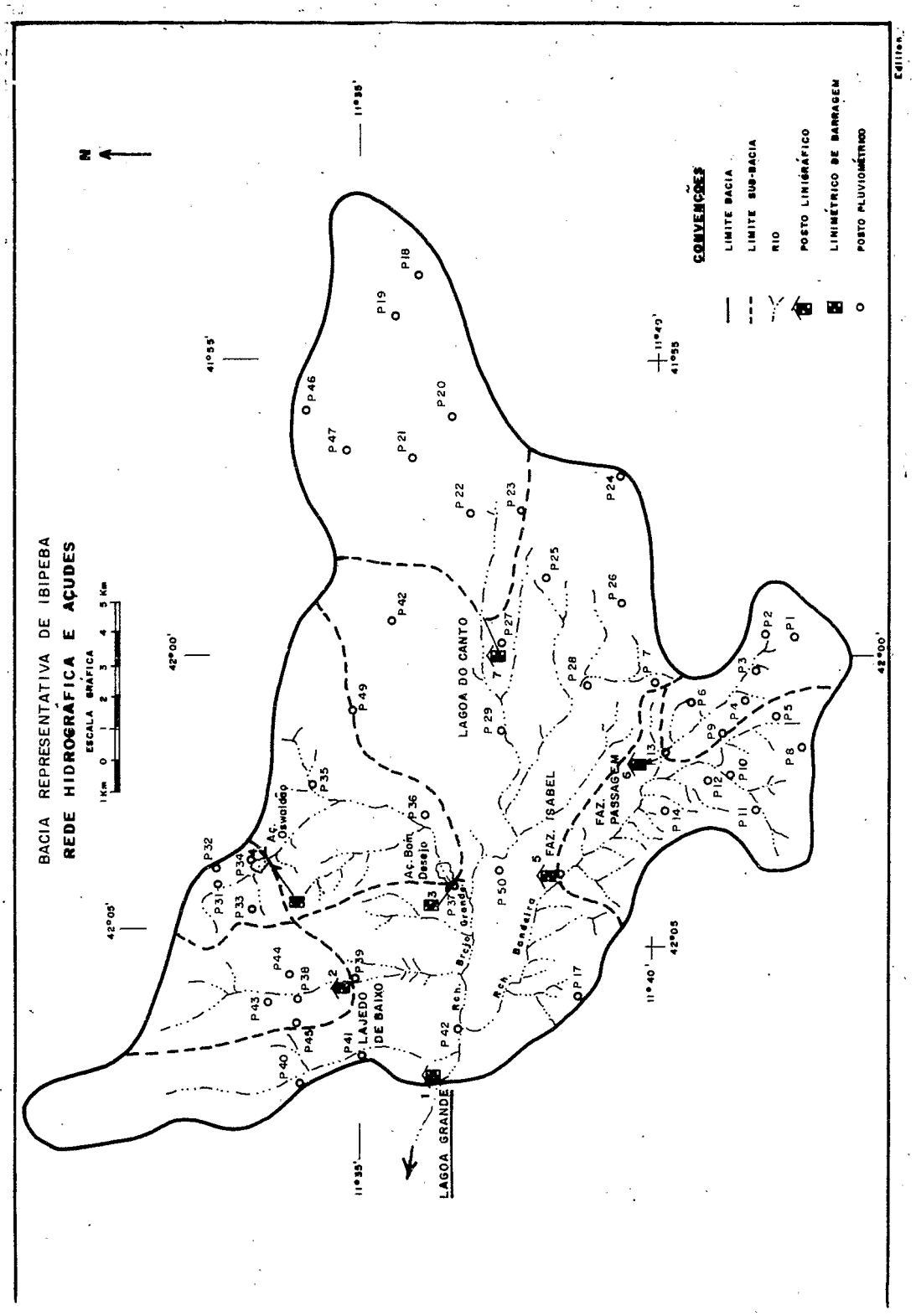


Figura 3.5.2 Rede hidropluviométrica e açudes da bacia de IBIPEBA



3.5.3 Resultados obtidos

■ Série das lâminas observadas

A tabela 3.5.4 apresenta os totais anuais das lâminas precipitadas e escoadas nas diferentes sub-bacias. A bacia nº 7 jamais escoou e não foi possível observar escoamentos significativos nas bacias dos açudes 2 e 3 que apresentaram além do mais, infiltrações muito importantes.

TABELA 3.5.4 Série das precipitações e dos escoamentos na bacia de IBIPEBA (mm)

Ano	1 Lagoa Grande		2 Lajedo de Baixo		5 Faz.Isabel		6 Faz.Passagem		Frequência
	Prec.	Escoam.	Prec.	Escoam.	Prec.	Escoam.	Prec.	Ecoul.	Estimada
1976-77	-	-	-	-	632,9	(8,0)	646,1	(11,7)	0,45
1977-78	1.002,5	4,4	1087,2	30,5	1.050,4	18,05	1058,4	30,6	0,04
1978-79	737,7	2,02	800,3	39,1	700,4	1,75	717,1	2,04	0,30
1979-80	753,9	3,85	657,9	19,8	793,0	18,5	843,3	32,7	0,20
1980-81	695,5	1,32	691,2	7,2	728,6	6,3	739,1	15,2	0,30
Média	797,4	2,90	809,2	24,2	781,1	10,52	800,8	18,4	
L_{600}	-	0,7	-	18	-	8	-	14	

Constata-se que os cinco totais pluviométricos observados são **excedentes**. O ano de 1977-78 é o mais forte do período e apresenta um total superior a 1.000 mm, cujo período de retorno é da ordem de 25 anos. A média dos cinco anos observados atinge quase 800 mm, valor significativamente superior à média interanual que está estimada em 600 mm para esta bacia, .

Como era de se esperar, os escoamentos médios superam entre 40 e 70% da média interanual L_{600}; salvo, para a bacia maior, a de nº 1 (LAGOA GRANDE), para a qual a ultrapassagem é de 600% ! Porém, nesse caso, a fraqueza dos coeficientes de escoamento diminui a significação das diferenças observadas. Os escoamentos do ano de 1977-78 são elevados, mas numa proporção menor do que o total pluviométrico excepcional desse ano poderia deixar prever.

Notamos, igualmente, **extrema heterogeneidade espacial e temporal** dos escoamentos entre as diferentes partes da bacia. Assim, em 1978/79 os escoamentos da bacia nº 2 (LAGEDO DE BAIXO) são **quinze ou vinte vezes mais fortes** do que os das bacias 5 e 6 (PASSAGEM e FAZ. ISABEL), se bem que eles sejam inferiores nos dois anos seguintes.

Os coeficientes de escoamento são fracos, da ordem de 1 a 3% nas bacias que escoam mais e somente 0,1%, na bacia principal. O escoamento superficial, muito aleatório, sobrevém durante raras cheias, sinal característico da irregularidade dos regimes.

Nenhum escoamento foi observado entre 1976 e 1981 na **bacia nº 7** (LAGOA DO CANTO). No entanto, várias cheias sobrevieram neste posto durante a estação chuvosa excepcionalmente abundante de 1984-1985, depois da desativação da bacia de IBIPEBA. Isso mostra o problema da duração das observações, que deve ser muito longa sobre essas bacias irregulares.

■ Características das cheias

A tabela 3.5.5 contém as características das cheias das diferentes bacias, utilizando as mesmas convenções da bacia de Tauá.

TABELA 3.5.5 Características das cheias da bacia de IBIPEBA.

Bacia	Superfície (km^2)	Hidrograma unitário: Tempo de subida	Tempo de base	Descarga Máx. para L_S=1mm	Qmax / Qméd.	X_{10} (mm)	K méd.	Q_{10} (m^3/s)
Lagoa Grande	321,5	7 h	20 h	10,4 m^3/s	2,3	1,0	7,15	7,0
Laj. de Baixo	19,1	0h20'	1 h	12,0 m^3/s	2,3	2,0	4,42	9,0
Fz.Isabel	46,8	0h40'	3h20'	11,7 m^3/s	3,0	12	4,62	55,0
Fz.Passagem	14,8	0h30'	2h10'	5,9 m^3/s	3,1	15	3,20	48,0

■ As lâminas escoadas características

A tabela 3.5.6 contém as lâminas escoadas características das diferentes bacias, utilizando as convenções definidas para a BHR de TAUÁ.

TABELA 3.5.6 Lâminas escoadas características (mm) da bacia de IBIPEBA

			ESCOAMENTO							
SUB-BACIA	L_{600}	MÉDIA * L(p)	DECEN. ÚMIDO F=0,1	TRIEN. ÚMIDO F=0,33	MEDIANA F=0,5	TRIEN. SECO F=0,67	DECEN. SECO F=0,9	L 3AC	CHEIA DECEN. X_{10}	COEFIC. ESCOAM. MÉDIA (%)
Lagoa Grande	(1)	(1)	?	1	0	0	0	0	1	0,15
Lajedo do Baixo	(18)	(23)	?	?	15	?	?	22	2	3,80
Faz. Isabel	(8)	(9)	19	10	6	(3)	0	5	12	1,50
Faz. Passagem	(14)	(16)	34	16	9	(3)	0	6	15	2,70
Lagoa do Canto	?	?	?	0	0	0	0	0	?	?

(*) L(p) é superior a L600 porque, embora a pluviomeria média anual da bacia seja estimada em 600 mm, o coeficiente climático C dessa região foi estimado em 1,15. Para o cálculo de L(P), utiliza-se a fórmula $L(P) = C \cdot e^{A(P-600)} \cdot L_{600})$.

3.5.4 Conclusões: resultados obtidos na Bacia de IBIPEBA

O estudo da Bacia Representativa de IBIPEBA permitiu evidenciar alguns traços marcantes dos regimes hidrológicos dessa região:

3.5.4.1 Os módulos anuais

Os escoamentos anuais da bacia de Ibipeba são caracterizados por:

a) **Fraqueza dos escoamentos:** os rendimentos anuais médios são sempre inferiores a 2%.

b) **Extrema irregularidade dos regimes:** os escoamentos anuais são nulos, um ano em cada dois ou um ano em cada cinco, de acordo com a bacia. Outro sinal de irregularidade: a lâmina da cheia decenal é sempre superior ao módulo, com exceção da bacia n^{o} 2, de LAGEDO DE BAIXO, cujo escoamento provém, sobretudo, de um escoamento de base "rápido".

3.5.4.2 Principais regimes hidrológicos

Foi possível evidenciar **três comportamentos hidrológicos principais:**

- As zonas sobre **calcário dolomítico não-kárstico** cujas partes cobertas de Cambissolos apresentam escoamento superficial. As lâminas escoadas L_{600} das pequenas bacias dessa zona variam entre 10 e 20 mm e são, pois, três a seis vezes mais fracas do que em zonas análogas, sobre embasamento cristalino.

- As zonas sobre **calcários litográficos kársticos** onde se desenvolvem Latossolos, Cambissolos e Solos Podzólicos e nas quais a rede hidrográfica é pouquíssimo desenvolvida e **o escoamento é praticamente nulo.** O fenômeno de karstismo pode, além do mais, provocar o desaparecimento brutal, nas dolinas, de alguns poucos rios que chegaram a se formar.

- Zonas sobre **quartzitos e arenitos,** caracterizadas por forte relevo e solos arenosos pouco profundos, que se tornam mais espessos nas partes baixas de declividade mais fraca. O **escoamento superficial puro é muito fraco** nesse tipo de bacia e observa-se um **escoamento de base retardado** nos solos cuja recessão pode durar vários meses. As areias espessas a jusante retêm, total ou parcialmente, os escoamentos.
  É difícil levar mais longe a análise do comportamento dessa bacia, única em seu gênero, dentro do conjunto de BHR estudado no Nordeste. No entanto, parece claro que as tentativas de transposição de seu regime para outras bacias não estudadas deverão levar em conta o papel e as proporções relativas de solo arenoso espesso existente na parte de jusante da bacia não estudada.

3.5.4.3 Paradoxo das cheias

Pode-se deduzir do exposto que as lâminas das cheias, em zonas de calcários não-kársticos, são duas ou três vezes mais fracas do que nas bacias comparáveis sobre embasamento cristalino. Constatamos, por outro lado, que a relação entre essas cheias e as lâminas anuais médias é nitidamente mais elevada.

Por outro lado, os **tempos de base** das duas bacias situadas na zona sedimentar **são inferiores** de 30 a 40% aos das bacias análogas, de mesma superfície, sobre cristalino. Isso pode ser interpretado como um sinal de que **apenas uma parte da bacia contribui para a origem das grandes cheias.**

RODIER (1989) chegou a conclusões similares a respeito das pequenas bacias permeáveis do *Sahel Africano.*

Enfim, levando-se em consideração a fraqueza das lâminas destas cheias, pode-se temer, nessa região, que **as cheias verdadeiramente excepcionais** sejam, proporcionalmente, mais elevadas. Por exemplo, é provável que a relação entre a cheia centenal e a cheia decenal seja mais forte em bacias situadas sobre o embasamento cristalino.

Tudo isto leva-nos às conclusões aparentemente contraditórias e paradoxais seguintes:

. Para bacias de mesma superfície e de mesma morfologia, as cheias dessa região serão menos importantes do que nas zonas cristalinas análogas.

. No entanto, para um mesmo volume anual escoado, será preciso temer as descargas de pico das cheias excepcionais mais elevadas.

3.5.4.4 Perdas na rede hidrográfica

Constatam-se perdas importantes de água, entre as diversas sub-bacias e a bacia principal.
Assim, a soma dos volumes escoados nas duas estações (2 e 5), que controlam uma superfície de 66 km^2, é, praticamente, igual ao volume observado na saída da grande bacia, a n^o 1, de 321 km^2.
Herbaud *et al* (1989a) tentaram estimar as perdas na rede hidrográfica, supondo que as lâminas escoadas são constantes para cada unidade de solo.

Essas perdas, estimadas em 1.800.000 m^3, podem produzir-se ao longo da rede de 45 km de trechos de rios principais de duas maneiras diferentes:

. seja, de uma maneira progressiva por infiltração nas margens e alimentação dos aquíferos. Isso acontece, sobretudo, nas zonas arenosas espessas de areias quartzosas que bordejam 4 km desses rios;

. seja, de uma maneira mais brutal, quando os rios desaparecem nas dolinas ou no lago situado imediatamente a montante da saída da estação principal de Ibipeba.

Essa estimativa das perdas, provavelmente descontínuas, é dificilmente extrapolável para outras bacias, porém sua importância, que ultrapassa o módulo, permite aquilatar o fenômeno. Infelizmente, o estudo dessa bacia não foi complementado com um estudo hidrogeológico.

TABELA 3.5.7 Estimativa das perdas na rede hidrográfica da bacia de IBIPEBA

	Volume	Lâmina escoada
Deflúvio que as diferentes unidades de solo deveriam produzir	2.700.000 m^3	8,5 mm
Deflúvio observado no exutório da bacia principal de 321 km^2	900.000 m^3	2,9 mm
Perdas estimadas na rede hidrográfica	1.800.000 m^3	5,6 mm

3.5.4.5 Aperfeiçoamento dos conhecimentos hidrológicos regionais.

Esse tipo de estudo sobre pequenas bacias é único no gênero nessa região e permite compreender melhor os mecanismos da gênese dos escoamentos, mecanismos esses que as estações da rede geral instaladas em bacias de tamanho nitidamente superior, não tornam possível sua compreensão. Com efeito, nessas grandes bacias, as perdas mencionadas anteriormente superpõem-se a ressurgências e restituições de descarga de base a partir dos aquíferos, tudo isto acontecendo em unidades geológicas diferentes.

Os valores dos escoamentos desse estudo são, entretanto, **dificilmente transferíveis** para outras bacias. Primeiramente, por causa da heterogeneidade e das descontinuidades espaciais que fazem com que seja maior a importância das características das zonas de **retenção** de água do que aquelas das zonas de **produção** de água que melhor explicam as variações dos regimes. Em seguida, porque a bacia de IBIPEBA é única em seu tipo nessa zona climática. As outras bacias sedimentares estudadas estão, com efeito, situadas em uma outra zona climática, SERTÃO NORTE, num contexto geológico e fisiográfico diferente e só foram acompanhadas durante pouco tempo, com outras técnicas de medição e de interpretação.

Para concluir de uma maneira prática, podemos dizer que os pequenos rios dessa região são, em geral, **pouco propícios à construção de pequenas barragens**; em primeiro lugar, por causa da fraqueza e da irregularidade dos escoamentos, em segundo lugar, porque a impermeabilidade dessas barragens é, em geral, insuficiente e, enfim, porque a utilização das águas subterrâneas entra em competição com técnicas de estocagem em pequenos reservatórios ou açudes.

3.6 CONCLUSÃO DA TERCEIRA PARTE:

▪ Informações proporcionadas pelas diferentes bacias

Cada bacia, a seu modo, permite compreender ou melhor conceber os vários aspectos do seu comportamento como, também, evidenciar uma complexidade insuspeitada dos mecanismos hidrológicos.

É o caso da bacia de **SUMÉ** cujos resultados permitiram, por um lado, propor uma quantificação do efeito da vegetação sobre o escoamento, porém também demonstraram a existência de circuitos muito complexos da água no solo. Os escoamentos relativamente fracos dessa bacia podem ser explicados pela presença de solos Podzólicos arenosos e/ou de solos Vérticos ou de zonas aluviais relativamente grandes.

Os escoamentos fracos constatados na bacia do **RIACHO DO NAVIO** podem ser explicados pela presença de Regossolos arenosos e espessos.

A bacia de **JUATAMA** permite compreender melhor o funcionamento de uma zona de forte relevo onde afloramentos rochosos estão a montante de zonas detríticas, nas quais se infiltra, provavelmente, uma grande parte do escoamento superficial.

Entre todas as bacias representativas situadas sobre embasamento cristalino, **TAUÁ** é, sem dúvida, a que traz a informação mais completa a respeito das bacias de superfície compreendidas entre um e dez km^2. Os dados recolhidos sobre quatorze pequenas bacias diferentes puderam ser utilizados para esboçar uma tipologia das bacias dessa região. Os escoamentos anuais são aí, em geral, mais elevados que nas bacias precedentes. A degradação da superfície do solo e da vegetação ou a presença de Solonetz são fatores que favorecem o escoamento. Ao contrário, a presença de solos Vérticos ou de vegetação densa o diminui. Os dados de TAUÁ puderam ser igualmente utilizados para estudar as variações das lâminas escoadas anuais em função de sua superfície ou da importância dos açudes presentes no interior da bacia.

Enfim, as bacias de **IBIPEBA** e um outro grupo de bacias situadas na bacia do Vale do JAGUARIBE[2] fornecem alguns elementos sobre o comportamento de bacias situadas sobre um subsolo de origem sedimentar. Seus solos são, em geral, mais espessos e geram escoamentos muito fracos e mais dificilmente previsíveis que as bacias situadas sobre embasamento cristalino. Sua irregularidade é muito grande e pode-se, aí, observar alguns fenômenos de Karst.

[2] Cujos resultados são apresentados em anexo.

■ Permeabilidade dos diferentes solos

O quadro a seguir resume os resultados das medições de permeabilidade efetuadas com o método de MUNTZ de todas as bacias e permite comparar a permeabilidade dos diferentes solos. Utilizaremos, mais adiante, os dados desse quadro para propor um reagrupamento e uma tipologia dos solos em função de seu comportamento hidrodinâmico[3].

TABELA 3.6.1 Permeabilidade de diferentes solos do Nordeste *segundo LEPRUN et al. (1983)*

SOLOS	Valor médio da permeabilidade (mm/h)	Desvio tipo	Permeabilidade
Solonetz (SS)	8,3	-	Muito lenta a lenta
Vertissolo (V)	23,6	-	Muito lenta a moderada
Bruno não Cálcico (NC)	31,9	9,3	Lenta a moderada
Litólico (R)	84,0	43,8	Moderada a rápida
Régososolo (RE)	91,7	39,6	Moderada a rápida
Planossolo (PL)	94,1	56,9	Moderada a lenta
Latossolo (LA)	170,6	-	Rápida a muito rápida
Podzólico eutrófico (P)	181,0	135,5	Moderada a rápida
Cambissolo (C)	213,4	-	Moderada a rápida
Areia quartzosa (AQ)	425,8	-	Rápida a muito rápida.

■ Ordens de grandeza características dos principais comportamentos hidrológicos.

As informações recolhidas em todas essas bacias mostram bem toda a complexidade e a variabilidade, no espaço e no tempo, de seus regimes hidrológicos nessa região semi-árida. Alguns números podem demonstrar diversos aspectos desses regimes:

- Escoamento anual médio : valores e variações

Nessas regiões semi-áridas, os escoamentos representam uma pequena parte das chuvas, 20 a 100 mm, na maioria dos casos, ou seja 3 a 15% das precipitações. Os coeficientes anuais médios de escoamento variam muito de uma para outra bacia. Porém, deixando-se de lado o caso do açude LUZIMAR e das microbacias erodidas de SUMÉ, **todos os coeficientes são inferiores a 15%:**

. 10 a 15% para as pequenas bacias que "escoam" muito;
. 2 a 8% para a maioria das bacias que são, em geral, maiores e onde certas zonas quase não apresentam escoamento ou podem até reter uma parte dos escoamentos que provém de outras zonas;
. 0 a 2% para as bacias das zonas sedimentares de IBIPEBA.

[3] Os dados desse quadro deverão ser utilizados com precaução, por um lado porque o método de medição da permeabilidade utilizado não permite explicar certos aspectos hidrodinâmicos, tais como, os *efeitos de superfície* ou as infiltrações laterais nos Planossolos e, por outro lado, por causa do pequeno número de medições efetuadas em certos tipos de solos que não garantem uma representatividade para todo o Nordeste.

- Variação do módulo em função da pluviometria

O módulo médio interanual aumenta (ou diminui) aproximadamente 40% para cada 100 mm suplementar (ou menos) da pluviometria anual média.

- Variabilidade no tempo dos escoamentos

No decorrer de cada ano, a maior parte dos escoamentos sobrevêm geralmente em muito pouco tempo. Alguns dias ou semanas, no máximo.
De um ano para outro, os escoamentos se afastam consideravelmente de sua média. Assim, o valor anual decenal úmido é da ordem do triplo da média, o trienal úmido está próximo da média, o trienal seco (ou escoamento garantido dois anos em três) é apenas a quarta parte da média. Quanto ao módulo decenal seco, é nulo ou muito fraco.

Circunstância agravante, os anos com escoamentos excedentes ou deficitários parecem chegar por "*pacotes*". Isto é confirmado pelos coeficientes de autocorrelação de MARKOV das séries pluviométricas anuais que estão, geralmente, compreendidos entre 0,10 e 0,30. Em termos de escoamento isto significa que, em cada vinte anos, sobrevirá um período deficitário de três anos consecutivos, durante o qual a soma dos escoamentos não ultrapassará a metade da média anual.

Essa variabilidade extrema resulta da conjugação de dois fatores:

. **A grande variabilidade das precipitações.** Os coeficientes de variação CV dos totais anuais são elevados, superiores a 0,3 e mesmo a 0,4. A relação K3 entre as alturas da frequência decenal seca e úmida é particularmente elevada, podendo ultrapassar 3. À irregularidade de distribuição dos totais anuais vem juntar-se a da distribuição estacional do pequeno número de chuvas convectivas que determinam a maior parte das descargas. Assim, a um mesmo total de chuva anual pode corresponder escoamentos muito diferentes.

. **O escoamento representa a parte da chuva que não é interceptada.** Assim, um coeficiente de escoamento da ordem de 10% corresponde **a um déficit de escoamento de 90%**. Uma fraca variação relativa desse déficit acarretará uma variação relativa, bem mais importante, dos escoamentos. Ora, os fatores objetivos suscetíveis de modificar esse déficit são inúmeros: retenção da água nos barreiros, ou aquíferos confinados; variação das intensidades da chuva que provoca (ou não) o escoamento superficial; modificação do estado da superfície do solo ou da vegetação, etc.

- Parte do escoamento superficial no escoamento total:

A maior parte dos escoamentos dessas zonas semi-áridas provêm do escoamento superficial direto ou retardado, mas diretamente ligado às cheias. O volume da cheia de freqüência decenal é, em geral, compreendido entre 30 e 150% do módulo anual médio.

QUARTA PARTE

4. TRANSPOSIÇÃO DOS ESCOAMENTOS ANUAIS

"A transposição dos resultados é uma operação que deveria ser habitual cada vez que se instala uma bacia representativa".
(J. RODIER, 1982)

A elaboração de um método simples e prático que permita a transposição dos escoamentos anuais para bacias sem informação hidrológica, constitui o objeto deste capítulo.

4.1 OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

Ou como estabelecer regras de transposição.

É preciso, agora, estabelecer **regras práticas** que permitirão precisar as ordens de grandeza dos parâmetros característicos dos regimes hidrológicos, em função das particularidades de cada bacia. Trata-se de tentar generalizar, nos 800.000 km^2 do Nordeste semi-árido, as tipologias de bacias estabelecidas localmente nas microrregiões das bacias de TAUÁ, SUMÉ, RIACHO DO NAVIO, JUATAMA e IBIPEBA.

A elaboração dessas regras práticas diz respeito, sobretudo, à **transposição dos escoamentos anuais médios**, de sua curva de distribuição frequencial. Indicaremos, no quinto capítulo, os resultados concernentes à transposição das características da **cheia decenal**. O conhecimento das recessões apresenta pouco interesse nessa região onde os rios secam todos os anos. Infelizmente não dispomos de dados suficientes a respeito da qualidade da água, da quantidade de sais e de sedimentos transportados pelos rios, temas que correspondem a problemas e a obstáculos importantes para a utilização racional dos recursos hídricos do Nordeste.

Veremos que a **estratégia empregada** para atingir esses objetivos não é simples e necessitará o emprego de certo número de artifícios.

Princípios de base de nosso trabalho

Resumimos os princípios essenciais de nosso trabalho:

a) **Os módulos anuais e as cheias serão estudadas separadamente.** Com efeito, os módulos correspondem à soma de um grande número de eventos chuva x descarga, cujo baricentro ou valor mais freqüente corresponde às cheias de média importância que são as mais freqüentes, enquanto a cheia decenal é relativa ao escoamento superficial de um aguaceiro excepcional. Outra diferença: as características das cheias variarão em função do tempo de transferência hidráulica dos volumes escoados na rede de drenagem, parâmetro que não influencia os módulos.

b) Deve apoiar-se sobre uma **modelização sistemática dos comportamentos hidrológicos** das bacias hidrográficas representativas que permitirão a abstração das particularidades climáticas dos períodos observados. Constatamos a necessidade de realizar essa correção em várias bacias hidrográficas.

c) Empregar-se-á **toda informação disponível**, apesar dela ser, ainda, muito insuficiente:

* Informação fornecida pelas bacias hidrográficas representativas.

* Informação obtida através da rede geral hidropluviométrica de base do Nordeste. Utilizar-se-á, especialmente, a informação propiciada pelas grandes bacias que integram os escoamentos das pequenas bacias que as compõem.

* Informação e resultados proporcionados pelas parcelas experimentais (escoamento, erosão), manejadas por vários institutos de pesquisa agronômica do Nordeste.

* Medições de infiltração dos diferentes solos; informação, experiência e conselhos dos pedólogos e botânicos.

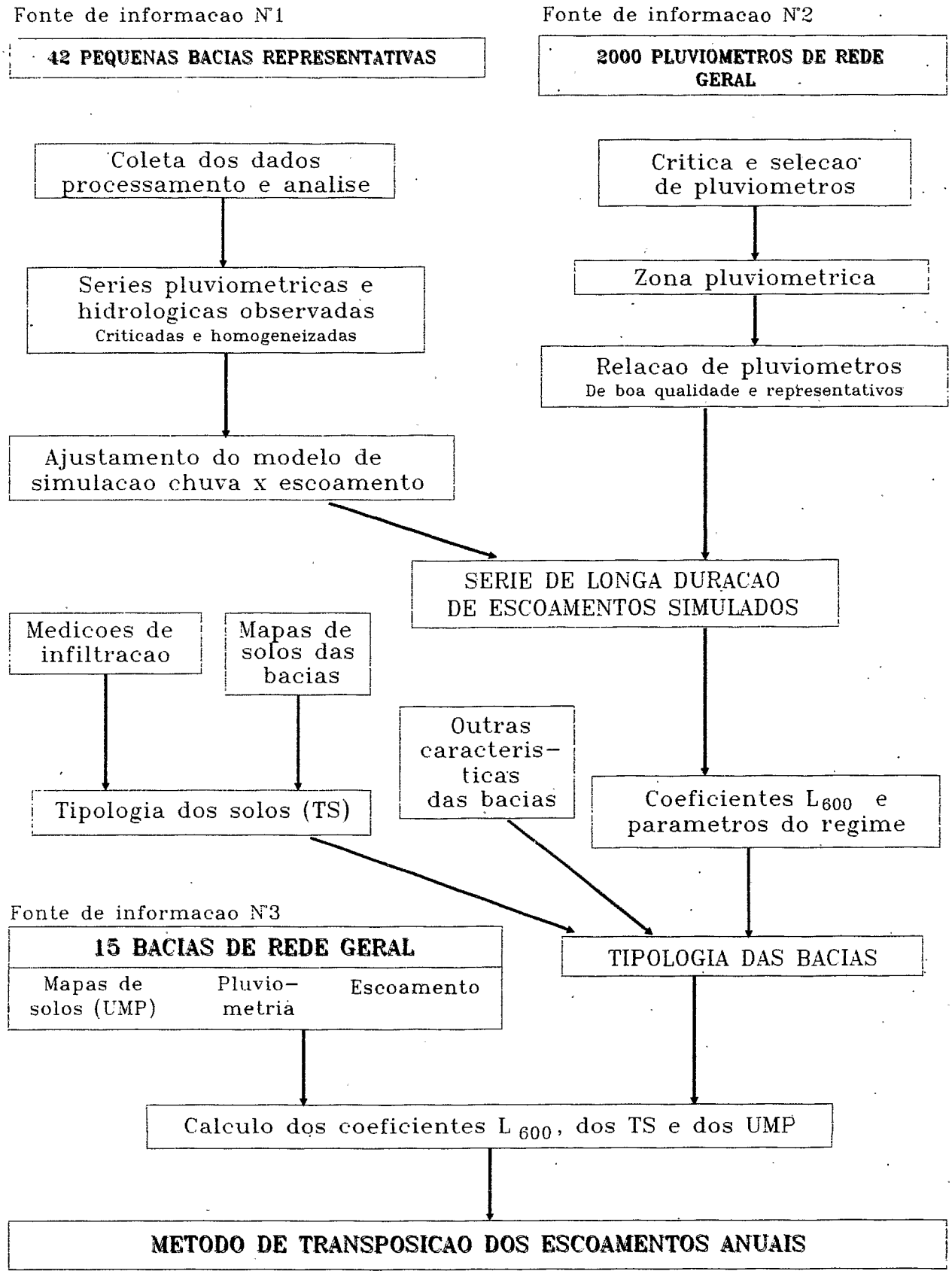
* Conhecimento dos mecanismos hidrológicos adquiridos no Brasil ou em outras regiões semelhantes do globo.

Principais etapas a serem cumpridas

As principais etapas do noso trabalho, que parece se apresentar como uma *corrida de obstáculos*, decorrem dos princípios que apresentamos anteriormente e das dificuldades que foi preciso contornar. Estas etapas são as seguintes:

a) **Coleta, processamento, análise** e **modelização** de toda informação hidropluviométrica utilizável, relativa aos comportamentos das pequenas bacias (*fonte de informação nº 1*).

Figura 4.1 : Principais etapas da elaboração de um método de transposição dos escoamentos anuais de bacias do Nordeste do Brasil.



b) Determinação das **zonas climáticas** para as quais esses modelos hidropluviométricos são válidos. Seleção de pluviômetros representativos de cada zona (*fonte de informação nº 2*).

c) **Interpretação dos resultados** através da determinação de uma tipologia das bacias estudadas e tentativa de estabelecimento de **regras de transposição** dos parâmetros hidrológicos para bacias desprovidas de informação hidrológica. Constatou-se ser difícil elaborar, diretamente, as regras que permitissem uma determinação quantitativa dos escoamentos anuais, a partir da tipologia qualitativa das bacias. Para isso, as duas etapas suplementares (d) e (e), descritas a seguir, serão necessárias.(*Fonte de informação nº 3*).

d) **Utilização da informação complementar** fornecida, primeiramente, pelas bacias da rede geral do semi-árido, para calcular os valores médios dos **escoamentos provocados pelos diversos tipos de solo**. Depois, emprego de toda informação disponível, proveniente, por exemplo, dos institutos de pesquisa agronômica, do Programa Açude, ou de resultados de pesquisas de qualquer tipo, a fim de propor correções que serão necessárias quando a **vegetação**, **o estado da superfície do solo** ou a **densidade do açude** se desviarem do normal.

d) **Validação** do método de transposição hidrológica proposto, com as bacias hidrográficas representativas da SUDENE que não tenham sido utilizadas para os cálculos.

O organograma da figura 4.1 mostra o encadeamento das principais etapas.

4.2 MODELIZAÇÃO HIDROLÓGICA DAS PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DO NORDESTE

Tudo começa pela concepção dos modelos...

A utilização de modelos de simulação hidrológica ajustados às séries de chuvas e de descargas observadas para calcular séries fictícias de escoamento chamadas de "longa duração" e de boa qualidade, constitui um preâmbulo indispensável para corrigir as condições climáticas específicas dos períodos muito curtos de observação das bacias representativas.

Isso se baseia no postulado que afirma: a melhor estimativa de uma lei de distribuição estatística é obtida quando o tamanho da amostra é o maior possível, mas não chegaremos a abordar o tema dos ciclos ou mudanças climáticas de grande amplitude. Os resultados que apresentaremos correspondem, com efeito, a uma tentativa de estimativa dos regimes hidrológicos dos sessenta a oitenta últimos anos. Para que o aperfeiçoamento da estimativa realizada com ajuda de uma série pluviométrica chamada "*longa duração*" seja significativa, é preciso que o ganho de precisão obtido com o aumento do tamanho da amostra seja superior aos desvios ocasionados pelo modelo. Isso mostra a necessidade de realizar a melhor modelização possível, etapa fundamental deste trabalho.

O modelo utilizado, chamado SUDENE-ORSTOM, é derivado de um modelo descrito por PUNGS e CADIER (1983) e por DOHERTY *et al* (1992). Este modelo foi criado em 1980, para responder às necessidades específicas da modelização dos pequenos cursos intermitentes de água do Nordeste. DOHERTY *et al* descreveram e justificaram, de maneira detalhada, os algorítmos deste modelo, as técnicas de ajustamento utilizadas, as medidas adotadas em caso de lacunas dos dados, o número e a qualidade dos ajustamentos e as validações realizadas. Resumiremos, a seguir, os pontos mais importantes.

4.2.1 Algorítmos utilizados pelo modelo SUDENE-ORSTOM

O modelo SUDENE-ORSTOM é um modelo estatístico global, funcionando com intervalos diários. A função de produção é inspirada naquela descrita por GIRARD (1979) para seu modelo simplificado, ela permite calcular uma lâmina escoada Le em função da precipitação diária P e de um índice das precipitações anteriores IK.

a) Cálculo do índice de precipitações anteriores IK:

Cálculo diário de um índice de precipitações anteriores IK, do tipo KOHLER (1951), pela fórmula:

$$IK_{dia\ i} = (IK_{dia\ i-1} + P_{dia\ i-1}) * CI$$

onde CI é o índice de redução diária de IK e P a precipitação.

b) Cálculo do escoamento superficial: as hipérboles

Três hipérboles tangentes ao eixo das abscissas são traçadas no plano (P,Le), como mostra o esquema da figura 4.2.1. Cada uma dessas hipérboles corresponde, por definição, a um valor constante de IK. Esse gráfico mostra como calcular a lâmina escoada (Le) adequada a P e IK.

- **Utilização das hipérboles:**

O cálculo do escoamento superficial para um determinado IK é efetuado por interpolação linear sobre IK, entre as ordenadas das duas hipérboles cujos valores de IK inserem o proposto.

Extrapolação, limites superiores e inferiores de IK: Se o valor do IK proposto é superior ao da hipérbole que tem o maior valor IK(1), compara-se esse valor com o limite superior dos IK(IKx) e o reconduz a esse valor se ele o ultrapassa. O cálculo do escoamento superficial é feito, em seguida, por extrapolação linear sobre IK, tendo em vista as ordenadas das duas hipérboles superiores. Procede-se de maneira inversa quando o valor de IK proposto é inferior ao valor da hipérbole mais baixa.

- **Interesse das hipérboles:**

O principal interesse dessas hipérboles é seu comportamento muito semelhante, no plano (P,Le), das isolinhas IK = constante, traçadas empiricamente, plotando nesse plano os valores de P, Le e IK de cada uma das cheias observadas, como é mostrado, por exemplo, pelas curvas das figuras 3.3.6 ou 3.4.4, elaboradas para as bacias do RIACHO DO NAVIO e de JUATAMA.

Essas hipérboles podem ser diretamente ajustadas ao conjunto dos tripletos (P, Le, IK) que correspondem a cada cheia, sem que seja necessário efetuar qualquer hipótese sobre o modo e as equações de funcionamento hidrológico da bacia.

Uma hipérbole constitui uma função analítica econômica em número de parâmetros que responde às duas condições seguintes:

-ser tangente ao eixo das abscissas;
-apresentar uma direção assimptótica.

Essa é uma das razões da sua escolha.

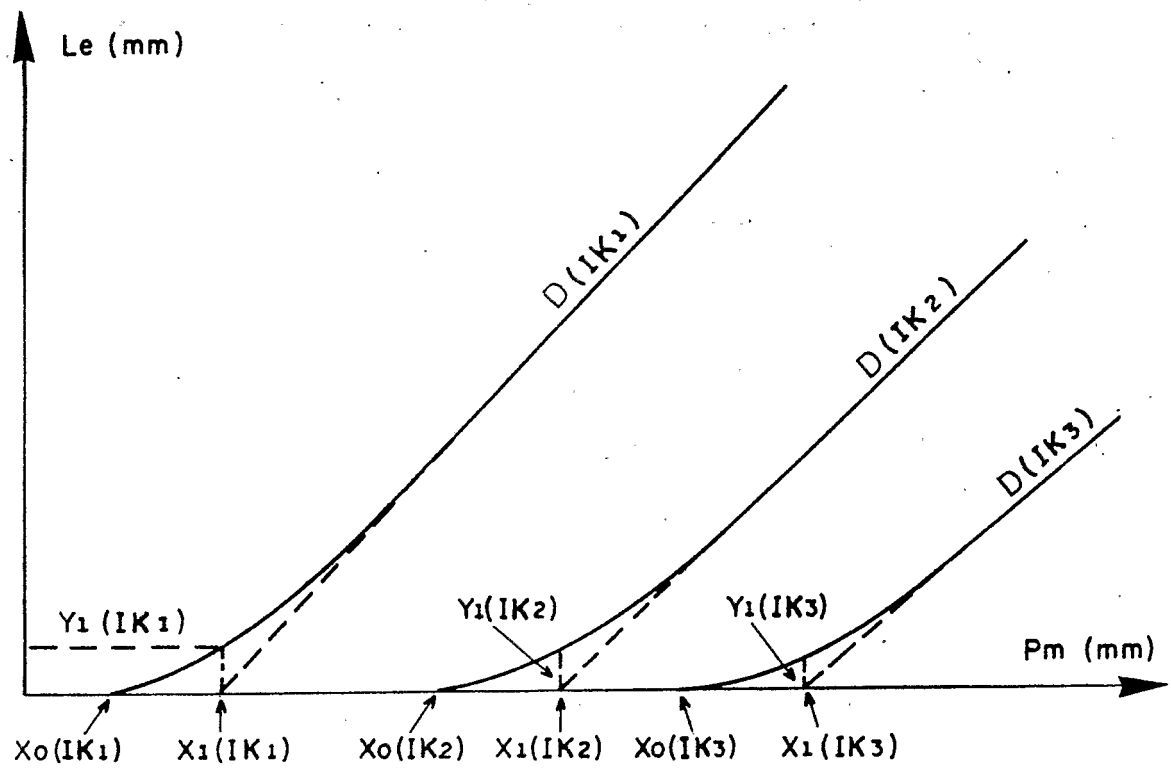


Figura 4.2.1: Parametrização das hipérboles.

- **Parametrização das hipérboles:**

Buscamos, primeiramente, definir as hipérboles da maneira mais simples possível, visando facilitar o trabalho do usuário.

Cada hipérbole é definida pelos quatro parâmetros seguintes, que têm uma representação gráfica evidente:

X_0 : Ponto de tangência da hipérbole com o eixo das abcissas. X_0 refere-se ao que se chama a "precipitação limite de escoamento" que corresponde ao valor IK da hipérbole.

D : Declividade da assimptótica da hipérbole. Essa declividade corresponde ao que se poderia chamar um "coeficiente marginal de escoamento de saturação", isso é, a proporção de água suplementar que escoará para cada quantidade de chuva suplementar, quando é possível estimar que a hipérbole é confundida com sua assimptota.

X_1 : Abscissa da intersecção da assimptota com o eixo das abscissas.

Y_1 : Ordenada da hipérbole para a abscissa X_1.

Cálculo da lâmina escoada LE a partir da chuva diária PM, por uma hipérbole tangente ao eixo das abscissas (Adaptado de J.M. HERBAUD; inédito, 1983).

Este cálculo foi definido com a ajuda das seguintes instruções FORTRAN:

Calcular o discriminante DISCRIM=2.*Y1-D*(X1-X0)

1º caso: O discriminante não é nulo

```
DCLI=Y1**2/(X1-X0)/DISCRIM  DCLI não deve ser nulo
SDCLI=DCLI/ABS(DCLI)        SDCLI é o sinal de DCLI
DCLMI=(D+DCLI)/2            DCLMI não deve ser nulo
DDCLI=D-DCLI                DDCLI não deve ser nulo
C=DCLMI*X0-X0*DDCLI**2/4./DCLMI-D*X1
Q=DDCLI*DCLMI*C/D
N=-D*X1-Q/DDCLI
R=(DCLMI*X0-D*X1-DCLMI*C/D)**2-(DDCLI*X0)**2/4.-Q*X0
```

```
-------------------------------------------------
LE = DCLMI*PM+N-SDCLI*SQRT((DDCLI*PM)**2/4.+Q*PM+R)
-------------------------------------------------
```

2º caso: O discriminante é nulo. A 2ª assimptota é então vertical.

```
N = X1 - 2.* X0
Q = -2.* D * X0
R = D* X0 ** 2
```

```
----------------------------
LE = (D*PM*PM+Q*PM+R)/(PM+N)
----------------------------
```

c) Número de parâmetros do modelo:

O número de parâmetros do modelo SUDENE-ORSTOM é muito elevado:

. Cada uma das hipérboles é definida por seu valor de IK e dos 4 parâmetros: , X_1, Y_1 e D.

. É preciso, também, definir o valor do coeficiente CI de redução diária de IK e os limites superiores e inferiores de IK.

Isso corresponde a um total de 18 parâmetros, o que parece absolutamente proibitivo, sobretudo quando se sabe que a tendência atual em modelização é diminuir, ao máximo,o número de parâmetros.

Porém, na prática, para o ajustamento desse modelo, não se utiliza todos os graus de liberdade teoricamente disponíveis. Evita-se, se possível, modificar o aspecto das hipérboles cujo traçado foi efetuado, diretamente, a partir das cheias. Deve-se limitar a pequenos aperfeiçoamentos a partir do traçado inicial. Essas correções afetam sobretudo os valores de X_0 e X_1 que não podem ser avaliados com precisão a partir da amostra das cheias.

Assim, efetuadas essas poucas correções e quando não se detecta anomalias, os ajustamentos são feitos, na realidade, sobre 3 a 5 parâmetros (os três valores IK1, IK2 e IK3 e eventualmente, seus limites superiores e inferiores IKX e IKN). Isso corresponde ao número de graus de liberdade dos modelos usuais.

d) Escoamento de base:

Para representar o escoamento de base que se observa sobre algumas grandes bacias, dois "pseudo-reservatórios" foram adicionados ao modelo. Eles podem demonstrar o escoamento simultâneo de dois aquíferos: o aquífero com escoamento rápido e o aquífero com escoamento lento. Esses "pseudo-reservatórios" são alimentados pelos escoamentos das cheias e não pelas chuvas, como acontece habitualmente. Isso foi feito com a finalidade de impedir todo risco de produção intempestiva de escoamento de base pelo modelo, na ausência de qualquer cheia anterior. Essa parte do modelo utiliza, quando ela existe, 3 ou 6 parâmetros suplementares. Os valores iniciais desses parâmetros são determinados a partir das declividades das curvas de recessão observadas.

4.2.2 Apresentação de um exemplo de ajustamento

Por razões históricas de acessibilidade aos dados e de rapidez de execução, o contexto utilizado para os ajustamentos é o sistema informático de grande porte IBM CMS/VS da SUDENE que opera, igualmente, o Banco de Dados Hidrometeorológicos do Nordeste brasileiro. Os microcomputadores foram utilizados para a apresentação dos resultados e elaboração dos gráficos finais.

O diagrama da figura 4.2.2 indica as principais etapas de um ajustamento realizado com o modelo SUDENE/ORSTOM.

Escolhemos como exemplo, a bacia do riacho CALDEIRÃO, com 0,77 km^2 de superfície, que pertence à bacia experimental de Tauá e possui 8 anos de dados de boa qualidade. A seção de medição dessa estação hidrométrica é estável, o que é primordial.

4.2.2.1 Inicialização do ajustamento

A primeira etapa do ajustamento consiste em criar, a partir do Banco de Dados, um arquivo especial chamado "**FLUPLU**" que contenha as chuvas e as descargas diárias do período e da bacia a ajustar. É preciso, também, determinar os valores iniciais dos parâmetros das hipérboles a partir das curvas da figura 4.2.3 que representa a relação entre a chuva Pm, a lâmina escoada Le e o índice de saturação prévia IK, para as principais cheias da bacia.

Tabela 4.2.1 Valores iniciais dos parâmetros das hipérboles do posto de Caldeirão.

IH	X0	X1	Y1	D
150	2,5	4,0	1,0	0,54
90	5,5	15,5	2,0	0,50
30	17,0	27,6	2,2	0,37

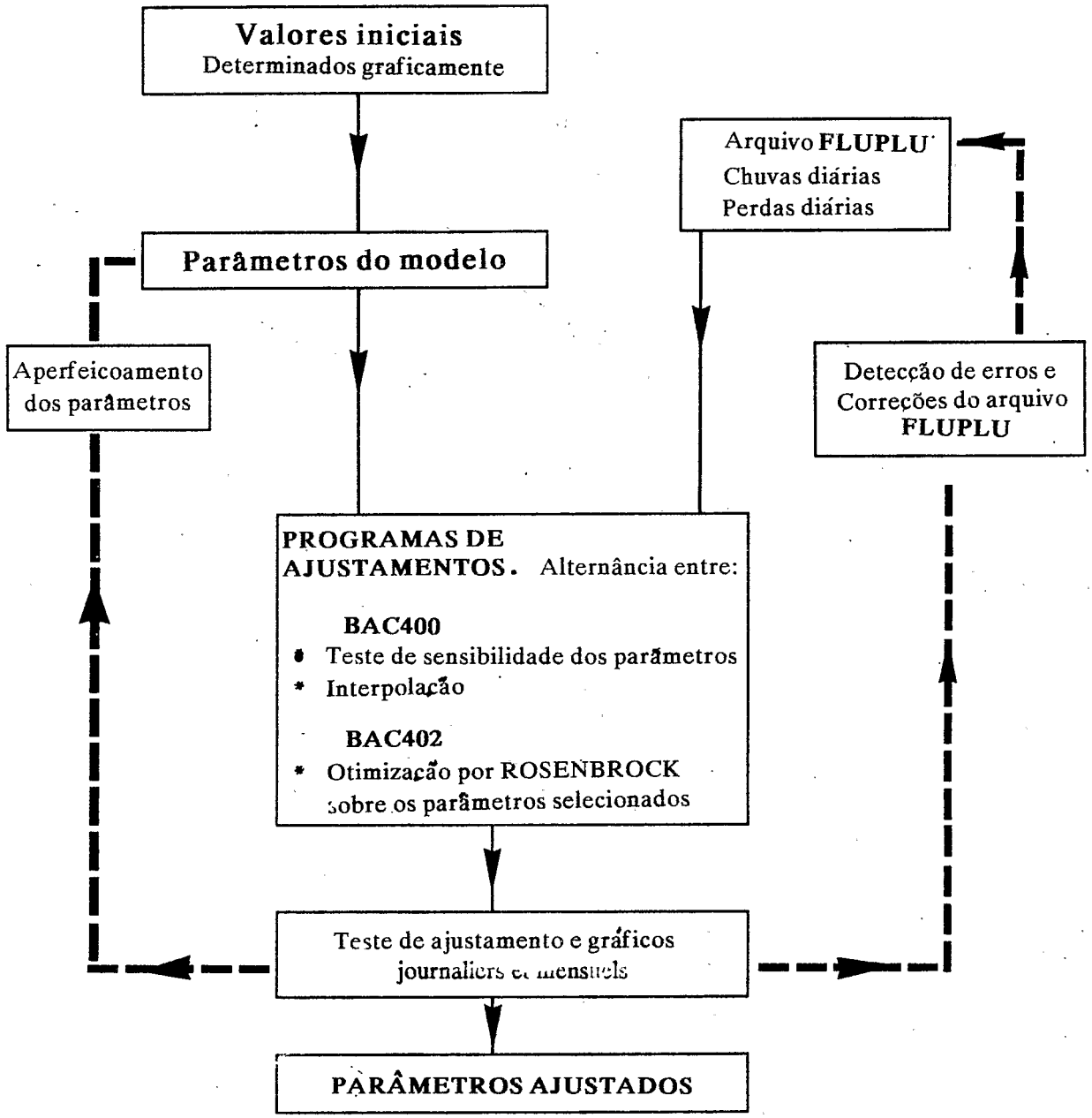
4.2.2.2 Os programas de ajustamento do modelo

A calibragem ou o ajustamento de um modelo procura aproximar, da melhor forma possível, as descargas calculadas das descargas observadas. Para isso, tem-se que executar um e/ou outro dos dois programas de ajustamento BAC400 e BAC402, tantas vezes quantas forem necessárias.

Estes dois programas têm funções específicas diferentes e complementares:

- **O programa BAC400** permite efetuar o que denominamos um *"teste de sensibilidade"* para cada um dos parâmetros do modelo. Este teste quantifica a influência de uma pequena variação de cada parâmetro sobre as descargas calculadas pelo modelo e sobre os valores dos diferentes critérios de ajustamento escolhidos. Colocando-se no sistema ou espaço composto por todos os parâmetros do modelo, o BAC400 calcula, utilizando um algorítmo baseado no princípio da procura da maior declividade, a direção "ótima" para aperfeiçoar o critério escolhido (*"steepest slope"* em inglês).

Figura 4.2.2: Principais etapas do ajustamento do modelo SUDENE/ORSTOM



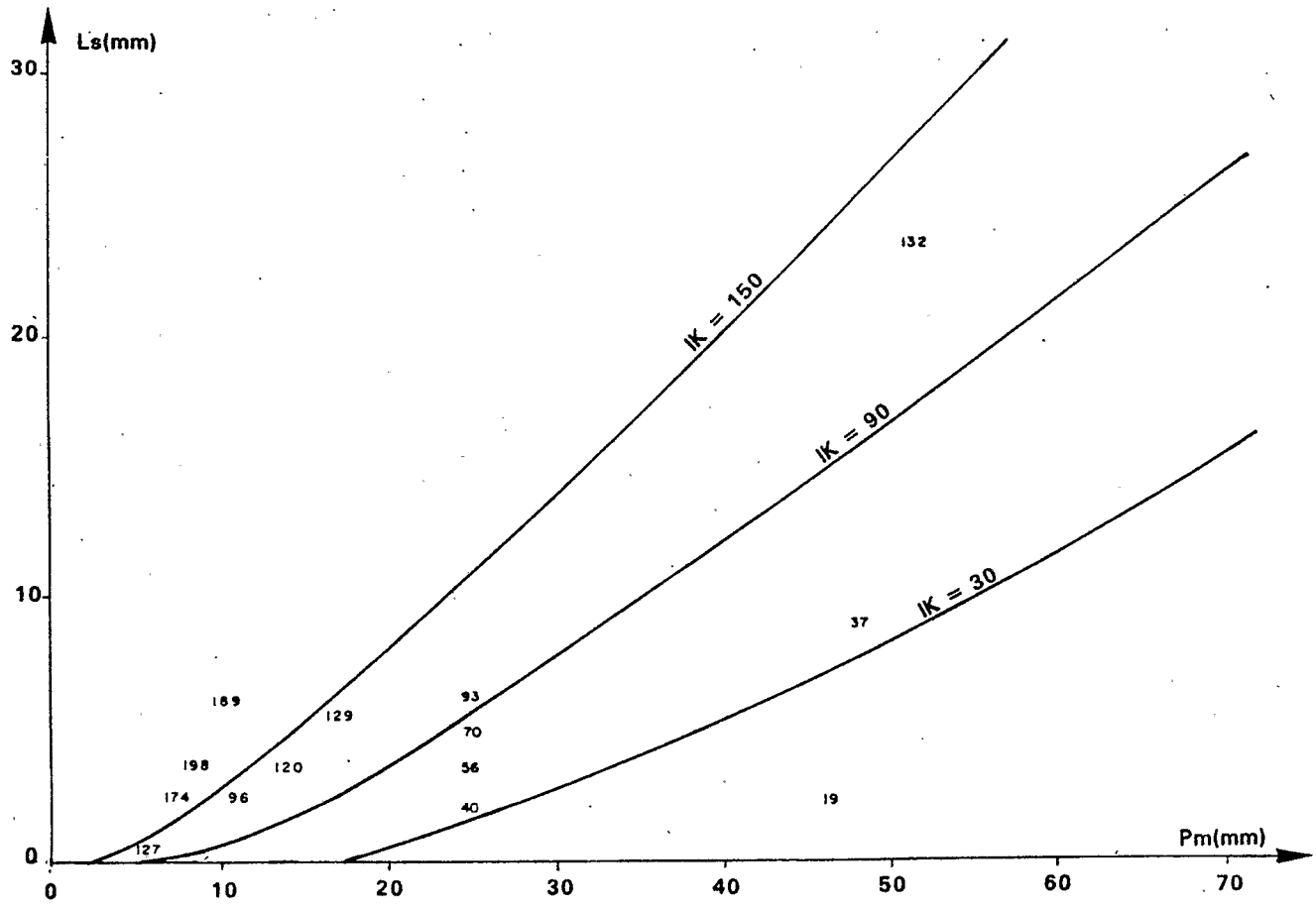


Figura 4.2.3: Relação entre a chuva (Pm), o escoamento (Ls) e o índice de precipitação anterior (IK). *(Posto de Caldeirão)*

Este programa permite, também, efetuar uma ou várias interpolações lineares entre dois conjuntos de parâmetros.

. **O programa BAC402** é uma adaptação, realizada por M. MONTGAILLARD, que utiliza o algorítmo de ROSENBROCK (1960), para efetuar um ajustamento automático de um ou vários parâmetros do modelo.

Os dois programas BAC400 e BAC402 fornecem várias saídas que permitem uma melhor avaliação da qualidade do ajustamento:

- Comparação entre as descargas observadas e calculadas, efetuada a nível diário e mensal, através de gráfico com escala aritmética e/ou logarítmica.
- Traçado das hipérboles.
- Quadro resumindo os valores dos critérios de ajustamento.

Comparação dos algoritmos de ajustamento dos programas BAC400 e BAC402

O programa BAC400 indica em que proporção é preciso fazer variar simultaneamente cada parâmetro, sem indicar a "distância" a percorrer. Este método original, desenvolvido em Recife é teoricamente mais econômico em número de iterações e em tempo de cálculo do que o de ROSENBROCK (1960), que efetua otimizações sucessivas e independentes para cada um dos parâmetros. No entanto, a utilização do programa BAC400 é delicada, isso porque, no espaço dos N parâmetros, a curvatura da superfície ótima varia de maneira diferente para cada parâmetro, e se a direção ótima definida num determinado ponto, pode ser seguida por uma grande distância por alguns parâmetros, pode ser muito menos para outros parâmetros; alguns deles podem sair rapidamente do seu domínio de validade. Por outro lado, o programa BAC400 mostra-se incapaz de extrair-se de um extremo secundário, como pode fazê-lo, algumas vezes, o método de ROSENBROCK, utilizado no programa BAC402. Com efeito, quando ROSENBROCK constata que um determinado parâmetro apresenta certo número de insucessos consecutivos, ele efetua uma tentativa com uma distância muito maior, o que lhe permite, algumas vezes, descobrir um outro extremo. Notamos, no entanto, que as eventuais ocorrências de bloqueamento sobre extremos secundários são raras, uma vez que a otimização começa, em teoria, em uma zona relativamente próxima do ótimo procurado.

Na prática, alternam-se os programas BAC400 e BAC402; o primeiro permite uma melhor avaliação da situação global para definir uma estratégia de ajustamento, isto é, identificar os parâmetros que se tentará modificar, enquanto que o segundo permite uma otimização numérica rápida dos parâmetros selecionados.

No início dos ajustamentos fomos, freqüentemente, levados a verificar e a corrigir os períodos de chuva ou de descarga incoerentes com o restante dos dados. **A modelização mostra ser, assim, um método muito eficaz de consistência da informação hidropluviométrica.**

Para concluir, será sempre efetuado um ajustamento fino com o programa BAC400. Assegurar-se-á, em particular, que a soma das lâminas calculadas aproxima-se da soma das lâminas observadas.

4.2.2.3 Apresentação de um exemplo de modelo ajustado (Tabela 4.2.2)

No exemplo de ajustamento que apresentamos no quadro 4.2.2, que se refere também à bacia de Caldeirão, em TAUÁ, encontramos sucessivamente:

a) Os parâmetros do modelo:

Os parâmetros do modelo definem as três hipérboles. Esse modelo não leva em consideração escoamento de base. Notamos que o coeficiente de redução diária, CI, é de 0,938, valor diferente do coeficiente de 0,95 que temos adotado de modo geral, como indicado no parágrafo 4.2.3.3. Constata-se que os valores finais dos parâmetros das hipérboles resultantes da otimização são próximos dos valores iniciais, determinados graficamente na figura 4.2.3 e incluídos no quadro 4.2.1.

b) Os termos do balanço:

Os termos do balanço hidrológico mensal e as figuras 4.2.5 e 4.2.6 permitem avaliar, mês a mês e ano a ano, a coerência dos ajustamentos. Por razões de espaço, eliminamos da figura 4.2.5, os períodos sem escoamento de duração superior a um dia. Essa "compressão" do gráfico, complica um pouco sua interpretação, visto que, por exemplo, a última cheia de um ano não será separada da primeira cheia do ano seguinte.

c) Os resultados finais e os critérios de ajustamento:

Um primeiro quadro resume, ano a ano, os resultados dos ajustamentos. Indica também a porcentagem das descargas que tiveram de ser reconstituídas por causa de lacunas (é a diferença entre as colunas "observado" e "preenchido"). Pode-se, também, estimar a proporção do escoamento de base. As diferenças entre descargas calculadas e observadas são computadas a níveis diário e mensal. Determina-se, em seguida, as somas dessas diferenças (denominadas valor relativo), de seus quadrados e de seus valores absolutos, somas que deverão ser minimizadas.

Dois critérios de otimização, chamados **GERAL** e **PICO,** como também os cinco critérios definidos por SERVAT e DEZETER (1990), foram também calculados. Proporcionaremos mais explicações no parágrafo seguinte.

Cálculo dos critérios por "evento"

Para atenuar certas defasagens que podem atingir 24 h, entre as séries hidrológicas de chuva e de descarga, devidas a diferenças no processamento destes dois tipos de informação, calculamos uma variante dos critérios de ajustamento diário chamada "*por evento*". A primeira etapa do cálculo dos critérios "por evento" consiste em identificar o que chamamos um evento, isto é, um conjunto de dias consecutivos de escoamento durante os quais as lâminas escoadas diárias são superiores a 5% da lâmina mais forte do evento. Para cada evento identificado desloca-se, se necessário, a série das descargas calculadas em 24 horas para frente ou para trás, a fim de minimizar o critério de ajustamento. O esquema 4.2.4 ilustra os dois tipos de correção ou de deslocamento possível.

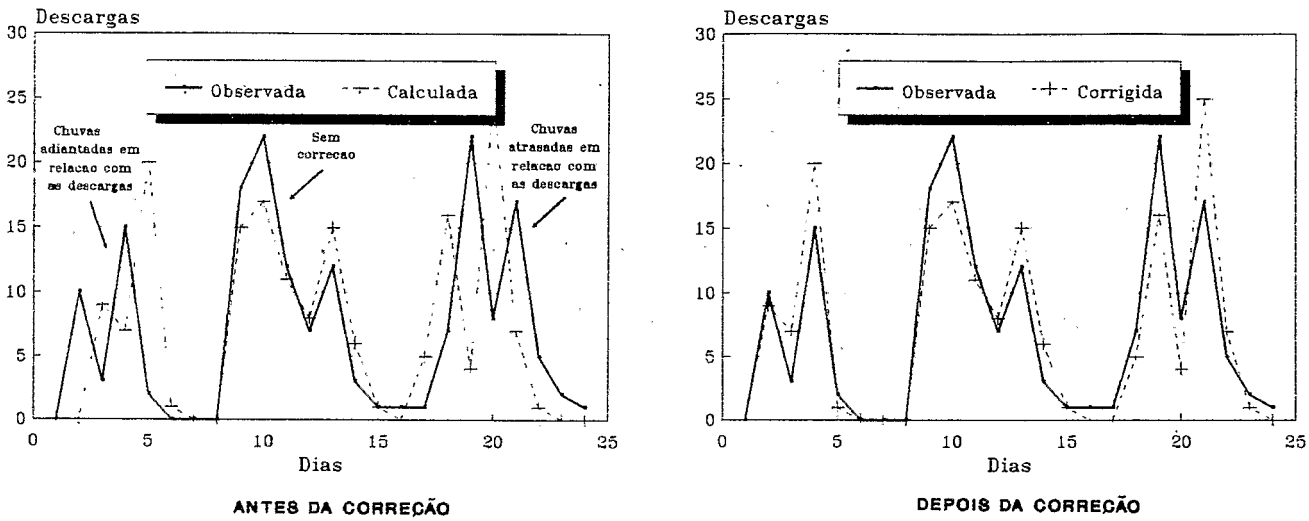


Figura 4.2.4: Correção automática "*por evento*"

d) Os testes de sensibilidade

O último quadro apresentado neste exemplo fornece o que chamaríamos a **sensibilidade do ajustamento em função das variações de cada parâmetro**. É uma espécie de "*painel de controle*" que reúne todos os elementos necessários para aperfeiçoar manualmente o ajustamento (em oposição ao método de ROSENBROCK que é automático).

Encontra-se sucessivamente neste quadro:

- Primeira e segunda colunas: o parâmetro testado **PAR(I).**
- Terceira e quarta colunas: duas relações chamadas **R2 e R4** que são calculadas a partir das consequências de uma pequena variação do referido parâmetro sobre **o critério de ajustamento diário** e sobre o total das lâminas calculadas:

$$R2(I) = \frac{\text{Variação do critério calculado com os quadrados}}{\text{Variação da lâmina calculada}}$$

Em seguida, o cálculo introduz uma relação R3, não impressa no exemplo e que é definida por:

$$R3(I) = \frac{\text{Variações do critério calculado com os valores absoluto}}{\text{Variação da lâmina calculada}}$$

R4(I) toma o valor de R2(I), quando R2(I) e R3(I) são do mesmo sinal e (zero) no caso contrário.

Dois outros coeficientes, **R2** e **R4**, são calculados de maneira análoga, **mas, utilizando os critérios calculados a nível mensal.**

- Sétima coluna: **Incr1mm.** É o valor necessário a acrescentar ao parâmetro PAR(I), para aumentar em 1 mm o total das lâminas calculadas.

- Uma última coluna, não apresentada neste exemplo, indica a **direção** no espaço dos parâmetros o que melhora o mais rápido possível, o ajustamento. Esta coluna foi suprimida visto que apresentamos um modelo já ajustado, para o qual não podemos evidenciar essa direção. A direção proposta pelo programa seria, neste caso, sem grande significação.

Utilização do quadro dos testes de sensibilidade dos parâmetros:

Este quadro foi concebido para facilitar as modificações dos parâmetros do modelo e aperfeiçoar, rapidamente, o ajustamento, sem modificar sensivelmente a lâmina calculada total. Isso supõe, implicitamente, que o primeiro critério de ajustamento é a igualdade dos totais das lâminas calculadas e observadas.
Assim, se alguém quer modificar simultaneamente N parâmetros[1], cuja média dos coeficientes **R4** é **MR4**, será preciso alterar cada um deles proporcionalmente à quantidade

$$\text{Incr1mm}(I) * (R4(I) - MR4)$$

Incr1mm(I) e R4(I) são oriundos do quadro dos testes de sensibilidade; I é a ordem do parâmetro.

Essa direção dá um peso preponderante aos parâmetros mais sensíveis (R4 forte), mantendo a lâmina escoada quase constante. A direção "*ótima*" indicada, poderá ser, em seguida, explorada até que se encontre um extremo ou se ultrapasse os limites razoáveis para um dos parâmetros, provocando, por exemplo, o cruzamento de duas hipérboles ou, ainda, precipitações limites de escoamento muito fracas, etc.

[1] Estes parâmetros são aqueles cujos coeficientes R4 são elevados e para os quais a análise das figuras 4.2.3, 4.2.5 e 4.2.6 não deixa prever nenhuma "contra-indicação".

Exemplo numérico:

O exemplo numérico, a seguir, ajudará a melhor compreender a seqüência dos cálculos realizados pelo programa BAC400. Suponhamos que se procura otimizar o ajustamento apresentado em função dos índices IK(1), XO(2) e D(3), na base do critério por evento, precisará, então, modificar estes três parâmetros, proporcionalmente, ao vetor "D" do quadro a seguir:

Parâmetro		R4	Incrlmm	D = Incrlmm*(R4-MR4)	2*D	ENSAIO
IK(1)	130,05	4,06	-0,10	-0,05	-0,1	129,95
XO(2)	6,11	4,93	-0,24	-0,32	-0,64	5,47
D(3)	0,31	1,77	0,01	-0,002	-0,036	0,274
	MR4 =	3,59				

Calculamos a modificação efetuada multiplicando-se, neste exemplo, esse vetor D por um escalar 2. Nota-se que as variações propostas para os parâmetros XO(2) e D(3) são muito mais importantes, em valor relativo, do que para IK(1); esses dois parâmetros sairão mais rapidamente do seu domínio de validade. A correção proposta não traz modificações muito convincentes ao ajustamento. Isso é normal, pois, escolhemos, como exemplo, um modelo já ajustado.

Tabela 4.2.2. Exemplo de resumo de ajustamento através do modelo SUDENE-ORSTOM

Número : 3719 - 1 Período : 1981 à 1988 Superfície:0.769 Km^2

PARÂMETROS DO MODELO PARA A BACIA DE CALDEIRÃO EM TAUÁ

Índice de redução diário de IK : CI = 0.938 IKX = 149.8 IKN = 8.0

	IK	XO	X1	Y1	D
Hipérbole 1	130.05	2.81	6.66	0.93	0.49
Hipérbole 2	92.00	6.11	13.59	1.10	0.33
Hipérbole 3	30.00	19.00	32.00	2.43	0.31

TERMOS DO BALANÇO HIDROLÓGICO MENSAL (EM MM)

ANO		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
1981	CHUVA	41.3	46.8	447.8	71.3	12.4	1.4	0.0	2.8	1.0	0.0	0.0	44.6	669.4
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	0.0	0.0	145.9	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9*	173.3
	CALCULADOS	0.7	0.5	153.5	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	191.4
	DIFERENÇAS	-0.7	0.5	7.5	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1
1982	CHUVA	23.1	28.5	109.9	40.9	21.5	15.4	11.0	2.9	1.4	4.7	1.7	0.0	261.0
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
	CALCULADOS	0.0	0.0	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7
	DIFERENÇAS	0.0	0.0	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.3
1983	CHUVA	3.3	52.9	70.6	21.0	36.9	0.0	6.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	193.1
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	0.7	0.0	4.4*	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4
	CALCULADOS	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
	DIFERENÇAS	-0.7	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0
1984	CHUVA	3.8	35.1	169.9	154.0	36.0	5.6	31.3	3.5	5.2	0.2	2.3	33.0	479.9
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	0.0	0.0	17.5*	5.7*	0.0	0.0	0.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6*	24.8
	CALCULADOS	0.0	0.0	18.5	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	25.8
	DIFERENÇAS	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1985	CHUVA	121.0	166.8	251.3	318.9	90.8	61.2	48.6	9.5	9.1	0.2	4.6	114.9	1196.8
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	6.2*	20.1	41.2	145.8*	19.3*	15.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--	--
	CALCULADOS	5.8	17.6	49.1	143.1	21.3	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	253.1
	DIFERENÇAS	-0.4	-2.5	7.8	-2.7	2.0	-7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0
1986	CHUVA	13.4	79.2	365.0	122.9	39.2	16.0	9.0	15.6	1.8	0.2	4.4	3.8	670.6
ESCOAMENTOS:	OBSERVADOS	--	--	--	--	--	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
	CALCULADOS	0.0	6.2	99.6	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	118.6
	DIFERENÇAS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1987	CHUVA	5.9	19.2	211.7	52.2	19.3	54.1	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	374.6
ESCOAMENTOS :	OBSERVADOS	0.0	--	--	--	--	0.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
	CALCULADOS	0.0	0.0	15.7	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9
	DIFERENÇAS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	CHUVA	7.9	87.5	248.6	164.5	79.5	14.8	23.6	0.0	0.0	4.4	0.0	71.7	702.6
ESCOAMENTOS :	OBSERVADOS	0.0	3.0	55.4	14.4	17.7*	--	--	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6*	--
	CALCULADOS	0.0	6.3	44.8	14.5	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	79.3
	DIFERENÇAS	0.0	3.3	-10.6	0.1	-6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.8

-- Mês faltando totalmente.
* Mês incompleto (total parcial).

Tabela 4.2.2 Continuação do exemplo de ajustamento do modelo

RESULTADOS FINAIS E CRITÉRIOS DE AJUSTAMENTO DO MODELO: RESUMO DOS VALORES ANO POR ANO

LÂMINAS ANUAIS (MM)							DIFERENÇAS				
								CRITERIOS DE AJUSTAMENTO			
								Mensal		Diário	
Ano	Observado	Completo	Calculado	Escoamento	Base1	Base2	Relativo	Quadrado	Absoluto	Quadrado	Absoluto
81	170.4	173.3	191.4	191.4	0.0	0.0	18.1	145.6	18.1	4809.0	187.3
82	10.0	10.0	8.7	8.7	0.0	0.0	-1.3	1.8	1.3	60.8	14.3
83	1.0	5.4	4.5	4.5	0.0	0.0	-1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
84	8.9	24.8	25.8	25.8	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	6.6	3.6
85	223.0	256.1	253.1	253.1	0.0	0.0	-3.0	131.6	22.7	2305.5	220.4
86	0.0	118.6	118.6	118.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87	0.0	20.9	20.9	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
88	90.1	93.2	79.3	79.3	0.0	0.0	-13.8	167.3	20.6	311.6	66.2
TOTAL	503.5	702.3	702.2	702.2	0.0	0.0	-0.1	447.9	64.7	7494.0	492.7
							Critério por evento			3484.0	413.1

CRITÉRIOS DE AJUSTAMENTO

GERAL	PICO	NASH	CREC	CRECBI	FORTIN	SEXPER
22.6%	8.9%	0.985	0.718	0.794	1.129	5.441

TESTE DE SENSIBILIDADE DO AJUSTAMENTO ÀS MODIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS

Parâmetro testado	Critério por evento		Critério mensal		
	R2	R4	R2	R4	Incr1mm
CI	0.94	6.05	6.05	0.33	0.33	0.00015
IHX	149.82	2.50	2.50	3.86	0.00	0.20
IHN	8.03	5.16	5.16	0.80	0.80	18.44
IK(1)	130.05	4.06	4.06	2.84	0.00	-0.10
XO(1)	2.82	4.82	4.82	1.29	0.00	0.08
X1(1)	6.66	2.55	2.55	1.21	0.00	-0.02
Y1(1)	0.93	2.04	2.04	0.99	0.00	0.01
D(1)	0.49	8.96	8.96	6.35	6.35	0.00138
IK(2)	92.00	-5.92	0.00	7.02	0.00	1.09
XO(2)	6.11	4.93	4.93	1.98	0.00	-0.24
X1(2)	13.59	2.58	2.58	4.45	0.00	0.15
Y1(2)	1.10	37.48	0.00	29.32	0.00	-0.35
D(3)	0.33	9.95	0.00	-15.55	0.00	0.02
IK(3)	30.00	3.20	3.20	-0.44	0.00	-1.22
XO(3)	19.00	-0.07	0.00	4.06	4.06	-8.30
X1(3)	32.00	3.47	3.47	-0.59	-0.59	-0.27
Y1(3)	2.43	3.53	3.53	-0.60	-0.60	0.07
D(3)	0.31	1.77	1.77	-0.25	-0.25	0.01

R2 e R4 : Sensibilidade do critério de ajustamento a uma pequena variação do parâmetro.
Incr1mm : Aumento do parâmetro que incrementa em 1 mm a soma das descargas calculadas

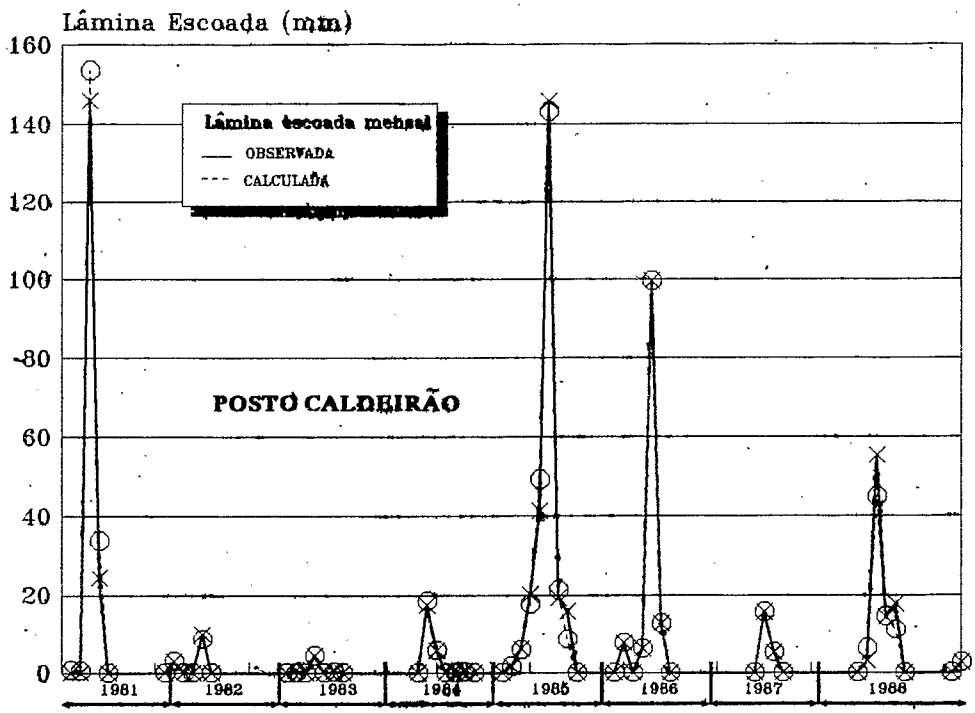


Figura 4.2.5: Comparação entre os valores mensais dos escoamentos calculados e observados

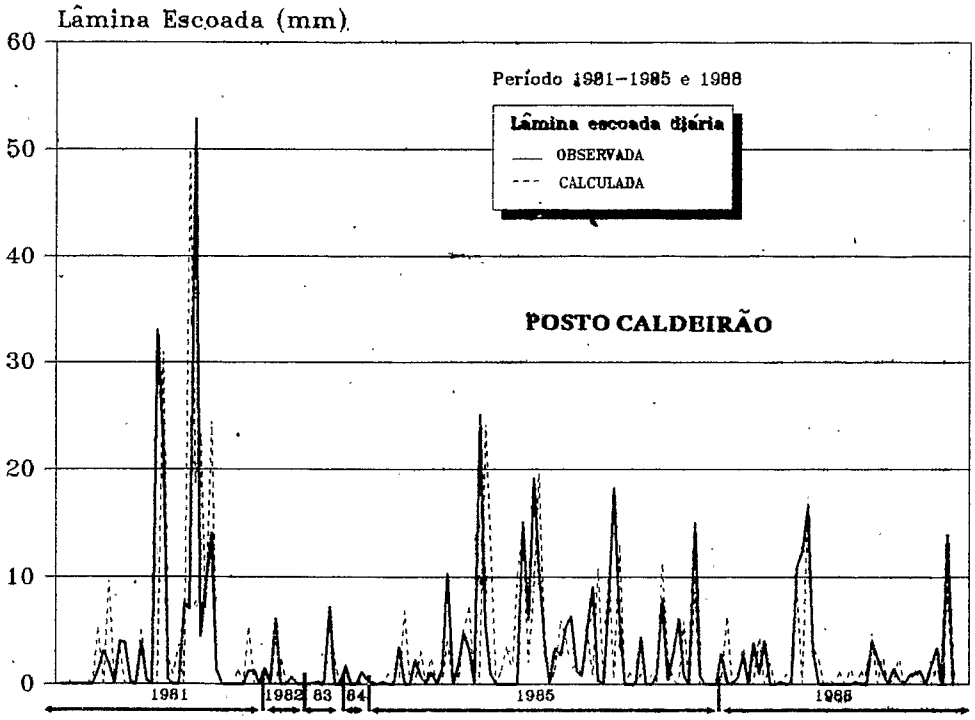


Figura 4.2.6 Comparação entre os valores diários dos escoamentos calculados e observados.

4.2.3 Ajustamentos realizados: validação

Ajustamentos análogos ao exemplo apresentado, foram realizados para 42 bacias diferentes com um total de 243 estações-anos, ou seja, uma média de 5,8 anos por bacia.

4.2.3.1 Critérios de ajustamento

Definições

A tabela 4.2.3 resume os critérios de ajustamento obtidos através de fórmulas, nas quais Qobs simboliza as lâminas mensais observadas e DIF as diferenças entre as lâminas mensais calculadas e observadas. Utilizamos, para nossos modelos, dois critérios denominados "GERAL" e "PICO", calculados segundo as fórmulas seguintes:

$$GERAL = \sqrt{\frac{\sum \frac{DIF^2}{Qobs}}{\sum Qobs}} \times 100$$

O critério "GERAL" corresponde, essencialmente, a uma soma de diferenças relativas e tem um faixa de sensibilidade ampla que se estende desde as fortes até as fracas descargas; ele é, geralmente, utilizado para avaliar a qualidade dos ajustamentos.

$$PICO = \sqrt{\frac{\sum DIF^2}{\sum Qobs^2}} \times 100$$

Este critério "PICO" tem uma formulação muito próxima da de NASH, com a diferença que a ponderação se faz por um termo de soma, equivalente a uma média observada, enquanto que NASH a realiza por uma soma de desvios em relação com a média. Seu domínio de melhor atuação é pois as cheias e as fortes descargas. Este critério apresenta pouca segurança para as estiagens.
Os critérios de NASH, CREC, CRECBI, FORTIN e SEXPER, foram calculados de acordo com as fórmulas seguintes fornecidas por SERVAT e DEZETTER (1990).

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Qc - Qo)^2}{\sum (Qo - Qmo)^2}$$

$$CREC = \frac{1}{N} \sum \left[\left| 1 - \frac{Qc}{Qo} \right| * \left| 1 - \frac{Qo}{Qmo} \right| \right]$$

$$CRECBI = \frac{1}{N} \sum \left[\left| 1 - \frac{Qc}{Qo} \right| * \left| 1 - \frac{Qo}{Qmo} \right| \right] + \frac{1}{N} \sum \frac{Qo - Qc}{Qmo}$$

$$FORTIN = \frac{1}{N} * \sum \left| \left(\frac{Qc - Qo}{Qo} \right) * \left(1 + \frac{|Qo - Qmo|}{Qmo} \right) \right|$$

$$SEXPER = \frac{1}{N} \cdot \sum \left[EXP \frac{|Qc - Qo|}{Qo} * \frac{Qo}{Qmo} \right]$$

Com: **N** Número de observação
Qc Descarga calculada
Qo Descarga observada
Qmo Descarga média observada.

Validade desses critérios

Os critérios GERAL, PICO e NASH são os únicos a penalizar um modelo que produz descargas não nulas, quando a descarga média observada é nula. Nesse ponto, estes três critérios parecem-nos melhor adaptados aos rios intermitentes.
Ao contrário, o critério SEXPER não se adapta bem aos regimes desses rios, fornecendo resultados surpreendentes e pouco coerentes com os outros critérios.

Análise dos resultados

O melhor ajustamento quanto ao conjunto dos critérios é a bacia S32 (SUMÉ, Microbacia 3, 2ª fase). Cinco bacias destacam-se do conjunto: PCO (Pedro Costa), CAL (Caldeirão), M1T (microbacia 1 de TAUÁ), LUZ (Luzimar) e M3T (Microbacia 3 de TAUÁ). A bacia de Caldeirão (CAL), que apresentamos como exemplo, faz parte dos cinco ou seis melhores ajustamentos entre os realizados.

Ao contrário, as estações de LBA (Lagedo de Baixo) e FZP (Fazenda Passagem), na bacia de Ibipeba, e a de PIR (Pirangi) e NAS (Açude Nascimentinho) corresponderam aos piores valores dos critérios.

TABELA 4.2.3: Critérios de ajustamento dos modelos

Bacia	Geral	Pico	Nash	Crec	Crecbi	fortin	Sexper
PIR	649.0	30.1	0.886	175.531	176.360	350.368	*****
MNO	37.1	8.8	0.985	1.792	2.006	3.063	10.838
MOQ	47.1	21.2	0.928	1.146	1.185	2.026	4.583
JOF	38.0	26.1	0.898	1.070	1.263	1.668	3.911
ACD	48.7	23.2	0.901	1.068	1.106	1.769	5.067
CAL	22.6	8.9	0.985	0.718	0.794	1.129	5.441
LUZ	41.2	16.7	0.928	0.403	0.489	0.822	3.341
CHI	58.1	18.2	0.936	1.428	1.614	2.402	10.516
JUZ	54.2	17.2	0.918	0.929	1.029	1.796	3.628
NAS	155.1	13.3	0.955	11.272	11.283	22.587	*****
MIT	25.8	12.2	0.962	0.591	0.633	0.993	3.545
M2T	38.3	10.0	0.958	0.995	1.026	1.843	4.569
M3T	26.9	7.5	0.931	0.572	0.929	0.780	4.397
M4T	50.0	19.0	0.883	2.692	3.001	4.661	225.732
GA2	49.3	7.3	0.934	0.984	1.326	1.838	2.983
JA2	35.9	7.5	0.980	1.387	1.437	2.748	567.988
UM1	46.1	8.2	0.848	1.781	3.182	2.338	8.744
UM2	57.4	35.5	0.852	2.465	3.671	3.111	10.556
MS1	43.4	16.9	0.950	1.549	1.720	2.578	5.579
MS2	54.8	1.4	0.902	1.904	2.971	3.013	7.318
S31	94.2	26.1	0.853	2.068	2.156	3.766	40.890
S32	15.0	2.1	0.995	0.498	0.550	1.010	2.314
S33	54.7	23.9	0.853	0.512	0.625	1.145	5.326
S41	69.9	30.5	0.711	2.802	2.984	3.978	9.737
S42	33.5	12.4	0.939	1.812	1.935	3.383	8.131
S43	44.1	4.3	0.969	0.937	1.410	1.852	5.503
MAT	97.3	9.9	0.975	2.603	2.617	5.286	*****
OSB	56.5	13.9	0.970	2.940	2.947	5.844	*****
SAL	57.9	17.1	0.923	1.746	1.780	3.431	*****
JU1	32.6	12.2	0.955	1.337	1.355	2.546	12.155
JU2	49.3	16.8	0.935	1.176	1.193	2.399	5.315
LGR	56.4	8.7	0.818	1.293	2.613	1.907	5.849
LBA	164.5	53.9	0.612	2.062	2.740	4.452	*****
FZI	63.5	22.7	0.871	1.338	1.421	2.354	10.798
FZP	153.4	22.2	0.852	9.673	9.746	19.035	*****
MAN	22.0	2.8	0.964	0.719	1.237	1.124	5.360
JER	44.4	17.2	0.921	0.814	1.044	1.343	4.794
PCO	26.8	11.2	0.972	0.379	0.407	0.753	2.901
MÉDIA	71.4	16.2	0.911	6.447	6.731	12.556	-

- Não foram calculados os critérios de ajustamento das Bacias de QUIXABINHA (QUI), JARDIM (JAR), BATATEIRAS (BPC) e MISSÃO VELHA (MVE).
- Ver na tabela 4.2.5 a significação das siglas utilizadas para as bacias.

4.2.3.2 Validação dos modelos

Foram efetuadas duas tentativas de validação com os dados do ano de 1989 das bacias de Caldeirão e de Moquém, dados esses que só foram processados depois do ajustamento dos modelos correspondentes. Os períodos de validação, infelizmente, são muito curtos, porém os coeficientes encontrados são promissores, como mostram as figuras 4.2.7, 4.2.8 e o quadro 4.2.4.

Tabela 4.2.4 Validação dos modelos

BACIA	GERAL	PICO	NASH	CREC	CRECBI	FORTIN	SEXPER	VALIDAÇÃO Dur.total	VALIDAÇÃO Nºchuvas
CAL	2,5	0,0	0,999	0,084	0,187	0,103	6,1	30 dias	9 chuvas
MOQ	5,3	5,3	0,997	0,585	1,222	0,638	12,7	10 dias	6 chuvas

Os excelentes valores dos **critérios calculados** nos períodos de validação dessas duas bacias confirmam os ajustamentos anteriores, porém refletem, também, a estabilidade e a qualidade excepcional dos dados do ano de 1989 destas duas estações.

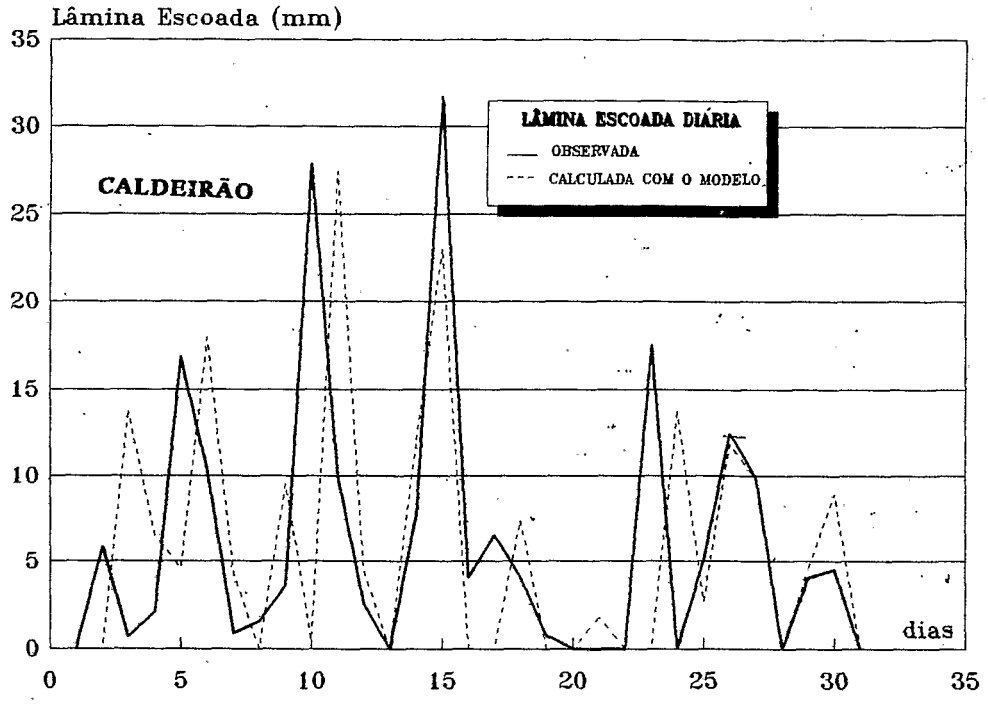


Figura 4.2.7: Validação do modelo para CALDEIRÃO

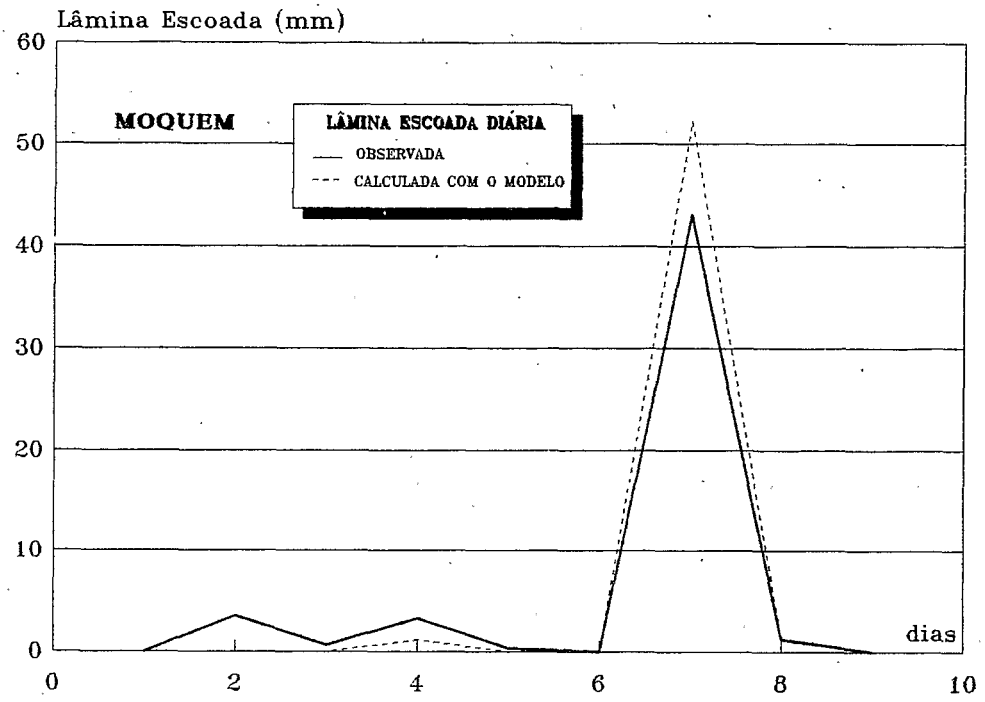


Figura 4.2.8: Validação do modelo para MOQUEM

4.2.3.3 Principais parâmetros dos modelos

Tentaremos indicar a significação física dos parâmetros principais dos modelos ajustados que estão resumidos na tabela 4.2.5.

- **CI** : Coeficiente diário de redução de IK. Quanto mais este coeficiente for elevado, mais "a memória" da bacia será grande em relação às chuvas antigas. Vários cálculos de otimização nos conduzem a valores de CI sempre compreendidos entre 0,90 e 0,98. Como este parâmetro se revelou pouco sensível, fixamó-lo em 0,95 para os dois últimos terços dos ajustamentos. Isso apresenta a vantagem de poder comparar, entre si, os valores de IK e as curvas de diferentes ajustamentos.

  É provável que para as pequenas bacias, sem zona de retenção de água, como as parcelas, as microbacias ou o açude Luzimar, o valor ótimo de CI seja mais baixo, e talvez próximo a 0,6 ou 0,7, como foi proposto por CHEVALLIER (1983)[2].

[2] CHEVALLIER propôs uma fórmula para a redução diária do IK que pode ser apresentada assim: $IK(D) = (IK(D-1 + P(D-1)) * e^{-a}$. Este autor sugere para a um valor de 0,5, que corresponde a um CI de 0,61. Estes valores são adaptados para parcelas de 1 m^2 estudadas na África, no quadro do programa de simulação de chuva, para os quais os intervalos de tempo são inferiores a 1 hora e não a 1 dia. Isso explica os valores mais elevados adotados para as pequenas bacias do Nordeste Brasileiro.

- **IKX** e **IKN** são os limites superiores e inferiores impostos aos IK.

- Para as hipérboles 1 e 3, selecionamos:
  - O valor de **IK** da hipérbole.
  - $\mathbf{X_0}$ que corresponde à precipitação limite de escoamento em solo saturado para a primeira hipérbole e de início da estação das chuvas, para a última.
  - **D** que corresponde ao "coeficiente marginal" de escoamento das fortes cheias.

TABELA 4.2.5 Principais parâmetros dos ajustamentos e siglas das bacias

SIGLA	NOME DA BACIA	CI	IKX	IKN	IK(1)	XO(1)	D(1)	IK(3)	XO(3)	D(3)
PIR	PIRANGI	0.900	180.0	0.0	160.0	1.00	0.379	12.0	33.0	0.379
MNO	MUNDO NOVO	0.902	190.0	0.0	184.0	2.00	0.496	35.0	30.1	0.496
MOQ	MOQUEM	0.950	143.1	19.4	143.1	2.00	0.697	37.9	41.0	0.293
JOF	JOAO FRAGOSO	0.950	130.0	16.6	128.3	1.91	0.660	35.0	13.0	0.144
ACD	ACUDINHO	0.950	130.0	10.1	118.0	8.23	0.571	23.9	23.0	0.273
CAL	CALDEIRAO	0.938	149.8	8.0	130.0	2.81	0.487	30.0	19.0	0.310
LUZ	LUZIMAR	0.950	110.0	12.7	89.7	2.00	0.713	15.0	10.9	0.362
CHI	CHICO	0.950	150.0	20.5	147.0	2.00	0.410	30.0	25.0	0.235
JUZ	JUAZEIRO	0.953	110.0	17.0	94.0	4.15	0.211	20.4	20.0	0.163
NAS	NASCIMENTINHO	0.950	138.7	25.0	124.0	3.00	0.580	25.4	18.0	0.200
M1T	MICROBACIA 1 TAUA	0.950	158.0	30.0	158.0	4.00	0.550	57.1	16.0	0.430
M2T	MICROBACIA 2 TAUA	0.950	158.0	20.0	158.0	4.00	0.480	65.0	16.0	0.430
M3T	MICROBACIA 3 TAUA	0.950	180.0	8.3	150.1	2.00	0.668	34.6	25.0	0.570
M4T	MICROBACIA 4 TAUA	0.950	190.1	29.2	155.0	6.10	0.370	50.0	31.6	0.150
GA2	GANGORRA 90	0.950	305.9	20.0	251.0	2.00	0.340	50.0	23.0	0.210
JA2	JATOBA 90	0.950	250.0	0.0	220.0	2.00	0.177	20.0	15.4	0.177
UM1	UMBURANA 81	0.936	234.0	40.0	212.7	3.00	0.520	42.0	25.0	0.520
UM2	UMBURANA 90	0.940	234.0	40.0	212.7	3.00	0.550	42.0	25.0	0.550
MS1	MICROBACIA 1 SUME	0.950	250.0	11.0	250.0	6.00	0.370	55.1	30.0	0.160
MS2	MICROBACIA 2 SUME	0.950	250.0	30.0	250.0	3.00	0.764	83.0	45.0	0.261
S31	MICROBACIA 31 SUME	0.950	246.3	74.0	236.7	4.70	0.650	92.7	14.0	0.600
S32	MICROBACIA 32 SUME	0.950	131.6	9.9	118.3	2.00	0.650	10.2	25.0	0.600
S33	MICROBACIA 33 SUME	0.950	93.8	1.0	76.3	2.50	0.650	2.5	10.0	0.620
S41	MICROBACIA 41 SUME	0.950	210.6	67.5	176.7	4.70	0.650	93.0	14.0	0.600
S42	MICROBACIA 42 SUME	0.950	121.0	2.3	121.0	2.00	0.650	2.3	25.0	0.600
S43	MICROBACIA 43 SUME	0.950	91.6	1.1	88.2	2.50	0.650	28.9	10.0	0.620
MAT	MATRIZ	0.960	220.0	5.0	203.8	0.35	0.203	17.5	24.9	0.203
OSB	OSCAR BARROS	0.981	383.0	68.0	330.0	2.00	0.327	75.0	27.7	0.327
SAL	SALOBRE	0.979	280.0	40.0	229.8	4.00	0.435	83.8	21.2	0.435
JU1	JUATAMA 64	0.952	300.0	40.0	234.0	2.00	0.372	40.0	18.0	0.372
JU2	JUATAMA 75	0.960	300.0	80.0	260.0	2.30	0.351	95.0	25.0	0.351
LGR	LAGOA GRANDE	0.900	140.0	10.0	140.0	1.50	0.023	10.0	48.5	0.023
LBA	LAJEDO DE BAIXO	0.976	265.0	30.0	180.0	4.12	0.016	60.0	20.0	0.016
FZI	FAZENDA ISABEL	0.903	125.0	0.0	120.0	1.00	0.065	4.0	30.0	0.065
FZP	FAZENDA PASSAGEM	0.910	140.0	5.5	140.0	1.00	0.330	21.0	28.5	0.330
BPC	BATATEIRAS EM PTE. CARITE	0.950	300.0	10.0	250.0	1.00	0.200	50.0	15.0	0.200
MVE	MISSÃO VELHA	0.950	300.0	10.0	280.0	5.00	0.060	50.0	17.0	0.060
AJA	ACUDE JARDIM	0.950	250.0	10.0	190.0	2.00	0.200	40.0	15.0	0.200
QUI	QUIXABINHA	0.950	300.0	20.0	290.0	2.00	0.200	65.0	25.0	0.200
MAN	MANOEL	0.950	203.0	25.0	200.0	1.50	0.335	42.0	8.0	0.185
JER	JERICÓ	0.950	116.1	20.0	110.0	1.50	0.650	30.0	12.0	0.350
PCO	PEDRO COSTA	0.950	188.9	8.0	188.5	2.00	0.210	20.0	10.0	0.200

4.3 ESCOLHA DOS PLUVIÔMETROS PARA A TRANSPOSIÇÃO ESPACIAL

Uma vez os modelos ajustados e validados, deve-se empregá-los para criar séries fictícias de descargas de longa duração. Para isso, são utilizados, como dados de entrada dos modelos, as séries de chuvas diárias de um ou vários pluviômetros, de boa qualidade, da rede geral, em lugar das chuvas médias observadas na bacia que serviu ao ajustamento.

É, portanto, indispensável selecionar pluviômetros cujos dados diários sejam de excelente qualidade e de definir as zonas geográficas que eles são capazes de representar.

As etapas de nosso trabalho são as seguintes:

- Determinação de zonas pluviométricas homogêneas, referentes às precipitações em 24 h.
- Seleção e crítica dos pluviômetros existentes.
- Reagrupamentos das zonas e escolha dos pluviômetros representativos.

4.3.1 Zoneamento para as chuvas em 24 h

O escoamento superficial que constitui a maior parte dos escoamentos das zonas semi-áridas é provocado por chuvas breves, mas intensas. É, portanto, natural efetuar um zoneamento pluviométrico das chuvas de curta duração. Para isso utilizamos uma metodologia definida por CADIER *et al* (1981), a fim de efetuar um zoneamento dos totais pluviométricos em 24 h, do período de retorno anual. Esse zoneamento refere-se a 1.336 pluviômetros que apresentavam mais de dez anos de observações aproveitáveis. Utilizou-se, para isso, os programas de ajustamento de leis truncadas, escritos por Y BRUNET-MORET (1969).

Os ajustamentos às leis de PERSON III, GOODRICH e GALTON foram efetuados; o da lei de GOODRICH dando os melhores resultados. O zoneamento feito é, em geral, significativo. Assim, as médias calculadas em 1981 para as zonas 1 e 8 são, respectivamente, de 61 mm e de 52 mm, com desvio padrão de 6 mm. Os intervalos de confiança de 95% da média de cada zona que são respectivamente 61 $\pm$ 1 mm e 52 $\pm$ 2 mm (para um nível de probabilidade de 95 %), o que torna estas zonas significativamente diferentes.
Para a parte do Nordeste cuja pluviometria anual é inferior a 1.000 mm, obtivemos dez zonas diferentes que aparecem na figura 4.3.1, a qual denominamos "*zoneamento pluviométrico inicial*"

4.3.2 Crítica e consistência dos dados pluviométricos

4.3.2.1 Seleção dos pluviômetros

Classificamos e selecionamos, sucessivamente, 2.200 pluviômetros cadastrados no Nordeste, baseando-nos em critérios de qualidade cada vez mais severos.

*** Primeira seleção: 1.336 pluviômetros analisados a nível diário.**

Mais ou menos a metade desses pluviômetros tem uma série superior a dez anos sem expressiva lacuna e foi objeto de um ajustamento estatístico que resultou no "*zoneamento pluviométrico inicial*" dos totais em 24 h, descrito anteriormente. Esse zoneamento e sobretudo a definição dos limites das zonas, que se refere a uma superfície de 800.000 km^2, não poderia ter sido realizado com um número menor de pluviômetros.

*** Segunda seleção efetuada a nível dos totais anuais: 156 pluviômetros cujas séries são longas e de boa qualidade.**

Utilizamos, a seguir, uma seleção mais rigorosa realizada por MOLINIER, por ocasião da elaboração de um mapa de isoietas homogeneizadas (MOLINIER *et al*, 1992), que nos permitiu selecionar 156 pluviômetros, dentre os 1.336 da relação precedente. MOLINIER considerou, para sua seleção, o comprimento das séries pluviométricas, sua homogeneidade e a coerência das séries, e de seus totais anuais em relação aos pluviômetros da região. Essa homogeneização foi efetuada com o método do vetor regional (HIEZ, 1978), implantado por G. JACCON (1978) no Banco de Dados da SUDENE. Todas as séries têm uma duração superior a 35 anos, 80% destes pluviômetros tendo sido observados durante mais de 45 anos. Eles representam, essencialmente, as zonas secas[3] e estão localizados na figura 4.3.2 e no quadro do anexo 3.

4.3.2.2 Atribuição de uma classe de qualidade aos 156 pluviômetros selecionados

*** Definição dos quatro critérios de qualidade : A,B,C,D.**

Os 156 pluviômetros da relação do quadro do anexo 3 já foram objeto de uma selação severa e são, portanto, considerados de boa qualidade. No entanto, queremos lembrar que tentamos selecionar um número muito pequeno de pluviômetros da melhor qualidade possível, dos quais se tinha conhecimento da representatividade geográfica, para que pudessem servir "*de entrada*" para os modelos. Para atingir esse objetivo, efetuamos uma nova seleção destes 156 postos, a qual foi baseada nos seguintes princípios:

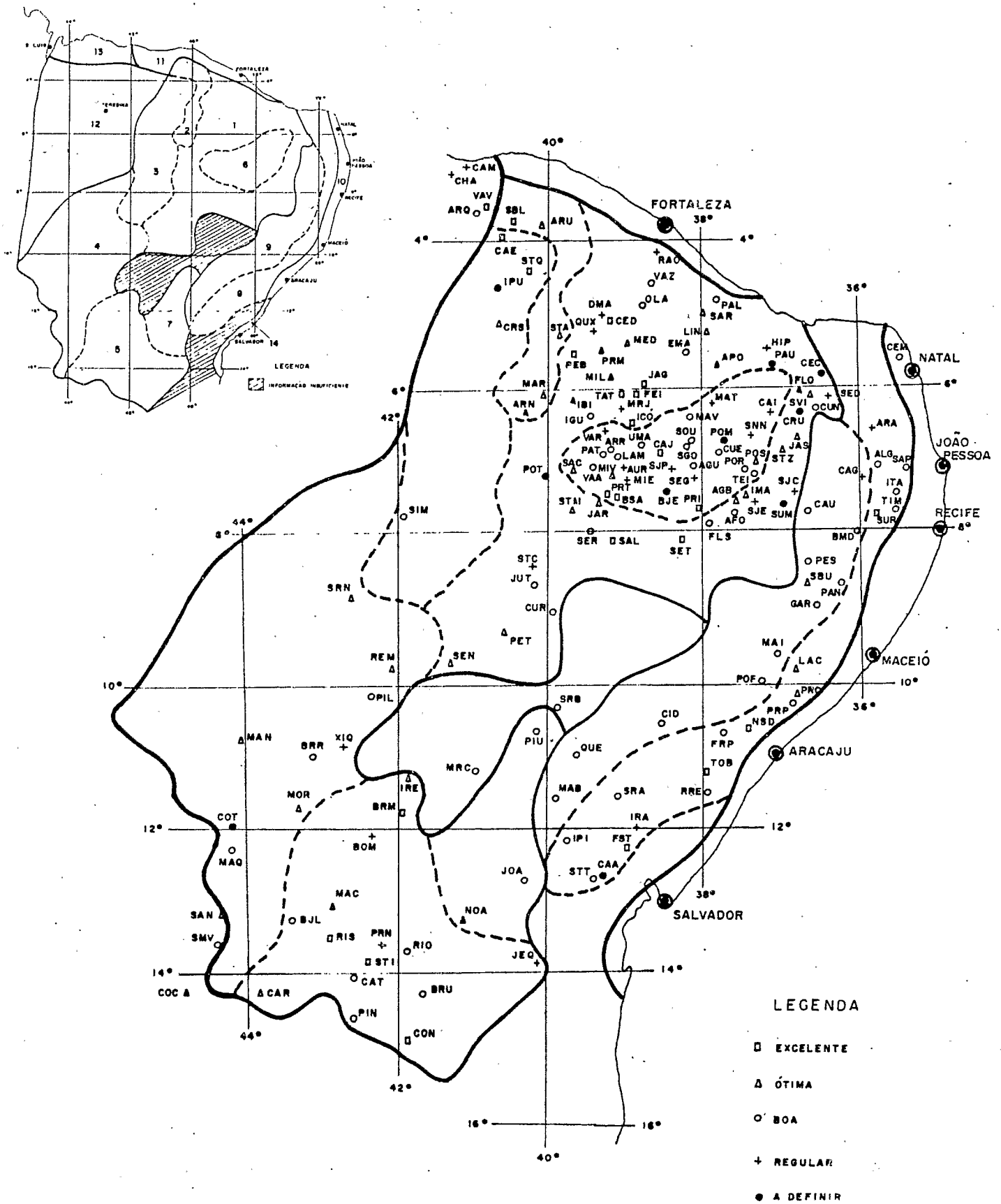
(a) **Coerência entre os totais anuais homogeneizados por MOLINIER e o conteúdo dos arquivos de chuvas diárias** (critério de qualidade A).

Os dados de cada pluviômetro aparecem em quatro arquivos diferentes:

M = Anuário pluviométrico mensal publicado pela SUDENE em 1990 que foi elaborado a partir do arquivo de pluviometria mensal PLM.
H = Média homogeneizada a nível anual por MOLINIER.

[3] Retomamos todos os pluviômetros selecionados por MOLINIER com um total anual inferior a 1.000 mm, e mais uma dezena de pluviômetros suplementares cujos totais estão compreendidos entre 1.000 e 1.100 mm, a fim de facilitar as extrapolações.

Figura 4.3.1: Zoneamento pluviométrico inicial (*em redução no fundo da figura*)
Figura 4.3.2: Situação dos 156 pluviômetros analisados



D = Dados diários calculados a partir do arquivo de pluviometria diária PLV da SUDENE.

S = Dados diários do arquivo de trabalho que utilizaremos como "dados de entrada" para os modelos. É a este arquivo "S" que devemos, afinal de contas, garantir a melhor qualidade possível.

No quadro do anexo 3/pluviométrico, indicamos as médias pluviométricas e o número de anos oriundos desses quatro arquivos. As pequenas diferenças que constatamos entre esses diversos valores são normais, visto que os períodos e os modos de processamento das lacunas não são sempre os mesmos para cada um desses arquivos.

Mas, **por outro lado; as diferenças que ultrapassam um certo limite, refletem incoerência:**

- **H** muito diferente de **M**, significa que uma importante correção foi efetuada por MOLINIER a nível dos totais anuais, correção que não podemos realizar a nível diário.

- Dados diários **D** ou **S**, muito diferentes dos dados anuais **M** ou **H**, indicam, geralmente, que uma parte dos dados anuais não estão disponíveis a nível diário.

(b) e (c) **Coerência do pluviômetro com a sua região** (critérios de qualidade **B** e **C**).
Dois critérios de qualidade permitem comparar o "comportamento" do pluviômetro em relação ao resto da zona:

- O critério B representa a coerência dos totais em 24 h de fraca freqüência em relação aos outros pluviômetros da sua zona climática.

- O critério C representa diversos outros aspectos do regime pluviométrico, irregularidade da distribuição dos totais anuais, sequência de anos deficitários consecutivos e participação das cheias nos escoamentos que essas séries pluviométricas gerariam (de acordo com a técnica do "*faciès" hidrológico*" descrita mais adiante, no parágrafo 4.3.3.1).

Uma incoerência ou uma diferença significativa entre um pluviômetro e sua zona, pode refletir condições orográficas particulares (microclima) ou uma má qualidade dos dados.

(d) **Qualidade da distribuição dos totais em 24 horas** (critério de qualidade D).
Uma análise dos totais em 24 horas permite abranger os períodos e os pluviômetros com dados duvidosos, utilizando técnicas clássicas: exame do número de dias de chuva, número de vezes que um total termina por 0 ou é um múltiplo de 7 ou de 25 mm[4], número de dias de chuvas inferiores a 10 mm, exame crítico das chuvas mais fortes, etc...

[4] A rede pluviométrica brasileira foi equipada, durante muito tempo, com provetas medindo 7 e 25 mm.

* Determinação da classe de qualidade global

Quatro níveis de qualidade foram estabelecidas para cada um dos critérios A, B, C e D, de acordo com as seguintes convenções:

9 : Nenhuma restrição
8 : Aceitável
5 : Regular
4 : Ruim, em princípio rejeitado
0 : Significa que o critério não foi avaliado.

Os pluviômetros foram, a seguir, classificados em cinco classes de qualidade global, numeradas de 0 a 4, de conformidade com a tabela 4.3.2. o valor (4) correspondendo aos dados de melhor qualidade. Esta **classe de qualidade global (QG) integra os quatro critérios definidos anteriormente.** (Ver anexo 3).

TABELA 4.3.2 Distribuição dos pluviômetros por classe de qualidade global

Qualidade global		Condição relativa aos critérios A, B, C. D	Número de pluviômetros
EXCELENTE	4	Quatro "9"	23
MUITO BOA	3	unicamente "8" ou "9"	39
BOA	2	["8" ou "9" para o Código A] et [(1 x "5" et 2 x ("8" ou "9")]	58
MEDIANA	1	sem código "4"	26
DUVIDOSA	0	um ou vários "4"	10

Tabela 4.3.3 : Relação e qualidade dos pluviômetros selecionados

Zona Sigla e nome	Alt	Número de anos M	H	D	S	Totais anuais M	H	D	S	Prec. 24 h 1/2	1/10	Qualidade A	B	C	D	QG
SERTÃO																
1 APO APOG. INGAZEIRA	525	70	64	65	71	592	579	610	594	59	96	9	9	5	9	2
1 AGB ÁGUA BRANCA	710	54	37	50	49	720	707	694	695	63	103	8	9	8	9	3
1 APO APODI	305	46	38	44	47	743	785	761	746	63	106	8	9	9	9	3
1 BET BETÂNIA	431	50	46	47	48	519	490	525	524	58	103	8	9	5	9	2
1 BSF B. S. FRANCISCO	305	73	70	48	50	443	440	477	472	66	125	8	5	5	5	1
1 CAB CABROBÓ	350	0	36	36	38	-	450	466	460	54	113	9	5	5	9	1
1 CEC CERRO CORÁ	590	51	45	53	50	580	560	585	585	74	155	9	4	4	5	0
1 CED CEDRO AÇ	190	75	72	76	78	824	810	827	829	60	94	9	9	9	9	4
1 CRU CRUZETA	140	65	55	57	49	579	493	556	549	56	91	4	5	8	9	0
1 CUN CURRAIS NOVOS	350	74	64	69	67	444	420	428	425	54	90	9	5	8	9	2
1 CUR CURAÇÁ	341	64	64	63	63	453	468	454	454	58	100	9	9	5	9	2
1 DMA DOM MAURÍCIO	300	65	62	68	71	1017	980	1017	1013	68	109	9	5	5	8	1
1 EMA EMA	210	53	51	54	56	827	838	818	817	67	104	9	9	5	8	2
1 FEI FEITICEIRO	180	49	46	50	51	708	704	714	721	63	105	9	9	9	9	4
1 FLO FLORÂNIA	210	73	67	47	45	657	643	598	600	56	89	8	8	8	9	3
1 FLS FLORES	460	66	64	51	59	755	740	780	748	68	106	9	5	9	9	2
1 HIP HIPÓLITO	230	50	47	45	44	550	537	535	550	56	100	9	5	5	9	1
1 IBI IBICUÁ	273	70	52	63	66	784	779	758	761	68	114	8	8	9	9	3
1 ICO ICÓ	160	66	66	54	61	745	737	737	731	65	112	9	9	9	9	4
1 IGU IGUATU	213	68	61	63	66	801	785	793	806	69	109	9	8	5	9	2
1 IMA IMACULADA	750	52	43	55	52	658	634	652	646	59	99	9	9	8	9	3

Zona	Sigla	e nome	Alt	Número de anos M	H	D	S	Totais anuais M	H	D	S	Prec. 24 h 1/2	1/10	Qualidade A	B	C	D	QG
SERTÃO																		
1	JAG	JAGUARIBE	120	65	60	61	63	681	684	667	674	62	104	9	9	9	9	4
1	JAR	JARDIM	630	74	71	77	78	788	780	793	792	64	102	9	9	8	8	3
1	JAS	JARDIM SERIDÓ	220	72	70	54	57	566	540	555	569	57	108	8	8	8	9	3
1	JUT	JUTAÍ	361	46	41	41	46	583	562	604	592	62	112	8	9	5	9	2
1	LIN	LIMOEIRO NORTE	35	66	65	60	64	712	730	734	740	59	93	9	8	9	9	3
1	MED	MENDUBIM	170	50	47	50	51	679	699	665	665	57	107	8	8	9	9	3
1	MIL	MILHÃ	180	58	49	48	52	760	746	806	793	69	113	8	8	9	8	3
1	MRJ	MARACAJÁ	210	51	48	49	52	718	704	734	730	68	117	9	5	5	9	1
1	OLA	OLHO D'AGUA	150	54	49	51	53	804	849	828	821	65	101	9	9	5	9	2
1	PAL	PALHANO	20	53	48	36	50	732	740	812	775	59	95	9	9	5	8	2
1	PAR	PARNAMIRIM	379	70	66	64	69	580	544	572	553	62	122	9	8	9	9	3
1	PAU	PARAU	38	63	56	60	60	633	690	610	598	57	91	4	5	5	9	0
1	PEB	PEDRA BRANCA	480	64	63	55	65	864	840	870	870	64	106	9	9	9	9	4
1	PES	PESQUEIRA	650	62	52	36	38	679	670	711	696	61	106	8	9	9	9	2
1	PET	PETROLINA	376	69	63	63	69	430	427	434	439	56	109	9	8	9	9	3
1	POT	POTENGI	480	47	44	35	43	679	780	702	685	56	102	4	5	5	9	0
1	PRM	PRUDENTE MORAIS	180	58	56	58	65	697	671	684	715	60	94	8	8	9	9	3
1	QUX	QUIXERAMOBIM	187	73	61	67	71	783	706	785	783	60	110	5	9	5	9	1
1	RAO	RIACHAO	60	61	61	57	61	1070	1069	1097	1082	68	114	9	5	5	5	1
1	RRE	RIO REAL	220	69	66	69	66	928	924	928	928	49	86	9	5	8	9	2
1	SAL	SALGUEIRO	415	73	70	70	69	589	585	595	579	61	106	9	9	9	9	4
1	SAR	STO ANT. RUSSAS	40	73	71	75	78	766	746	768	768	56	90	9	8	9	9	3
1	SED	SERRA DO DOUTOR	520	42	33	37	36	711	624	707	684	64	111	5	9	5	9	1
1	SEN	SENTO SÉ	380	43	40	42	43	476	485	478	476	60	118	9	8	9	9	3
1	SER	SERRITA	425	51	45	50	48	587	604	586	594	60	104	9	9	5	9	2
1	SET	SERRA TALHADA	435	73	58	65	58	649	598	637	592	59	97	9	9	9	9	4
1	SJC	S. JOÃO CARIRI	445	71	52	66	71	381	395	390	392	58	117	8	5	5	5	1
1	SJE	S. JOSÉ EGITO	575	71	50	72	67	543	550	497	506	60	105	5	9	5	8	1
1	STC	SANTA CRUZ	489	48	46	45	43	617	540	562	552	55	85	9	5	5	9	1
1	STM	SÍTIO MOREIRAS	750	45	43	43	43	640	694	648	648	58	102	8	9	9	9	3
1	STZ	SANTA LUZIA	290	72	69	71	72	548	560	554	542	58	92	9	8	8	9	3
1	SUM	SUMÉ	510	49	38	41	41	585	616	548	550	62	113	4	9	4	5	0
1	SVI	S. VICENTE	320	52	49	50	50	568	560	575	569	59	101	9	9	8	9	3
1	TAT	TATAIRA	100	48	43	45	49	782	791	805	795	66	111	9	9	9	9	4
1	VAZ	VAZANTES	50	54	50	55	55	901	855	912	912	61	101	8	9	5	9	2
2	ARN	ARNEIROZ	325	63	63	39	45	578	558	602	589	55	86	8	9	9	8	3
2	ARU	ARACATIAÇU	190	63	63	48	49	645	638	654	669	56	89	8	9	8	9	3
2	MAR	MARRUAS	490	48	44	38	46	634	666	629	641	51	92	9	9	8	9	3
2	SBL	SOBRAL AC	110	59	59	55	59	838	845	844	826	56	88	9	9	9	9	4
2	STA	STO ANTÔNIO	255	44	43	33	36	646	673	658	701	53	86	9	9	8	9	3
3	CAE	CARIRÉ	157	72	68	67	71	898	894	924	917	64	102	9	9	9	9	4
3	CRS	CRATEÚS	275	74	67	68	71	718	690	732	728	64	106	8	9	9	9	3
3	IPU	IPUEIRAS	238	71	69	63	66	926	881	978	990	66	101	4	9	9	9	0
3	SIM	SIMPLÍCIO MENDES	319	60	59	48	58	726	713	743	716	63	99	9	9	5	8	2
3	STQ	SANTA QUITÉRIA	190	71	69	71	73	799	780	804	797	62	100	9	9	9	9	4
4	BRR	BARRA	410	69	60	69	71	760	775	760	750	68	107	8	9	8	5	2
4	COC	COCOS	549	39	36	42	42	949	970	948	948	73	123	9	8	8	9	3
4	COT	COTEGIPE	484	47	44	45	47	1069	1050	1078	1081	84	131	9	4	9	8	0
4	MAN	MANSIDÃO	536	41	38	42	44	898	876	898	889	64	99	9	8	9	9	3
4	MAQ	MARIQUITA	750	45	43	46	47	898	890	910	902	60	97	9	5	8	9	2
4	MOR	MORPARA	415	46	42	41	44	760	770	775	763	70	118	9	9	9	8	3
4	PIL	PILÃO ARCADO	358	66	62	60	66	653	657	661	645	60	97	9	5	8	9	2
4	REM	REMANSO	378	69	65	65	70	578	567	588	581	62	104	9	8	8	9	3
4	SAN	SANTANA	580	45	42	44	47	986	1030	979	973	73	113	8	9	9	8	3
4	SMV	STA M. VITÓRIA	430	44	44	44	45	1078	1060	1055	1053	77	122	9	5	8	9	2
4	SRN	S. R. NONATO	386	60	58	39	42	694	706	692	705	68	113	8	9	9	9	3
4	XIQ	XIQUE XIQUE	403	57	57	57	55	626	652	622	616	62	104	8	8	5	8	1
5	BJL	BOM JESUS LAPA	435	68	61	66	60	833	770	828	824	67	118	8	8	1	8	2
5	BOM	BOM SOSSEGO	490	39	39	13	16	667	670	788	744	56	88	5	5	5	9	1
5	BRM	BARRA DO MENDES	706	47	44	47	48	576	567	572	576	64	108	9	9	9	9	4
5	BRU	BRUMADO	457	64	64	58	59	641	630	640	641	63	100	9	9	5	9	2
5	CAR	CARIRANHA	452	64	58	63	67	813	780	808	791	64	104	9	9	9	8	3
5	CAT	CAETITE	826	64	64	61	58	841	810	849	825	63	103	9	9	5	9	2
5	CON	CONDEUBA	695	74	67	68	71	751	740	750	734	65	104	9	9	9	9	4
5	IRE	IRECÊ	722	39	35	39	35	582	585	582	588	58	97	9	8	9	9	3
5	JEQ	JEQUIÉ	199	63	63	57	62	688	615	670	671	63	120	5	8	5	8	1
5	MAC	MACAÚBAS	656	62	56	61	63	802	829	801	799	61	89	9	8	9	9	3
5	NOA	NOVO ACRE	590	57	54	55	58	876	870	861	850	68	119	8	8	9	8	3
5	PIN	PINDAÍ	590	50	48	40	48	589	600	584	579	58	102	9	8	5	9	2
5	PRN	PARAMIRIM	593	70	67	60	62	716	705	710	701	57	91	9	5	5	9	1
5	RIO	RIO DE CONTAS	1002	72	69	72	74	859	845	860	853	61	103	9	9	5	9	2
5	RÍS	RIACHO SANTANA	627	50	46	49	48	852	840	851	846	62	98	9	9	9	9	4
5	STI	S. TIMÓTEO	700	43	42	43	44	683	690	863	683	60	98	9	9	9	9	4
6	AGU	AGUIAR	280	50	39	49	49	894	875	849	854	75	141	9	8	5	9	2
6	ARR	ARROJADO	240	58	55	46	50	825	803	857	844	77	130	9	9	5	9	2
6	AUR	AURORA	65	70	69	52	56	871	834	923	909	65	96	5	5	9	9	1
6	BJE	BOM JESUS	470	50	38	40	45	863	805	932	916	80	140	4	5	5	5	0
6	BSA	BREJO SANTO	490	68	67	64	71	901	904	894	922	70	110	9	9	9	9	4
6	CAI	CAICÓ	143	75	69	58	58	683	671	693	701	64	108	8	5	8	8	1
6	CAZ	CAJAZEIRAS	291	73	71	65	67	881	865	897	895	72	113	9	9	9	9	4

Zona	Sigla	e nome	Alt	Número de anos N	H	D	S	Totais anuais N	H	D	S	Prec. 24 h 1/2	1/10	Qualidade A	B	C	D	QG
SERTÃO																		
6	CUE	CUREMAS	220	50	44	43	47	882	830	858	869	74	123	9	9	5	8	2
6	LAM	LAV. MANGABEIRA	247	65	65	51	59	856	870	839	857	69	118	9	9	5	9	2
6	MAT	MARTINS	645	73	69	70	71	1192	1097	1091	1100	82	145	9	5	5	8	1
6	MAV	MARCELINO VIEIRA	195	52	46	47	49	797	753	781	794	69	116	8	9	5	9	2
6	MIE	MILAGRES	371	71	67	58	66	940	927	945	926	76	125	9	9	5	5	1
6	MIV	MISSÃO VELHA	352	70	64	64	70	954	915	972	968	76	118	8	9	9	9	3
6	PAT	PATOS	270	48	47	47	52	829	824	800	814	71	118	9	9	5	9	2
6	POM	POMBAL	178	75	65	71	71	731	805	728	699	65	101	4	5	5	9	0
6	POR	PORCOS	270	44	36	39	44	767	804	784	770	70	114	9	9	5	9	2
6	POS	PATOS	250	72	54	68	47	715	744	805	753	75	138	9	8	9	9	3
6	PRI	PRINCESA ISABEL	660	75	70	77	74	789	830	826	817	68	112	9	9	9	9	4
6	PRT	PORTEIRAS	520	75	70	60	66	885	884	903	890	76	122	9	9	9	9	4
6	SAC	SANTANA CARIRI	480	67	64	65	66	934	918	946	945	73	114	9	9	8	9	3
6	SEG	SERRA GRANDE	585	48	47	42	47	892	866	779	788	74	130	5	9	5	8	1
6	SGO	S. GONÇALO	235	45	41	42	44	914	891	911	900	75	127	9	9	5	8	2
6	SJP	S. JOSE PIRANHAS	300	48	43	50	47	979	914	989	987	70	108	8	8	5	8	1
6	SNN	SER. NEGRA NORTE	160	71	57	68	69	735	777	726	726	73	128	5	9	9	9	1
6	SOU	SOUZA	200	75	56	61	63	784	774	768	767	70	114	9	9	5	8	2
6	TEI	TEIXEIRA	770	73	35	72	59	715	693	715	688	70	121	8	9	5	9	2
6	UMA	UMARI	350	73	71	75	75	783	770	785	785	63	97	9	5	9	9	2
6	VAA	VARZEA ALEGRE	345	73	65	70	69	980	980	971	962	71	106	9	8	5	9	2
6	VAR	VÁRZEA	220	58	56	55	55	889	845	908	922	79	139	5	8	9	5	1
7	JOA	JOÃO AMARO	249	62	62	59	60	635	635	639	634	58	90	9	5	9	9	2
7	MAB	MTE ALEGRE BA	424	49	44	48	52	796	822	788	783	63	115	9	5	8	9	2
7	MRC	MORRO CHAPÉU	1012	67	62	64	66	741	746	746	742	60	101	9	5	9	9	2
7	PIU	PINDOBAÇU	600	50	47	50	50	953	967	953	953	60	116	9	8	5	9	2
7	SRB	SENHOR BOMFIM	544	74	69	69	72	843	836	843	847	61	101	9	5	9	9	2
ZONA TRANSIÇÃO																		
8	ALG	ALAGOA GRANDE	180	47	43	47	31	950	942	949	942	63	108	8	9	5	9	2
8	ARA	ARARUNA	580	75	69	70	69	845	859	869	854	61	123	9	8	5	5	1
8	CAA	CASTRO ALVES	265	57	55	55	61	865	949	878	847	51	95	4	8	4	9	0
8	FRP	FREI PAULO	272	71	67	66	70	819	816	815	808	54	96	9	5	9	9	2
8	FST	FEIRA DE SANTANA	257	48	45	47	49	868	865	858	863	55	106	9	9	9	9	4
8	IPI	IPIRA	299	56	55	56	59	754	750	749	740	55	101	9	9	9	5	2
8	IRA	IRARA	283	63	60	60	63	1040	1030	1037	1033	62	116	9	5	5	5	1
8	ITA	ITABAIANA	45	73	64	72	66	771	745	769	740	55	100	9	5	9	9	2
8	LAC	LAGOA DA CANOA	235	52	48	52	54	1002	929	1007	1001	53	89	8	8	5	9	2
8	NSD	N.SENHORA DORES	200	70	66	72	69	1049	990	1063	1055	61	102	9	9	9	9	4
8	PRC	PORTO R. COLÉGIO	30	67	67	68	70	909	905	912	910	56	112	9	9	9	8	3
8	PRP	PROPRIÁ	17	0	46	47	48	0	827	796	780	51	95	8	8	5	9	2
8	SAP	SAPÉ	125	61	54	60	59	1029	1020	1036	1018	68	117	9	8	5	9	2
8	SRA	SERRINHA	377	67	65	60	65	851	875	856	848	58	101	9	9	5	9	2
8	STT	SANTA TEREZINHA	198	41	38	39	40	577	541	574	568	51	86	9	5	9	9	2
8	TIM	TIMBAÚBA	190	75	70	74	75	1048	1025	1054	1079	61	104	8	9	5	9	2
8	TOB	TOBIAS BARRETO	157	64	66	61	64	764	751	765	760	54	96	9	9	9	9	4
9	BMD	BREJO MAD.DEUS	646	64	61	59	58	850	878	852	842	63	110	9	5	8	9	2
9	CAG	CAMPINA GRANDE	508	74	63	59	52	764	725	770	751	48	90	8	9	5	8	2
9	CAU	CARAÚBAS	460	54	34	54	52	366	360	375	367	49	93	8	9	5	9	2
9	CID	CÍCERO DANTAS	420	72	64	71	72	889	924	880	880	58	112	9	5	9	9	2
9	GAR	GARANHUNS	866	58	51	40	37	782	787	758	749	48	90	8	9	9	9	3
9	MAI	MAJOR ISIDORO	217	72	69	70	69	668	665	674	668	48	83	9	8	9	9	3
9	PAN	PANELAS	620	49	47	46	49	618	628	611	602	48	94	9	9	9	5	2
9	POF	PORTO DA FOLHA	45	70	67	61	63	542	536	553	552	44	78	9	5	9	9	2
9	QUE	QUEIMADAS	273	66	66	64	70	538	537	529	539	51	105	9	8	5	9	2
9	SBU	S.BENTO DO UNA	645	62	61	62	63	600	590	589	600	55	97	9	8	8	9	3
9	SUR	SURUBIM	380	72	57	63	65	645	630	650	644	46	84	9	9	9	9	4

4.3.3 Zoneamento pluviométrico

4.3.3.1 Método empregado - Definição do ""faciès"" do regime hidrológico

Preferimos criticar, selecionar e reagrupar esses pluviômetros e essas zonas, a partir das características dos escoamentos fictícios gerados por cada um desses pluviômetros que servem sucessivamente de "*entrada*" a um mesmo modelo. **Por que**? Porque, afinal de contas, o fundamento da escolha dos pluviômetros e do zoneamento será ratificado ou validado por sua maior ou menor aptidão em ser utilizado por modelizadores.

Portanto, utilizamos, sucessivamente, cada um dos 156 pluviômetros selecionados por MOLINIER como entrada do modelo SUDENE/ORSTOM, ajustado aos dados do posto CALDEIRÃO[5].

Cada série de descarga produzida pode ser caracterizada por variáveis que chamaremos "***faciès***" **do regime hidrológico**, conforme discriminação a seguir:

- O escoamento anual:	ESCANUAL
- A distribuição dos escoamentos anuais	
Lâmina decenal úmida	LA01
Lâmina trienal úmida	LA033
Lâmina mediana	LA05
Lâmina trienal seca	LA067
Lâmina decenal seca	LA09
Lâmina de três anos consecutivos	L3AC
- A cheia anual	X1
- A cheia decenal	X10
- A média das precipitações anuais no pluviômetro:	CHANUAL.

Utilizaremos, igualmente, o que chamamos de "*valores relativos dos faciès*" do regime hidrológico, que são definidos da maneira seguinte:

Valor decenal relativo úmido	RLA01 = LA01 / ESCANUAL
Valor trienal relativo úmido	RLA033 = LA033 / ESCANUAL
etc, até	RL3AC = L3AC / ESCANUAL

[5] Repetimos, também, inteiramente, o conjunto desse processo de reagrupamento de pluviômetros com as quatro outras bacias: LUZIMAR, GANGORRA, MICROBACIA 2 de SUMÉ e FAZENDA ISABEL; Estas, tinham sido escolhidas para representar, como a bacia de CALDEIRÃO, os cinco grandes grupos ou tipos de bacias identificados no parágrafo 4.5. Obtivemos, com estas quatro bacias, reagrupamentos e uma tipologia dos pluviômetros interamente comparáveis. Pode-se, pois, pensar que essa técnica equivale a aplicar uma filtragem homogênea nas séries pluviométricas. Os desvios eventuais dessa filtragem influenciarão os valores numéricos encontrados, porém, muito menos, os reagrupamentos de pluviômetros, os quais são muito pouco sensíveis à mudança de "filtro". Esses reagrupamentos, praticamente invariáveis, serão, então, utilizados para o zoneamento e a tipologia dos pluviômetros. Esse raciocínio será, também, válido quando se tratar de reagrupar bacias.

4.3.3.2 Definição de duas grandes zonas climáticas

Na figura 4.3.3, plotamos o logaritmo do escoamento médio anual em função da precipitação média anual.
Nessa figura, pode-se identificar claramente dois conjuntos de pontos. O mais elevado corresponde aos pluviômetros situados na **grande zona climática** que chamamos "**SERTÃO**", a qual reagrupa as zonas de 1 a 7 e contém 128 pluviômetros.

A nuvem inferior corresponde aos pluviômetros situados nas zonas climáticas 8 e 9 que pertencem, portanto, a **uma mesma grande zona climática** que denominamos "**TRANSIÇÃO**". Ela representa, parcialmente, a região do Nordeste brasileiro denominada **AGRESTE**, intermediária entre a zona costeira úmida e o Sertão propriamente dito. A zona de "transição" possui 28 pluviômetros.
Estas duas grandes zonas climáticas estão delimitadas na figura 4.3.4. A importância e a nitidez na diferenciação dessas duas zonas era inesperada e constituiu uma inovação.

4.3.3.3 Forma da relação chuva-escoamento anual. O coeficiente L_{600}.

Constatamos que, dentro de cada uma dessas grandes zonas, a regressão entre o logarítmo do escoamento médio anual e a chuva média anual pode ser considerada como linear numa extensa faixa da variação da pluviometria (de 400 a 1.000 ou mesmo 1.100 mm).
Isso significa que se pode estabelecer uma formulação analítica simples entre os valores médios anuais do escoamento (L) e da precipitação (P) de cada pluviômetro.
Essa relação é da forma : $\mathbf{L(P) = K\, e^{AP}}$.

Esta fórmula simples, com dois parâmetros, constitui, a nosso ver, uma novidade visto que os diferentes autores que abordaram esse problema utilizaram um ajustamento polinomial (AGUIAR, 1940) ou gráfico (DUBREUIL *et al*, 1968).
Essa fórmula pode, também, ser escrita como segue:

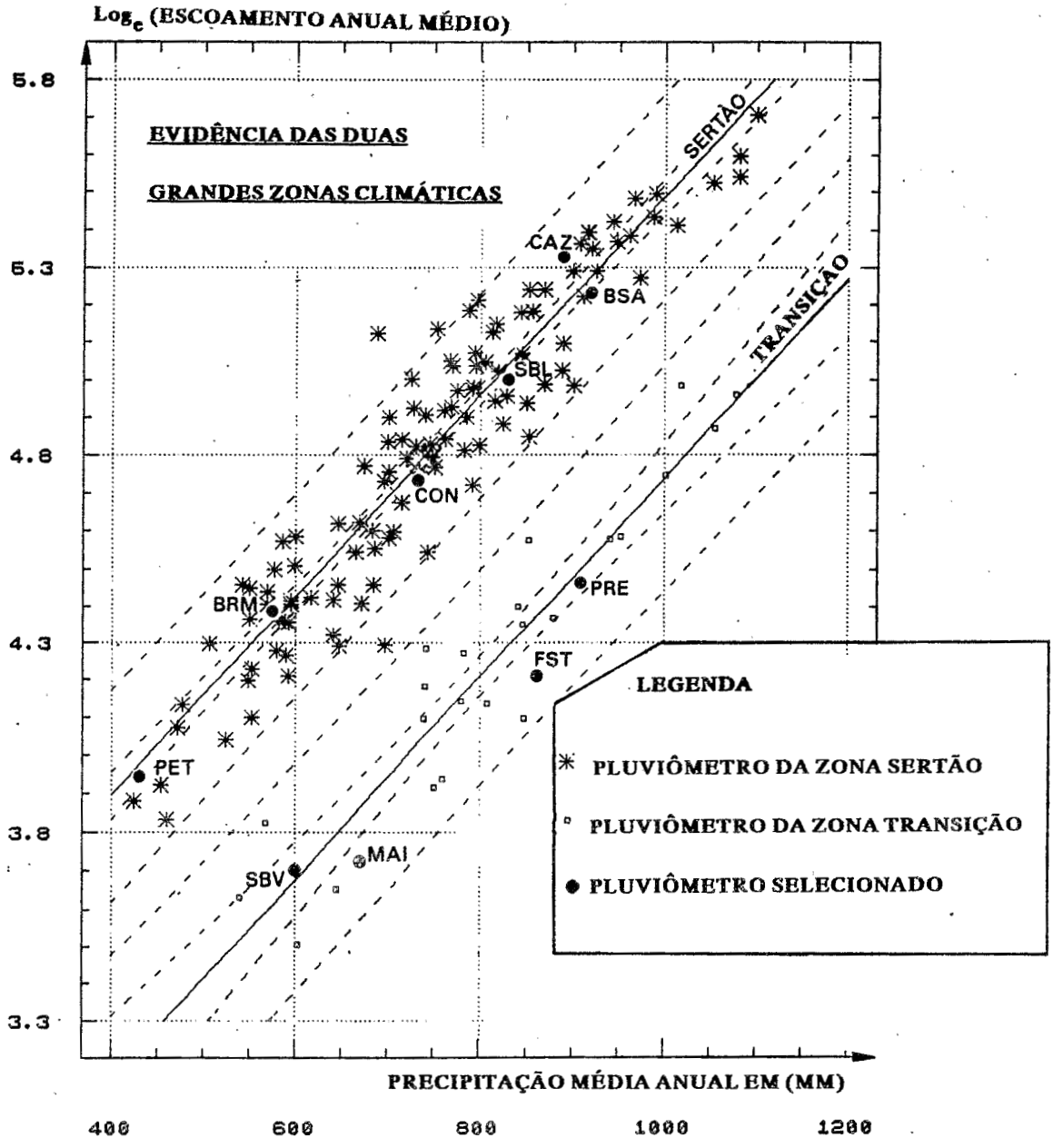
$$\mathbf{L(P) = C\, L_{600}\, e^{A(P-600)}}$$

C é um fator de correção climático.

Adotamos C = 1 para a zona do Sertão. O coeficiente L_{600} é, então, definido pela interseção da regressão entre L(P) e P com a reta P = 600 mm.

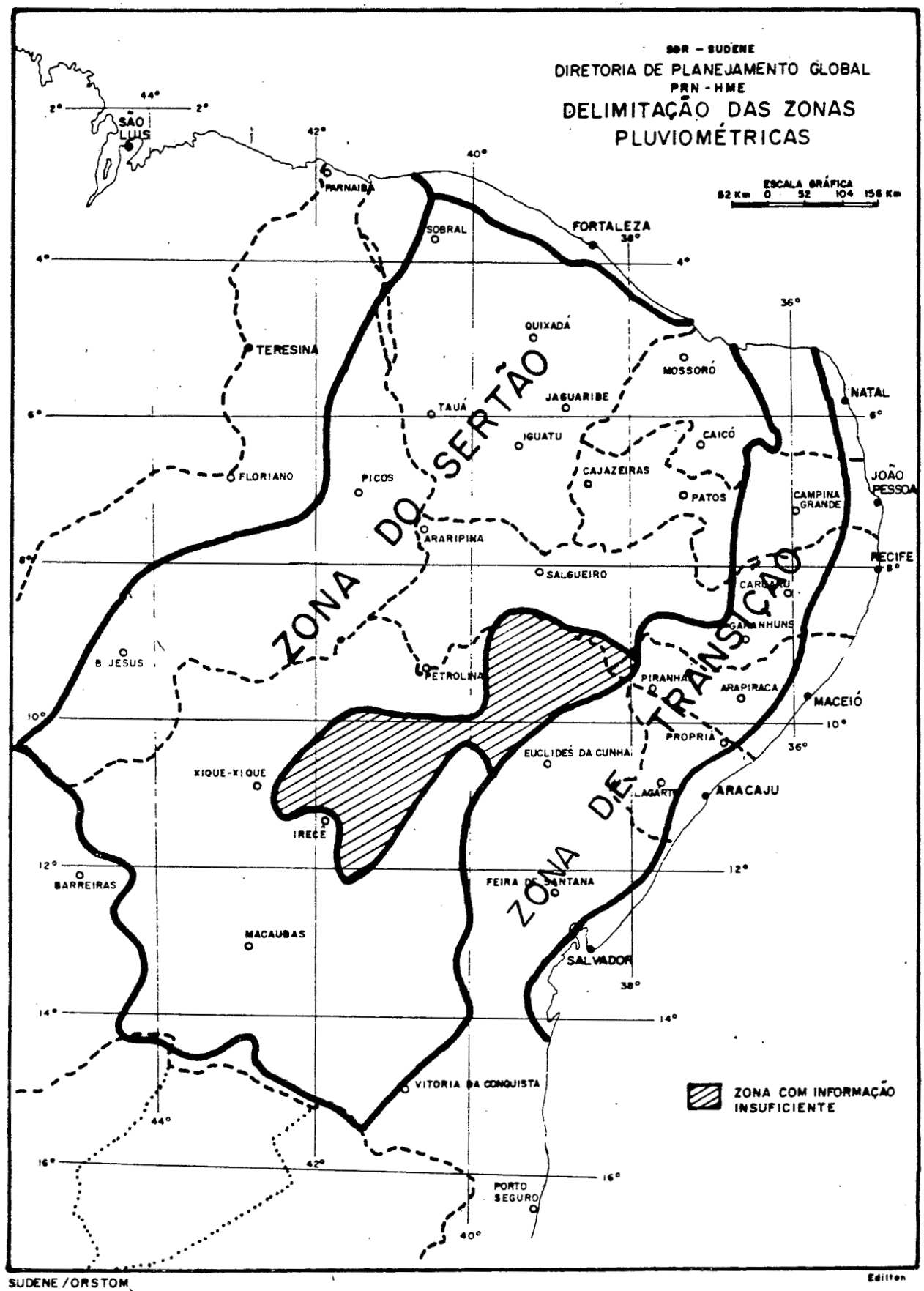
Esta última fórmula introduz os dois coeficientes $\mathbf{L_{600}}$ e A que servirão de base à tipologia das bacias que desenvolveremos no parágrafo 4.5.

Figura 4.3.3: Diferenciação das duas grandes zonas climáticas



L_{600} corresponde, portanto, ao escoamento médio anual na grande zona climática SERTÃO, com um pluviometria média anual de 600 mm.

Figura 4.3.4: "Grandes" zonas pluviométricas



Discussão:

Essa formulação significa que uma determinada elevação da pluviometria (aumento aritmético), induzirá a uma multiplicação dos escoamentos por um fator constante (aumento geométrico). Assim, cada 100 mm de chuva suplementar, provoca um crescimento de 40% dos escoamentos. Não temos explicação física simples a propor para justificar esta formulação que parece válida para uma faixa ampla da pluviometria anual (de 400 a pouco mais de 1.000 mm).

Será que essa formulação resulta, parcialmente, de uma conseqüência do tipo de modelo utilizado? Não podemos responder a esta questão. Constatamos, no entanto, que a função que propomos se aproxima e é compatível com aquelas propostas por outros autores como AGUIAR ou DUBREUIL *et al*, já citados (ver fig.4.6.8). Ela é confirmada pelo método de utilização dos dados da rede geral que apresentamos mais adiante.

Essa formulação só se aplica às regiões onde a maioria dos escoamentos provém de escoamento de superfície, que corresponde à faixa de validade de nossos modelos, concebidos para representarem um funcionamento hidrológico próprio às regiões semi-áridas. Verificamos que, acima de um certo limite pluviométrico, essa fórmula não poderá, absolutamente, ser mais utilizada, visto que os escoamentos poderiam ultrapassar o valor das precipitações. Isso condiz com os valores mais fracos dos coeficientes A encontrados para as bacias cujas L_{600} são elevadas.

4.3.3.4 A grande zona climática do Sertão

Análise em componentes principais

Uma análise em componentes principais, permite reagrupar os pluviômetros dentro de cada grande zona climática.
Só pudemos estudar 121 dos 128 pluviômetros da grande zona climática SERTÃO, pois, tivemos que eliminar 7.

Os componentes:

Os três primeiros componentes explicam 96,5% da variância.
As variáveis analisadas são os "*faciès*" do regime hidrológico definido acima[6]. Os indivíduos são os pluviômetros.

Assinalamos a enorme semelhança entre a análise efetuada com todos os pluviômetros e aquela efetuada com os pluviômetros de qualidade 3 e 4.

[6] LA01, lâmina decenal úmida, LA033 etc, até LA09 e L3AC, calculadas utilizando cada um dos 121 pluviômetros do sertão, como entrada do modelo de simulação SUDENE/ORSTOM, ajustado no posto de CALDEIRÃO.

TABELA 4.3.4 Zoneamento pluviométrico da zona Sertão.

a) Porcentagem de variância explicada para cada componente.

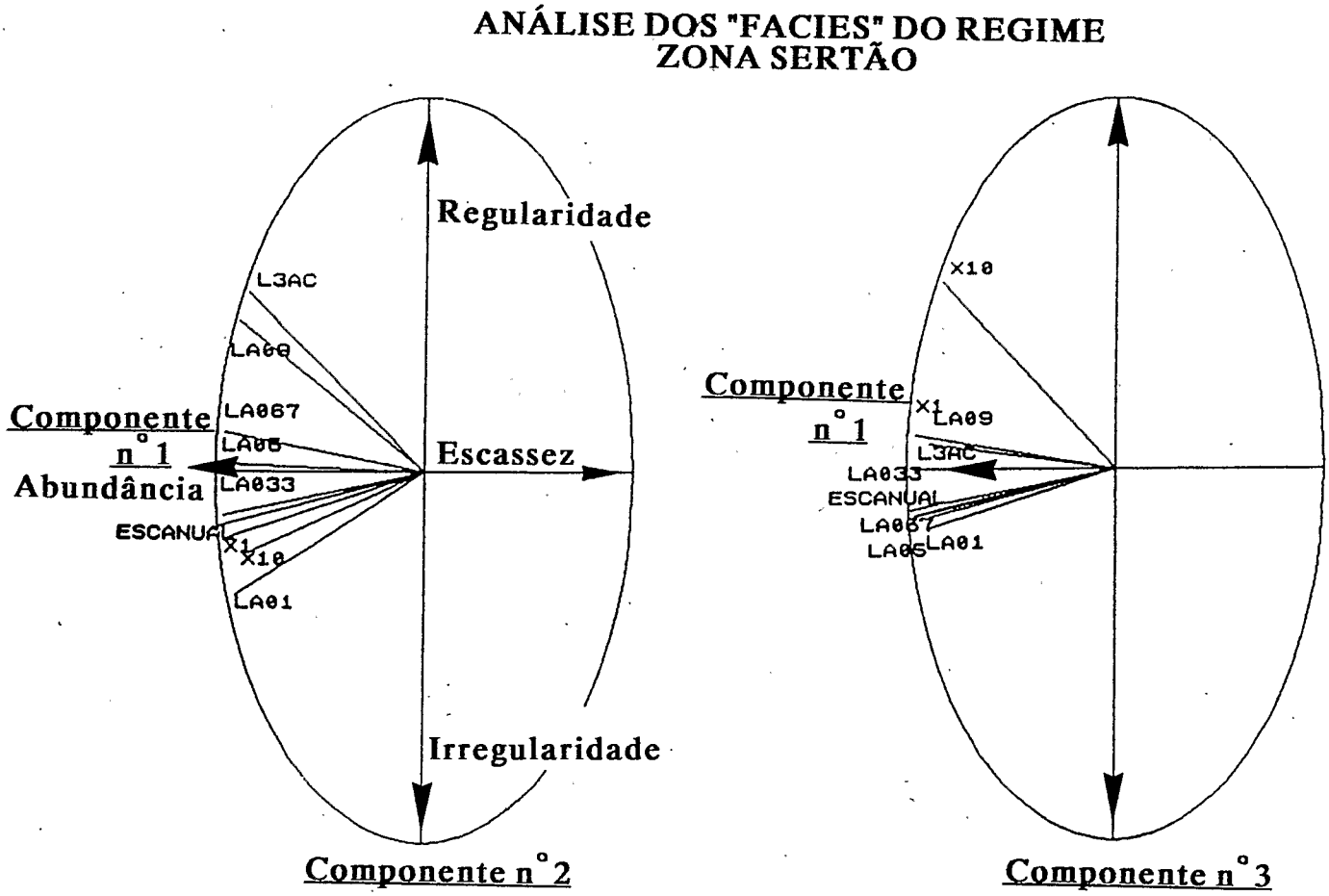
TODOS OS PLUVIÔMETROS			PLUVIÔMETROS DE QUALIDADES 3 E 4		
Componente	Porcentagem da variância	Porcentagem acumulada	Componente	Porcentagem da variância	Porcentagem acumulada
1	86.48386	86.48386	1	85.69452	85.69452
2	6.44287	92.92672	2	6.82385	92.51836
3	3.49482	96.42154	3	4.02128	96.53965
4	1.30069	97.72223	4	1.22624	97.76588

b) Coordenadas dos três primeiros componentes

	TODOS OS PLUVIÔMETROS			PLUVIÔMETROS DE QUALIDADES 3 E 4		
	COMPONENTE			COMPONENTE		
"FACIES"	1	2	3	1	2	3
LA01	-0.92429	-0.23613	-0.18041	-0.90711	-0.32319	-0.15765
LA033	-0.96428	-0.08973	-0.17346	-0.96695	-0.11351	-0.12046
LA05	-0.96775	0.03648	-0.16938	-0.97236	0.01996	-0.13949
LA067	-0.96469	0.16211	-0.05721	-0.95932	0.10147	-0.12486
LA09	-0.87563	0.41606	0.10059	-0.89026	0.40355	0.06627
L3AC	-0.87608	0.37866	0.16737	-0.84832	0.47899	0.06343
X1	-0.95944	-0.19287	0.09470	-0.96097	-0.17516	0.09021
X10	-0.83988	-0.35216	0.40076	-0.83105	-0.20815	0.50887
ESCANUAL	-0.98593	-0.10359	-0.11059	-0.98110	-0.14077	-0.10955

O primeiro eixo ou componente que explica, sozinho, mais de 85% da variância é, portanto, preponderante. Pode ser chamado **eixo de abundância**. Todas as "variáveis" entram, aí, com um peso equivalente. Escolheremos, naturalmente, a variável ESCANUAL para representar este primeiro eixo. ESCANUAL corresponde ao escoamento médio anual ou ainda à variável L(P) do parágrafo precedente.

Figura 4.3.5: Análise dos componentes do regime pluviométrico da zona Sertão.



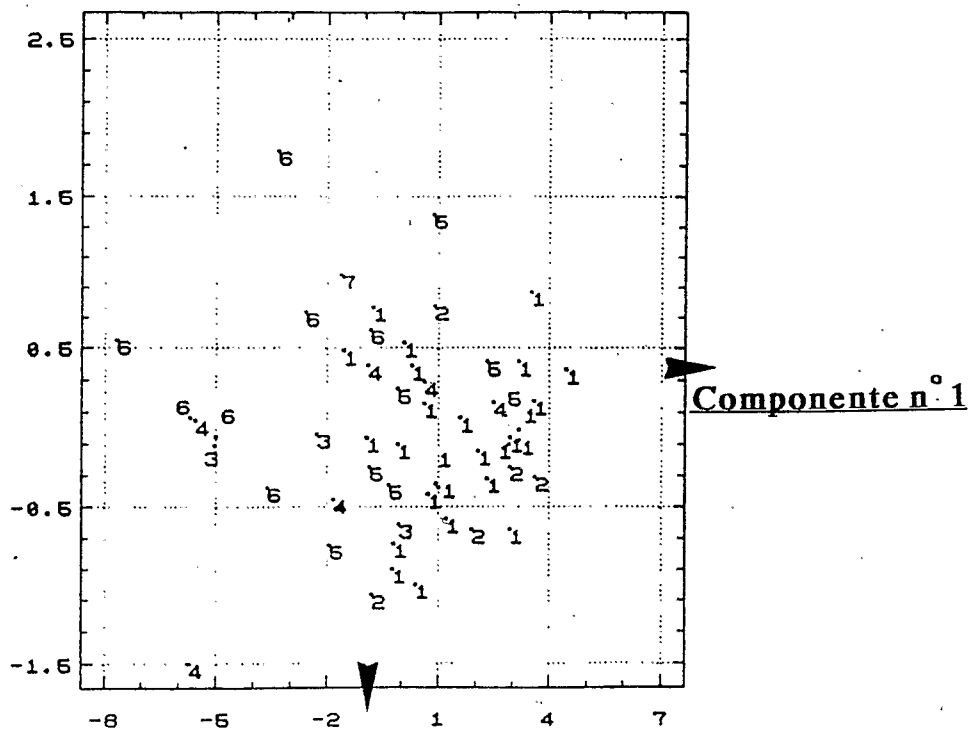
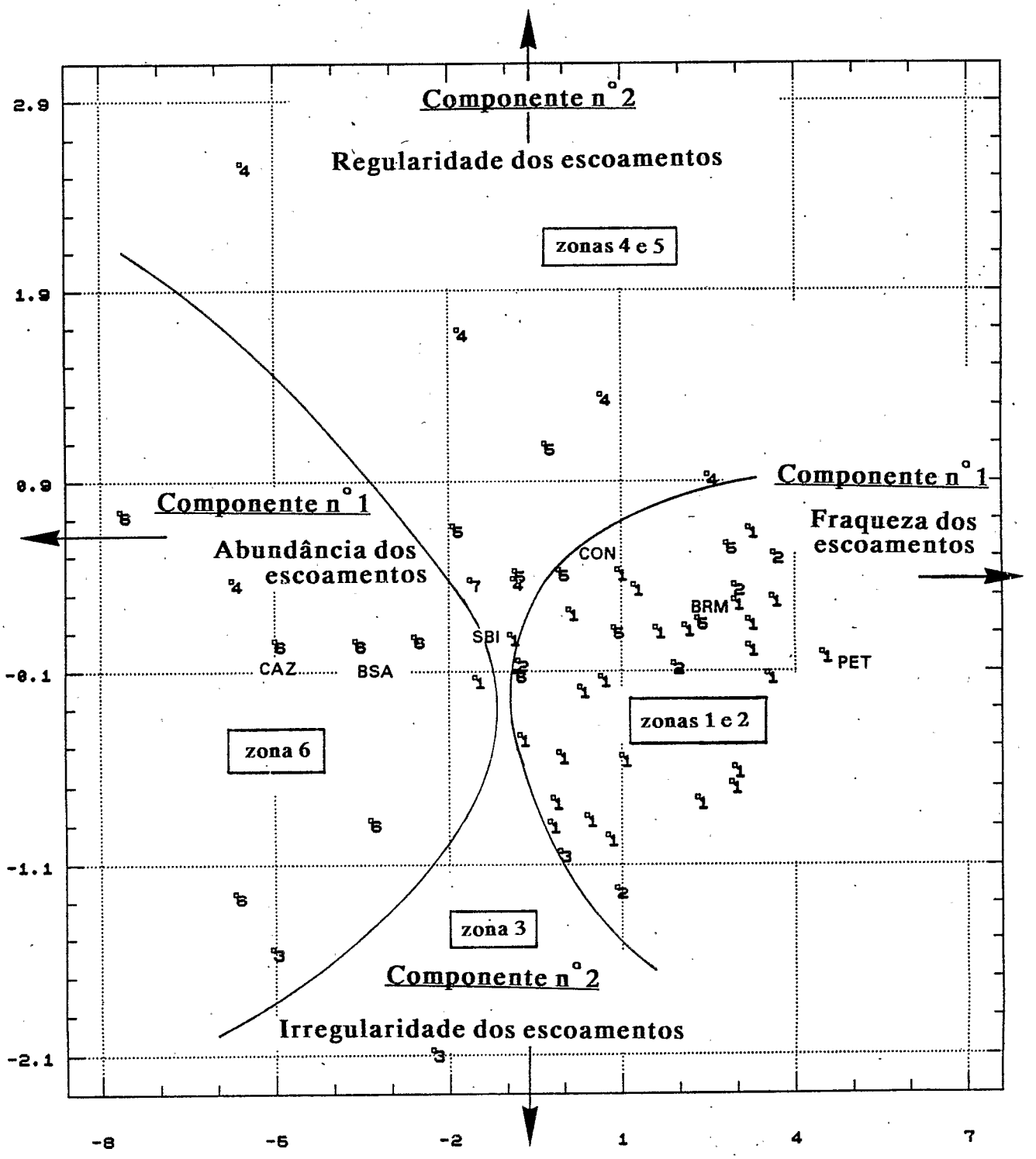


Figura 4.3.6: Os componentes do regime pluviométrico. Reagrupamento dos pluviômetros.



O segundo eixo, que explica de 6 a 7% da variância, pode ser chamado **eixo de regularidade**. Os escoamentos nos anos secos (LA09 e L3AC) opõem-se às cheias e aos anos de pluviometria excedentária (X1 e LA01). Este eixo pode ser representado por LA09.

O terceiro eixo que só explica 4% da variância tem uma interpretação mais delicada. Ele opõe os anos fortes ou normais (LA05, LA033 e LA01) às cheias (X1 e X10). Este eixo poderia ser representado por X10.
Poderíamos tentar explicar este terceiro eixo da seguinte maneira:
"Quando as cheias excepcionais são muito fortes, as pequenas cheias (as que acontecem 5, 10 ou 15 vezes por ano) deverão ser, para compensar, mais fracas, o que explica que, paradoxalmente, os escoamentos dos anos abundantes e normais, cujo volume total é, principalmente, composto de numerosas pequenas cheias, opõem-se às fortes cheias".

Reagrupamento das zonas pluviométricas da grande zona SERTÃO

A figura 4.3.6 situa os pluviômetros em relação aos dois primeiros componentes. As duas zonas climáticas 1 e 6 são nitidamente diferenciadas. A zona 6 é caracterizada por uma abundância dos escoamentos mais elevada. As outras zonas são representadas por um número menor de pluviômetros que tornam as tendências constatadas menos significativas.

As zonas 2 e 5 poderiam reagrupar-se à zona 1, enquanto que as zonas 3 e 4 parecem intermediárias entre as zonas 1 e 6. A zona 4 é mais regular (LA09 elevados e cheias fracas). A zona 3 está próxima da zona 5, porém, com um regime mais regular.

No plano dos componentes 2 e 3 (Figura 4.3.5), os reagrupamentos e sua interpretação são menos evidentes.

Conclusão da análise para a zona Sertão

Concluindo, este zoneamento permitiu-nos definir três variáveis explicativas principais dos regimes da grande zona Sertão, que são:

- O escoamento médio anual: ESCANUAL
- A lâmina anual decenal seca: LA09
- A cheia anual: X1

Dentre as 7 zonas climáticas inciais da grande zona Sertão, dois conjuntos se destacam:

- As zonas 1, 2 e 5
- As zonas 3 e 6 (A zona 3, situada no limite Noroeste do Sertão é a mais irregular).

A zona 4, situada ao Sudoeste do Sertão, parece intermediária entre esses dois conjuntos pela sua abundância de escoamentos, mas claramente mais regular.

Comparação dos escoamentos na zona 6 com o resto do Sertão

Procuramos, naturalmente, da melhor maneira possível, definir a abundância dos escoamentos (se bem que relativa nas regiões semi-áridas) da zona 6.

Constatamos na figura 4.3.7 que, para uma pluviometria anual de cerca de 600 mm, os escoamentos anuais médios, calculados com os pluviômetros da zona 6, são superiores em 30 a 40 % aos escoamentos do resto do Sertão. Essas diferenças são atenuadas quando a pluviometria aumenta. Não existe na zona 6 pluviômetros cujo total seja nitidamente inferior a 600 mm.
A explicação dessa **abundância da zona 6** poderia estar ligada às anomalias da lei de distribuição das fortes chuvas. Resta encontrar a explicação climática regional dessa zona singular, completamente cercada pela zona 1, menos abundante. Será, talvez, que, os cúmulos-nimbos ali seriam mais volumosos? ou mais freqüentes? e por que?

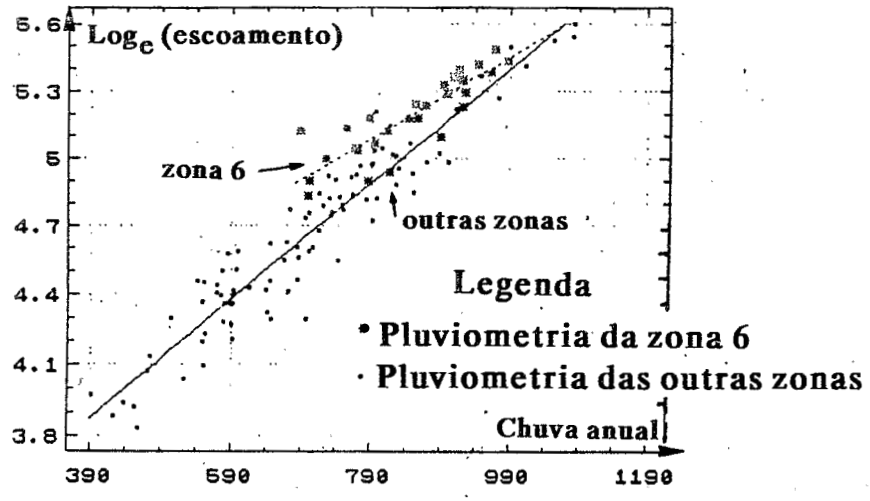


Figura 4.3.7: Evidência da abundância dos escoamentos na zona 6

4.3.3.5 A grande zona climática de Transição

Procedemos a uma análise, análoga àquela realizada para o Sertão, em componentes principais dos pluviômetros da zona de Transição. O número de pluviômetros é de apenas 28. Assim, analisamos o maior número possível de pluviômetros.
Encontramos, da mesma maneira, um eixo de "*abundância*", que explica 87 % da variância e um eixo de "*regularidade*", que não explica mais que 6 %.
A figura 4.3.8 mostra que a zona 8 é em média mais abundante em escoamentos que a zona 9, mas não permite que se efetue o reagrupamento de pluviômetros em função de sua regularidade. A figura 4.3.9 mostra que, para a mesma pluviometria, essas duas zonas não podem ser claramente diferenciadas. Desse modo, reuniremos as duas para prosseguimento dos nossos estudos.

Figura 4.3.8: Análise em componentes principais do regime pluviométrico da zona de Transição

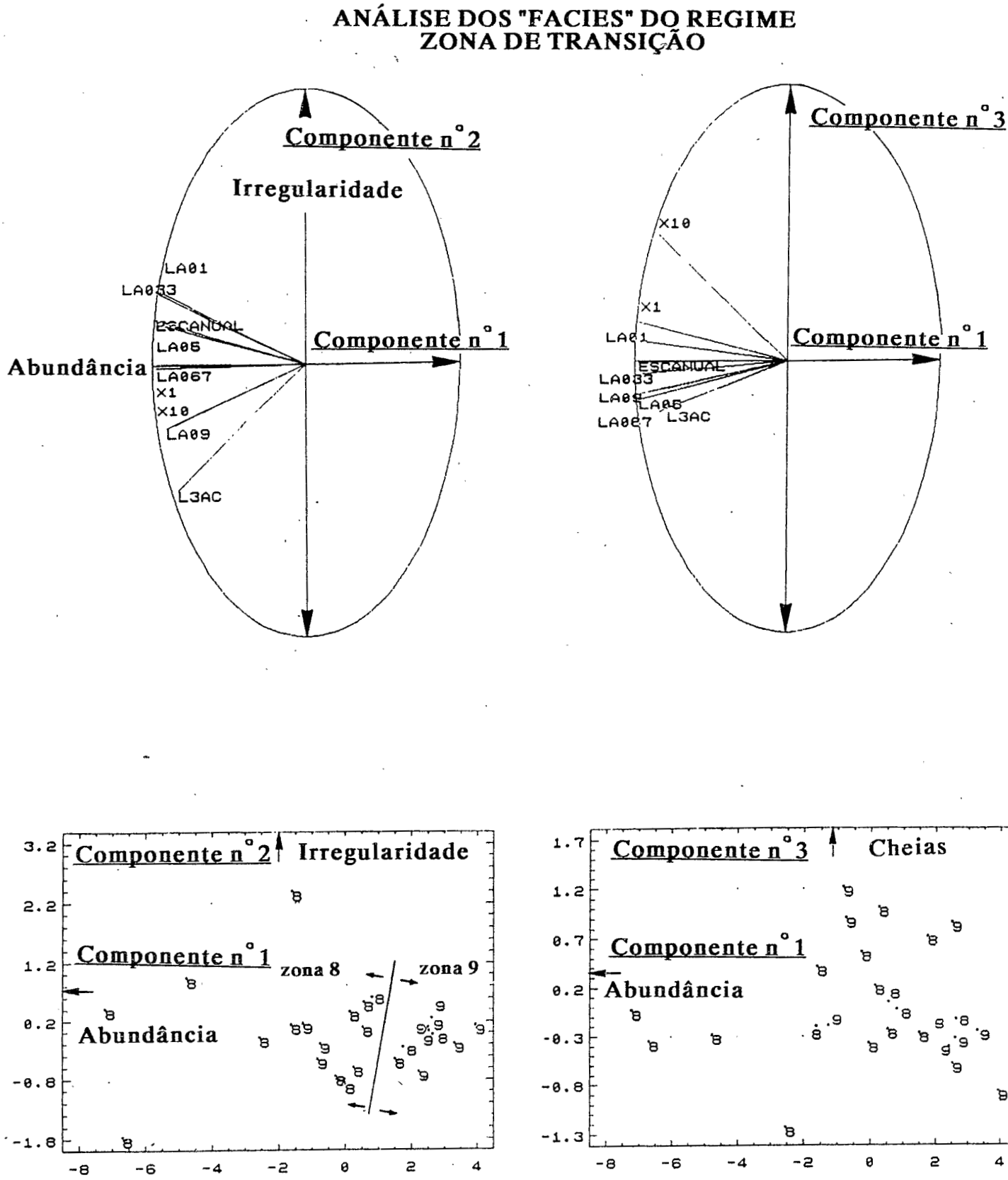


TABELA 4.3.5 : Zoneamento pluviométrico da zona de Transição.

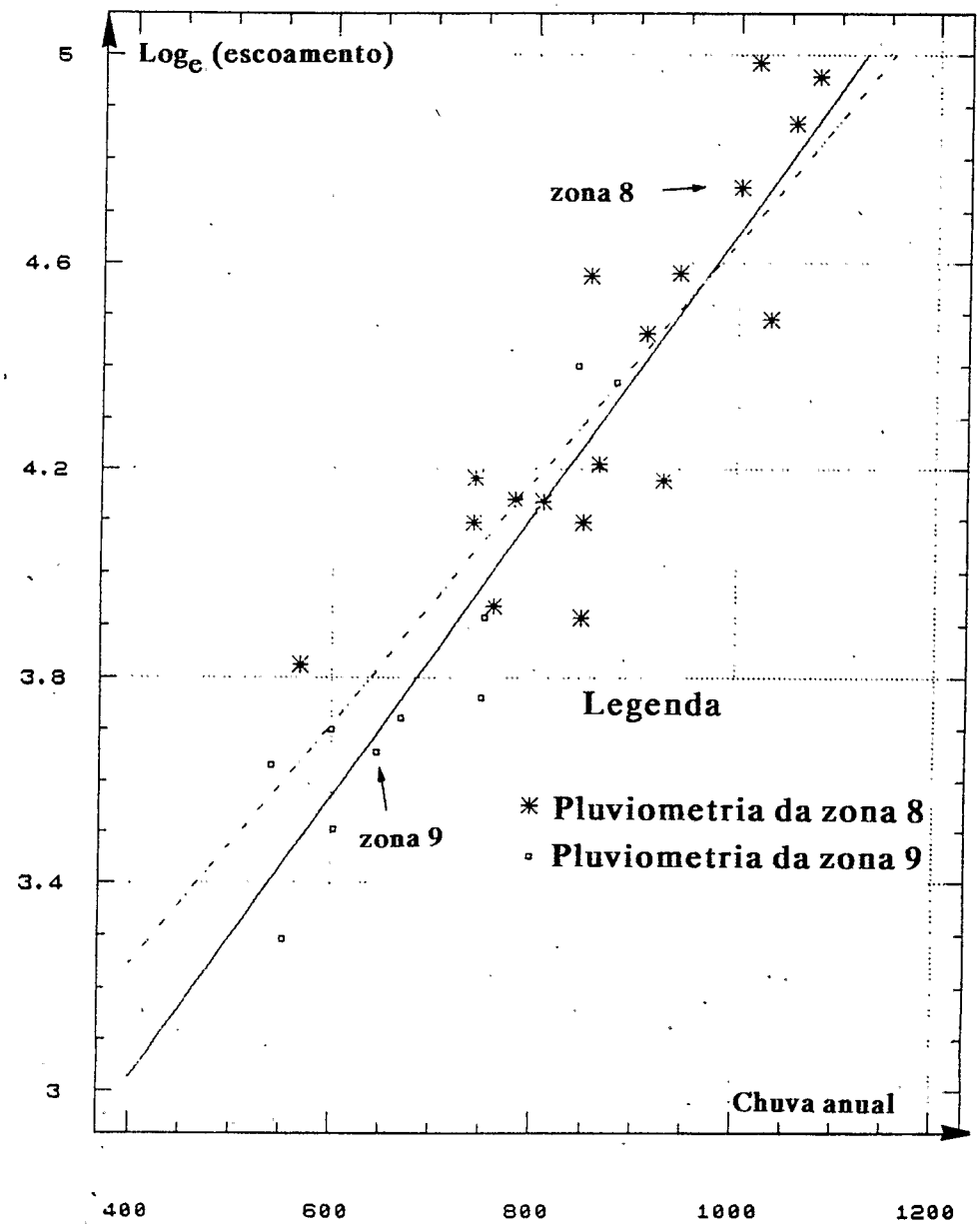
a) Porcentagem de variância explicada para cada componente.

Componente	Porcentagem da variância	Porcentagem acumulada
1	87.32608	87.32608
2	5.76498	93.09106
3	3.71083	96.80189
4	1.67139	98.47329
5	.72204	99.19532
6	.29967	99.49499
7	.26213	99.75712
8	.13965	99.89677
9	.10323	100.00000

b) Coordenadas dos três primeiros componentes

"FACIES"	COMPONENTE 1	2	3
LA01	-0.94818	0.26715	0.07094
LA033	-0.95506	0.25944	-0.05254
LA05	-0.96992	0.15393	-0.12730
LA067	-0.96863	0.00175	-0.15079
LA09	-0.90798	-0.24090	-0.12073
L3AC	-0.83898	-0.46653	-0.19966
X1	-0.97746	-0.01314	0.14513
X10	-0.85306	-0.22810	0.46012
ESCANUAL	-0.97863	0.16909	-0.00490

Figura 4.3.9: Comparação dos escoamentos das zonas 8 e 9



4.3.4 Seleção final dos pluviômetros

Para diminuir o número de simulações necessárias à comparação dos regimes e à tipologia das 42 bacias é necessário selecionar um número muito pequeno de pluviômetros, assegurando-se, porém, que eles representam os diversos aspectos dos regimes hidrológicos das bacias na maior faixa de variação possível.

Selecionamos, para cada grande zona, o número mínimo de pluviômetros que permitisse representar todos os "*faciès*" do regime, sem induzir uma distorção excessiva. O número de pluviômetros dessa seleção final eleva-se a 6 para a grande zona do Sertão e a 4 para a de Transição. Uma lista complementar indica 5 outros pluviômetros de excelente qualidade que poderiam, também, ter sido utilizados, sem alterar, de maneira significativa, os resultados finais.

Por outro lado, esses pluviômetros foram escolhidos para assegurar a melhor "cobertura geográfica" possível do Nordeste semi-árido. É interessante constatar, que os "*faciès*" do regime hidrológico do pluviômetro de Barra dos Mendes (BRM), situado a quase 1.000 km ao sul de Sobral (SBL), sejam semelhantes, embora seus mecanismos climáticos e distribuições estacionais das precipitações, sejam bem diferentes nestas duas regiões!

TABELA 4.3.6 Lista dos pluviômetros selecionados.

	ESCOLHA FINAL										LISTA COMPLEMENTAR				
GRANDE ZONA :	SERTÃO						TRANSIÇÃO				SERTÃO				
Pluviômetro	PET	BRM	CON	SBL	CAZ	BSA	SBU	MAI	FST	PRC	SAL	SET	FEI	ICO	TAT
Zona climática	1	5	5	2	6	6	9	9	8	8	1	1	1	1	1
Total anual (mm)	439	576	734	826	895	922	600	668	863	910	579	592	721	731	795

Os pluviômetros selecionados foram, igualmente, plotados no mapa de localização, no gráfico de relação chuva-descarga, bem como nos dos componentes principais.

Validação da escolha desses 10 pluviômetros

O quadro 4.3.8 evidencia e resume as distroções provocadas pela seleção dos pluviômetros. Os números apresentados no quadro foram calculados da seguinte forma:

- Cálculo da regressão entre cada "faciès" do regime hidrológico e o escoamento médio.
- Cálculo da média correspondente às partes baixa, média e alta de cada regressão, isto é, correspondendo a totais pluviométricos de 400, 600 e 800 mm.
- Estes cálculos são, sucessivamente, efetuados com todos os pluviômetros, com os pluviômetros selecionados e depois com os de qualidade 4.

O quadro 4.3.8 indica as relações entre as médias calculadas com os três conjuntos de pluviômetros assinalados: **Selecionados/todos** e depois **Selecionados/Qualidade 4**.

Este modo de operação fornece, para cada "*faciès*" do regime, uma indicação global da distorção provocada pela diminuição do número de pluviômetros; o valor 1,0 corresponde a uma distorção nula.

TABELA 4.3.7 Validação da seleção dos pluviômetros

Grande zona climática :	SERTÃO		TRANSIÇÃO	
"faciès" do regime hidrológico	Selecionados/ Todos	Selecionados/ Q4	Selecionados/ Todos	Selecionados/ Q4
MÉDIA	0,99	1,00	0,96	1,09
LA01	0,96	0,97	1,12	1,12
LA033	1,07	1,06	0,96	0,93
LA05	1,04	1,00	0,99	0,96
LA067	1,04	1,08	1,10	1,08
LA09	1,07	1,04	0,84	0,91
L3AC	1,01	1,08	1,43	1,41
X1	1,00	1,00	0,99	1,04
X10	1,00	1,00	1,38	1,45

Zona Sertão:

A média, praticamente, não varia, o que é normal, visto que a escolha desses 6 pluviômetros foi feita, primeiramente, para deixar esta média invariável.
Embora permanecendo nos limites do aceitável, esses 6 pluviômetros respeitam, com menos fidelidade, a distribuição frequencial dos totais anuais do conjunto da amostra, sendo a maior diferença relativa de 8% para as lâminas de frequência trienal úmida e, portanto, os desvios de sentido oposto entre as lâminas decenais e trienais úmidas.

A seleção desses seis pluviômetros é fruto de numerosos e laboriosos ensaios. As outras combinações de pluviômetros que foram testados apresentaram desvios relativos globalmente superiores. Essa dispersão é normal, pois seria surpreendente, e pareceria mesmo suspeito, chegar-se, com tão pequeno número de pluviômetros, a uma melhor reconstituição da distribuição do conjunto dos pluviômetros. Com efeito, as séries pluviométricas têm uma duração inferior a 60 ou 80 anos e os valores propostos, para as diversas freqüências, foram calculados através de uma simples interpolação entre os valores cuja frequência enquadra a frequência procurada. Nenhum ajustamento estatístico vem, pois, "atenuar" os degraus da distribuição experimental.

Zona de Transição:

As distorções induzidas pela seleção nessa zona são nitidamente mais elevadas do que na zona climática do Sertão. Elas refletem a maior complexidade dos regimes desta zona intermediária. A pequena amostra de pluviômetros de boa qualidade torna mais difícil abalizar do conjunto ideal de pluviômetros que procuramos. O erro provocado pela seleção é grande, da ordem de 40%, para os anos secos consecutivos (L3AC) e para as cheias decenais (X10).

A figura 4.3.10 mostra a distorção induzida nos diversos "*faciès*" do regime hidrológico pela seleção e redução do número de pluviômetros.

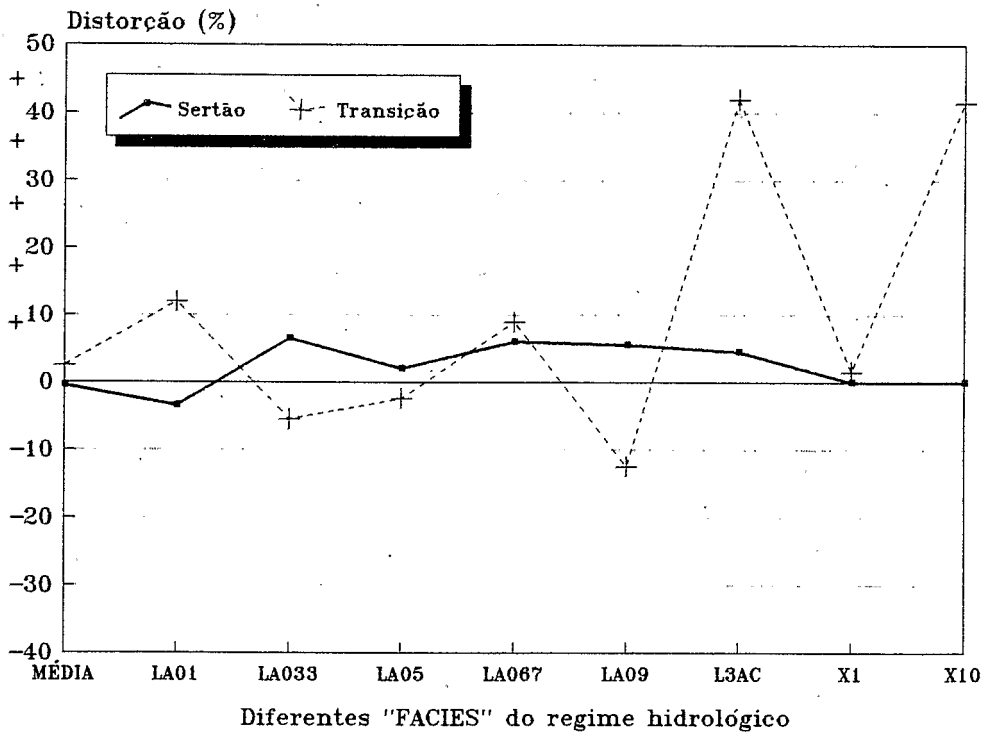


Figura 4.3.10: Distorção induzida pela seleção dos pluviômetros.

4.4 A REDUÇÃO DAS CHUVAS

4.4.1 Lembrete teórico

A lei de distribuição estatística das chuvas médias calculadas numa bacia de superfície S é diferente da das chuvas pontuais. ROCHE (1963) definiu o **coeficiente de redução** R das chuvas para um período de retorno T e uma superfície S como sendo a relação:

$$R = \frac{\text{Chuva média sobre a superfície S de período de retorno T}}{\text{Chuva pontual de mesmo período de retorno T}}$$

Os modelos de simulação *chuva x deflúvio* foram ajustados às séries das chuvas médias calculadas para cada bacia. É necessário, portanto, corrigir, através de um coeficiente de redução, as séries pluviométricas pontuais que servirão "*de entrada*" para o mesmo modelo, o qual será utilizado para obter séries de descargas fictícias chamadas "*de longa duração*".

NOUVELOT *et al* (1979) propõem o ábaco reproduzido na figura 4.4.1 que representa as variações do coeficiente de redução em função da superfície da bacia e da frequência da chuva pontual. Este ábaco foi estabelecido a partir das observações efetuadas durante sete anos, nos 44 pluviômetros da Bacia do Riacho do Navio. Os valores propostos por NOUVELOT *et al* são nitidamente superiores aos obtidos por VUILLAUME (1974), na África, o qual propõe a seguinte equação:

$$R = 1 - (9\log T - 43{,}10^{-3} P + 152 \pm 10) * 10^{-3} * \log(S)$$

sendo P a pluviometria anual e T o período de retorno.

4.4.2 Coeficiente de redução proposto para as fortes chuvas

A aplicação do ábaco proposto por NOUVELOT *et al* conduz, para uma superfície de 500 km^2, à adoção de um coeficiente de redução R de 0,70 para chuvas de 105 mm e de 0,76, para chuvas de 60 mm. Estas chuvas de 105 e 60 mm correspondem, respectivamente, aos períodos de retorno decenais e anuais.

Tabela 4.4.1: Comparação entre os coeficientes de redução propostos por VUILLAUME e NOUVELOT

	S(km2)	1	10	50	100	500
Proposto	T = 1 ano	1,0	0,873	0,78	0,75	0,66
por	T = 10 anos	1,0	0,864	0,77	0,73	0,63
Vuillaume	T = 100 anos	1,0	0,855	0,75	0,71	0,61
Proposto	T = 1 ano	-	-	0,89	0,87	0,76
por	T = 10 anos	-	-	0,85	0,83	0,71
Nouvelot	T = 100 anos	-	-	0,80	0,78	0,67

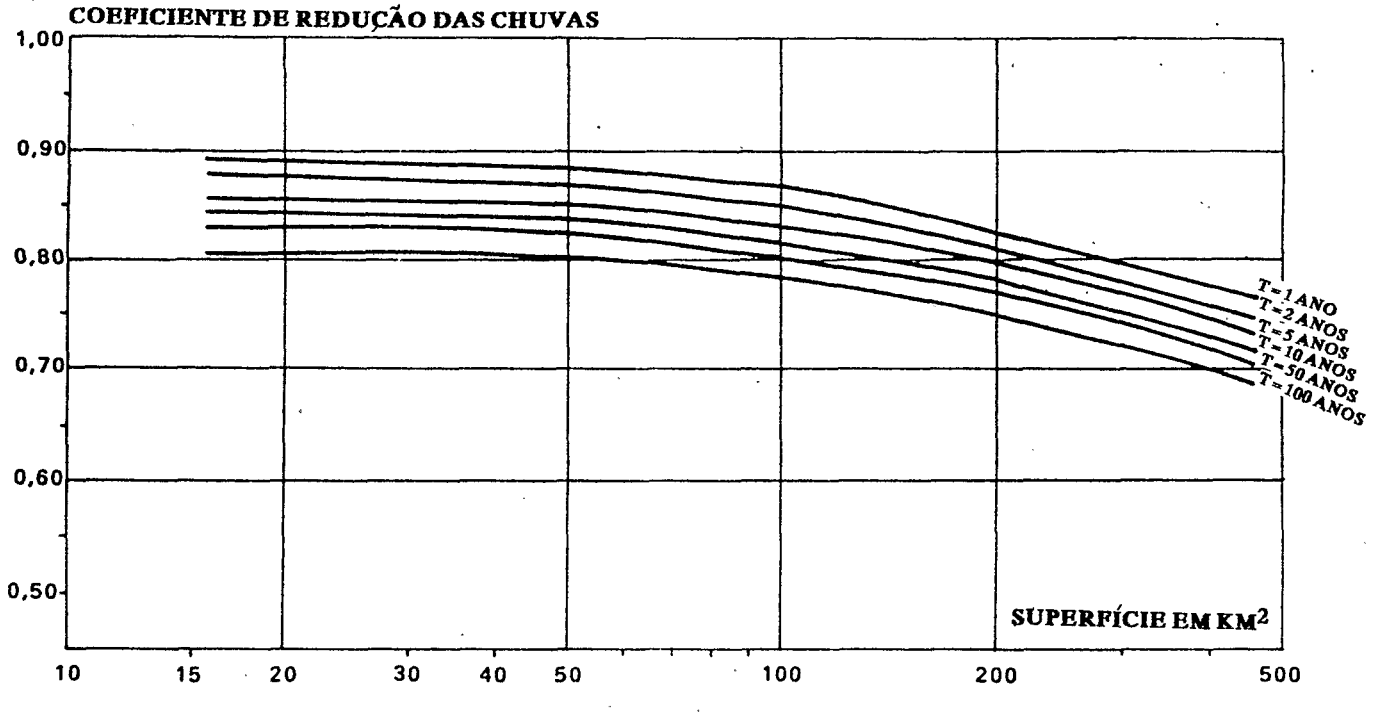


Figura 4.4.1: Coeficiente de redução em função da superfície da bacia e do período de retorno da chuva pontual

4.4.3 Correção para as chuvas fracas

A aplicação desses coeficientes de redução das chuvas fortes provoca uma diminuição dos totais anuais.

Para compensar essa diminuição é preciso que seja aplicado às chuvas fracas um coeficiente de redução superior à unidade ou aumentar o número de dias de chuva.

A forma da curva R = f(P diária) corresponde, pois, ao esquema seguinte:

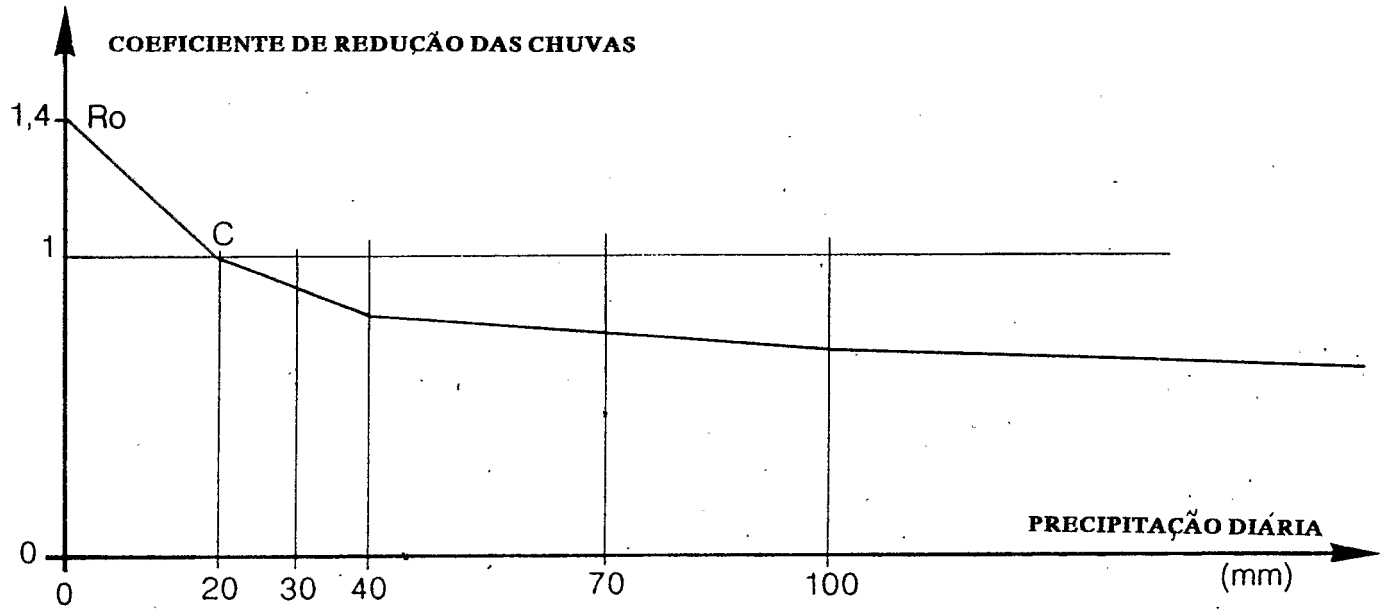


Figura 4.4.2: Variação do coeficiente de redução em função da chuva diária *(para uma bacia de 500 km²)*

Existe uma altura de chuva que chamamos de chuva "*pivô*", abaixo da qual o coeficiente R é superior à unidade.

Por aproximações sucessivas adotamos um valor de 20 mm para essa chuva "pivô". Assimilando a curva R_0C a uma reta, calculamos, em seguida, para as séries diárias dos 23 pluviômetros referidos no quadro 4.4.2, a ordenada do ponto R_0 que permite compensar a diminuição dos totais pluviométricos anuais induzidos pelo coeficiente de redução.

TABELA 4.4.2 Coeficiente Ro para diferentes pluviômetros

Sigla	Pluviômetro	P. anual (mm)	Ro	Sigla	Pluviômetro	P. anual (mm)	Ro
SUR	SURUBIM	1050	1,13	CED	CEDRO	820	1,44
TIM	TIMBAUBA	650	1,24	ARU	ARACATIAÇU	650	1,41
MAI	MAJOR ISIDORO	670	1,18	DMA	DOM MAURICIO	1000	1,40
PRC	PORTO REAL DO COLEGIO	900	1,17	PRI	PRINCESA ISABEL	820	1,68
LIN	LIMOEIRO DO NORTE	730	1,45	SUM	SUMÉ	560	1,49
-	CRATO	1090	1,91	CRU	CRUZE A	560	1,41
JAR	JARDIM	780	1,59	-	SANTA CRUZ	530	1,29
IRE	IRECÊ	580	1,58	SE	SERRA TALHADA	630	1,48
BJL	BOM JESUS DA LAPA	830	1,51	AFO	AFOG. DA INGAZEIRA	590	1,52
FRP	FREI PAULO	820	1,19	BET	BETÂNIA	520	1,48
NSD	NOSSA SENHORA DAS DORES	1050	1,21	PET	PETROLINA	430	1,63
-	MAMANGUAPE	1370	1,44				

R_o parece independente da pluviometria anual do pluviômetro. Sua média aproxima-se de 1,40.

4.4.4 Fórmulas de correção propostas

Por falta de informações mais completas, decidimos calcular a redução das chuvas por interpolação linear entre os dois quadros 4.4.3 e 4.4.4 seguintes.

Propomos, primeiramente, **os coeficientes de redução, para uma bacia de 500 km²**:

Tabela 4.4.3: Coeficiente de redução R em função da chuva diária para uma bacia de 500 km²

Chuva diária P (mm)	0	20	30	40	70	100	200
Coeficiente de redução R	1,40	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65

Para **superfícies inferiores a 500 km²**, estabelecemos, sempre a partir do mesmo ábaco de NOUVELOT, o quadro a seguir que permite modular a correção definida para 500 km².

Tabela 4.4.4: Proporção do coeficiente de correção "r" a ser aplicado em função da superfície

Superfície da bacia (S)	30	50	100	200	300	400	500km²
Coeficiente de correção a aplicar (r)	0	0,25	0,45	0,70	0,80	0,90	1,00

Para calcular o coeficiente de redução de uma bacia de uma superfície qualquer, aplicar a fórmula:

Redução final = 1 - r(1 - R)

Utilizar depois os dois quadros 4.4.3 e 4.4.4 interpolando linearmente em função de P e S.

Exemplo de cálculo:

Calculemos, por exemplo, o coeficiente de redução numa bacia de 150 km^2, corespondendo a uma chuva pontual de 50 mm:

$$R = 0,8 + \frac{(0,75 - 0,80) \times (50\ mm - 40\ mm)}{(70\ mm - 40\ mm)} = 0,783 \qquad \text{para } 500\ km^2$$

$$r = 0,45 + \frac{(0,70 - 0,45)(150\ km^2 - 100\ km^2)}{(200\ km^2 - 100\ km^2)} = 0,625$$

Redução final = 1 - 0,625(1 - 0,783) = 0,865 para 150 km^2

Assim, uma chuva pontual de 50 mm corresponderá pois a uma chuva média de 50 x 0,865 = 43,2 mm, em uma bacia de 150 km^2.

Este exemplo reproduz o algoritmo utilizado no modelo SUDENE/ORSTOM.

4.4.5 Discussão - Pertinência da redução

Hipóteses efetuadas

Os ábacos e quadros que propomos são o resultado de um certo número de hipóteses simplificadoras. Essas hipóteses referem-se, primeiramente, aos valores de R propostos, depois à existência e ao valor da chuva "pivô", e, enfim à linearidade das variações do coeficiente de redução em função da chuva diária entre a origem e e a chuva "pivô".

Uma outra escolha do valor da chuva "pivô" teria conduzido, evidentemente, a um R_o diferente.

Consequência sobre os escoamentos de bacias de superfície superior a 30 km^2

O quadro a seguir permite comparar as lâminas anuais médias calculadas, com e sem aplicação de coeficiente de redução, para as 7 maiores bacias estudadas.

Tabela 4.4.5: Conseqüência da redução das chuvas sobre o cálculo dos escoamentos anuais

Sigla	Bacia	Superf (km^2)	Coeficiente r	Escoamento com redução / Escoamento sem redução
PIR	PIRANGI	194	0,60	0,76
GA2	GANGORRA	137	0,50	0,79
MAT	MATRIZ	470	1,00	0,73
OSB	OSCAR BARROS	45	0,25	0,91
LGR	LAGOA GRANDE	321	0,75	0,69
BPC	BATATEIRAS	203	0,70	0,78
MVE	MISSÃO VELHA	323	0,80	0,77

O coeficiente de redução foi concebido, inicialmente, para corrigir os volumes e as descargas das cheias. Constatamos que a diminuição do escoamento anual provocada pela introdução, no modelo SUDENE/ORSTOM, da redução das chuvas, está longe de ser desprezível, visto que ela é da ordem de 20 a 30% para bacias de superfície superior a 100 km^2. Assim, para esse tamanho de bacia, uma modificação das hipóteses sobre os coeficientes R, r, R_0 ou, ainda, da pluviometria pivô, deve ocasionar uma variação importante da estimativa dos escoamentos anuais obtidos por modelização.

Conseqüências sobre o método de transposição

No entanto, as consequências de um erro eventual na utilização dos coeficientes de redução das chuvas deverão ser, no final, relativamente moderadas em relação à tipologia das bacias e ao método de transposição que elaboramos. Por um lado, porque a redução que propomos só afeta 15% das bacias modelizadas e, por outro lado, porque constatamos que os mecanismos hidrológicos nessas grandes bacias são, infelizmente, complexos demais para serem utilizados de forma decisiva na elaboração da tipologia de bacias e que eles serão, naturalmente, reservados a um papel de validação e de verificação das hipóteses efetuadas.

4.5 TIPOLOGIA DAS BACIAS

O objetivo é de evidenciar vínculos entre as variáveis hidrológicas e os parâmetros do meio natural apoiando-se em observações conjuntas (DUBREUIL et al, 1975)

4.5.1 Caracterização e reagrupamento de bacias

4.5.1.1 A abundância: a média dos escoamentos

A análise em componentes principais que efetuamos no capítulo precedente, quando selecionamos os pluviômetros, mostrou-nos que o anteriormente denominado "*eixo de abundância*" explicava mais de três quartos da variância dos regimes hidrológicos. Esse eixo de abundância pode ser representado pelo módulo ou o escoamento anual médio.

Os coeficientes L_{600} e A permitem calcular o módulo (L(P) para cada zona climática, em função da pluviometria P, aplicando-se a fórmula:

$$L(P) = L_{600} * e^{A(P-600)}$$

Calculamos, para cada uma das 42 bacias, os coeficientes L_{600} e A correspondentes às duas grandes zonas climáticas, utilizando os seis pluviômetros PET, BRM, CON, SBL, CAZ e BSA, selecionados para a grande zona climática "Sertão", e os quatro outros pluviômetros SBU, MAI, FST, e PRC, para a grande zona "Transição".

- **Distribuição dos coeficientes L_{600}:**

Constatamos que os coeficientes L_{600} da zona Sertão são, significativamente, diferentes daqueles da zona Transição, em uma relação média de 0,46:

$$L_{600} \text{ da zona TRANSIÇÃO} = L_{600} \text{ da zona SERTÃO} \times 0{,}46$$

Os coeficientes L_{600} e A da tabela 4.5.1 foram calculados utilizando figuras análogas à figura 4.3.3 do parágrafo precedente, da maneira seguinte:

- O coeficiente L_{600} da grande zona climática Sertão é a interseção do ajustamento realizado com os pluviômetros selecionados do Sertão e a vertical P = 600 mm.
- O coeficiente A da grande zona climática Sertão é a declividade desse ajustamento.
- Idem para os coeficientes L_{600} e A da zona Transição (utilizando o ajustamento realizado para a zona Transição).

Na tabela 4.5.1, as bacias foram reunidas segundo os grupos que serão definidos no parágrafo 4.5.1.2.

Tabela 4.5.1 Valores de L_{600} e de A para as duas grandes zonas climáticas

			Grande Zona climática			
			SERTÃO		TRANSIÇÃO	
	Bacia	Grupo	L_{600}	A	L_{600}	A
LUZ	LUZIMAR	1	170.10	0.0023	102.39	0.0021
S33	Microbacia 33 SUMÉ	1	195.08	0.0017	139.77	0.0014
S43	Microbacia 43 SUMÉ	1	162.91	0.0020	100.16	0.0017
MNO	MUNDO NOVO	2	67.60	0.0026	22.98	0.0029
MOQ	MOQUEM	2	82.36	0.0032	29.53	0.0033
JOF	JOAO FRAGOSO	2	66.85	0.0031	24.42	0.0032
ACD	ACUDINHO	2	64.24	0.0031	22.72	0.0032
CAL	CALDEIRAO	2	82.52	0.0028	37.78	0.0024
CHI	CHICO	2	61.22	0.0027	27.43	0.0025
NAS	NASCIMENTINHO	2	78.91	0.0028	34.45	0.0026
MIT	Microbacia 1 TAUÁ	2	89.89	0.0023	46.82	0.0018
M2T	Microbacia 2 TAUÁ	2	79.38	0.0022	41.34	0.0018
M3T	Microbacia 3 TAUÁ	2	95.50	0.0026	42.49	0.0023
S31	Microbacia 31 SUME	2	66.05	0.0025	28.94	0.0020
S32	Microbacia 32 SUME	2	114.16	0.0022	60.03	0.0018
S41	Microbacia 41 SUME	2	66.02	0.0028	26.04	0.0024
S42	Microbacia 42 SUME	2	79.84	0.0023	37.59	0.0018
JER	JERICO	2	153.42	0.0029	76.74	0.0029
RPI*	PIRANGI	3	42.32	0.0025	16.18	0.0026
M4T	Microbacia 4 TAUA	3	32.98	0.0033	9.88	0.0035
GA2	GANGORRA 90	3	31.43	0.0033	9.69	0.0032
JA2	JATOBA 90	3	36.95	0.0037	9.96	0.0040
UM1	UMBURANA 81	3	28.01	0.0026	9.57	0.0025
UM2	UMBURANA 90	3	43.47	0.0029	14.21	0.0030
RMA	MATRIZ	3	34.69	0.0043	9.77	0.0047
SAL	SALOBRE	3	47.20	0.0035	15.07	0.0039
JU1	JUATAMA 64	3	67.77	0.0036	20.90	0.0036
JU2	JUATAMA 75	3	48.62	0.0041	12.65	0.0047
QUI	QUIXABINHA	3	41.19	0.0027	16.29	0.0024
MAN	MANOEL	3	30.10	0.0033	11.27	0.0039
MS1	Microbacia 1 SUME	4	6.73	0.0028	1.38	0.0038
MS2	Microbacia 2 SUME	4	12.75	0.0039	1.41	0.0061
ROS	OSCAR BARROS	4	30.66	0.0053	6.02	0.0060
JUZ	JUAZEIRO	5	51.90	0.0027	27.05	0.0025
RLG	LAGOA GRANDE	5	1.31	0.0031	3.70	0.0045
LBA	LAJEDO DE BAIXO	5	18.43	0.0029	9.37	0.0029
FZI	FAZENDA ISABEL	5	7.96	0.0024	3.31	0.0023
FZP	FAZ. PASSAGEM	5	13.94	0.0025	4.41	0.0030
RBP	BATATEIRAS P. Car.	5	39.02	0.0029	16.60	0.0028
RMV	MISSAO VELHA	5	13.99	0.0024	7.21	0.0020
AJA	ACUDE JARDIM	5	75.34	0.0027	34.45	0.0026
PCO	PEDRO COSTA	5	31.19	0.0019	18.14	0.0014

(*) RPI no lugar de PIR indica que se utilizou o modelo com o coeficiente de redução para o posto de Pirangi (PIR). Idem, para RMA, ROS, RL6, RBP e RMV

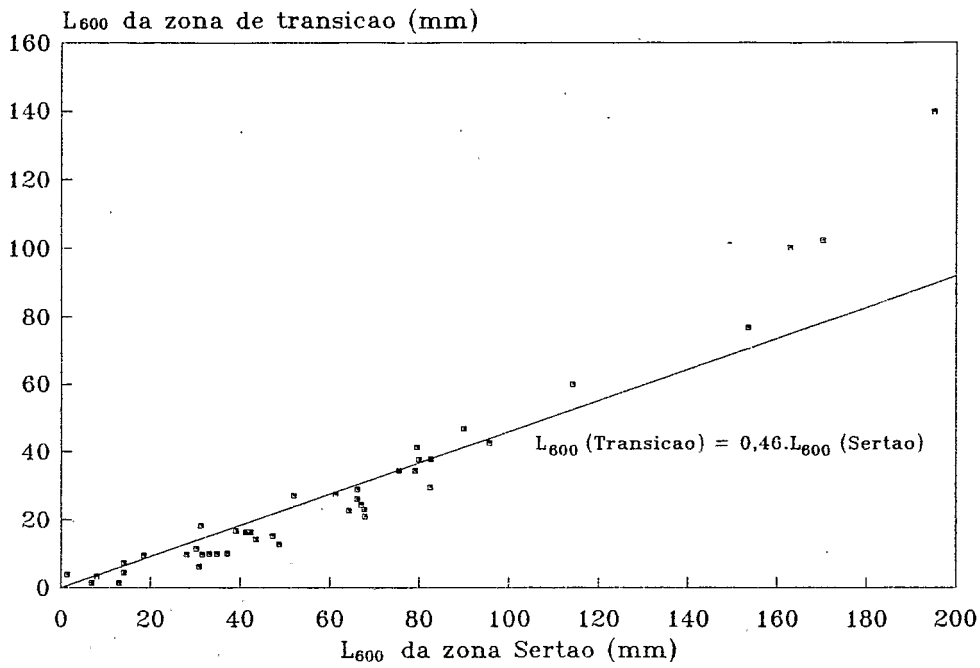


Figura 4.5.1: Comparação dos coeficientes L600 das duas zonas climáticas

Distribuição dos coeficientes A:

- Inversamente, as médias dos coeficientes A das duas zonas estão muito próximas e não são significativamente diferentes, apesar de um coeficiente de correlação elevado (R^2 = 0,93). A média dos coeficientes A do Sertão é de 0,00292 e da zona de Transição de 0,00300. A média dos coeficientes A do Sertão cujo L_{600} é inferior a 60 mm, é de 0,0033, valor que utilizaremos a seguir.

- A figura 4.5.2 sugere uma relação em forma de "S": os valores fracos de A da zona Sertão corresponderão a coeficientes de A, ainda mais fracos, na zona de Transição e inversamente.

Relação entre L600 e A:

- Existe uma ligeira correlação negativa entre o coeficiente A e L_{600} (R^2 = 0,14); a equação de regressão sendo: $A = (3,2 - 0,006\ L_{600})/100$.

- Isso significa que os escoamentos das bacias cujos L_{600} são elevados, serão um pouco menos sensíveis às variações pluviométricas, o que parece lógico.

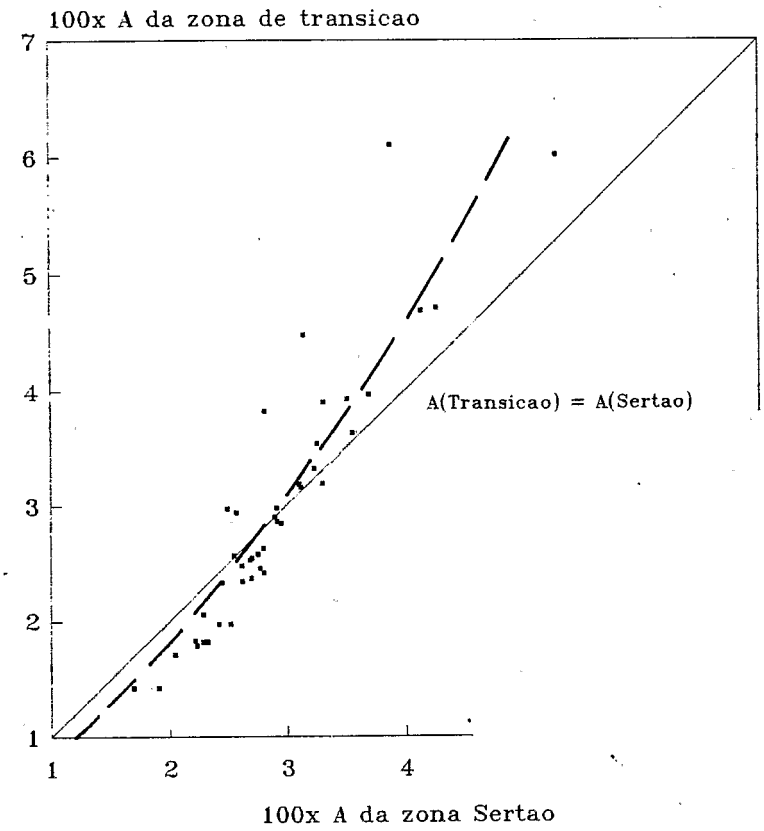


Figura 4.5.2: Comparação dos coeficientes A das duas zonas climáticas.

4.5.1.2 Os "*faciès*" dos regimes: variabilidade e reagrupamento de bacias

▪ Escolha dos critérios de análise

Uma análise mais apurada dos outros "faciès" dos regimes hidrológicos requer uma abstração da abundância, primeiro e principal elemento dos regimes, que tende a mascarar todos os outros, visto que os escoamentos de diversas frequências, de uma determinada bacia, são, em primeira aproximação, proporcionais ao módulo.
Utilizaremos, naturalmente, *variáveis reduzidas* que serão iguais à relação de cada "faciès" do regime dividido pelo escoamento médio anual.
Assim, a lâmina anual decenal úmida reduzida RLA01, é definida como sendo a relação entre a lâmina anual decenal úmida LA01 e a lâmina média anual L(P), por:

RLA01 = LA01/L(P); as outras lâminas reduzidas são definidas de maneira análoga: RLA033 = LA033/L(P); RLA05 = LA05/L(P); RLA067 = LA067/L(P); RLA09 = LA09/L(P); RLA3AC = L3AC/L(P).

A relação entre as lâminas das cheias e os módulos é fraca. Conservaremos então os valores "absolutos" X_1 e X_{10} desses dois últimos "faciès".

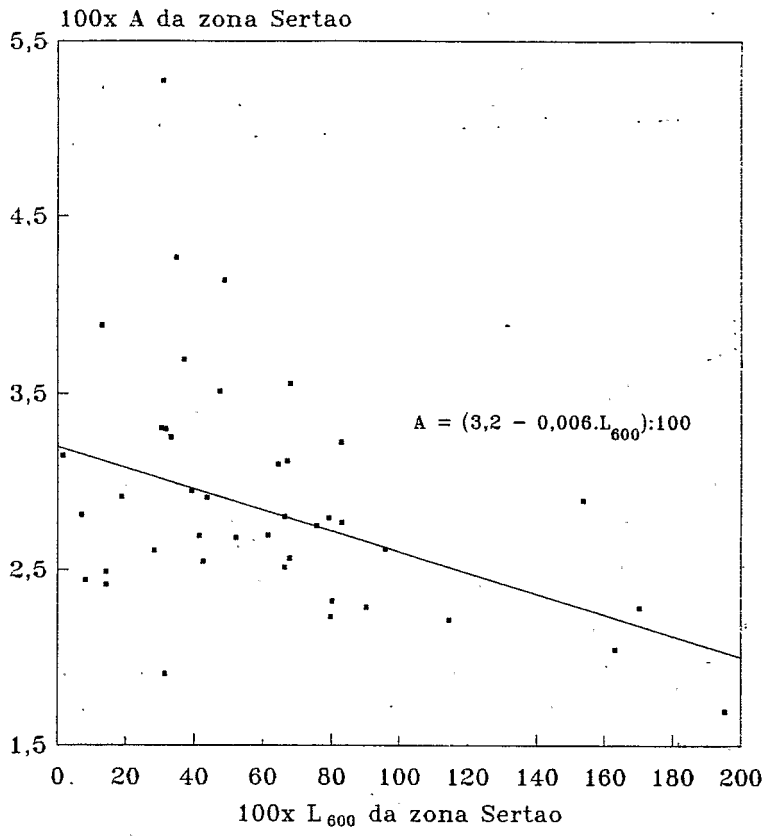


Figura 4.5.3: Coeficiente L_{600} em função de A para a zona climática Sertão.

■ Análise em componentes principais

Realizamos uma análise em Componentes Principais (ACP) dos resultados obtidos usando os modelos ajustados sobre as 42 bacias, utilizando como dado de entrada o único pluviômetro de SOBRAL (SBL).

As figuras 4.5.4 (a) e (b), assim como as tabelas correspondentes, fornecem os principais resultados de uma ACP efetuada com todas as variáveis reduzidas mencionadas acima, utilizando as 42 bacias. Felizmente, constatamos uma certa similaridade com os resultados da análise dos regimes pluviométricos do parágrafo 4.3.3.4, que tinha sido efetuada, utilizando variáveis "*absolutas*". O eixo de abundância, no entanto, desapareceu, uma vez que utilizamos valores "*relativos*".

- Os três primeiros componentes explicam 97% da variância.
- O primeiro componente explica 66% da variância e pode ser chamado **eixo de regularidade;** ele opõe, assim, as lâminas decenais secas e úmidas.
- O segundo componente explica 18% da variância e pode ser chamado **eixo de cheia.**
- O terceiro componente explica, ainda, 11% e opõe a lâmina anual trienal úmida (ou mediana) à lâmina decenal seca; é difícil achar para ele uma significação física simples.

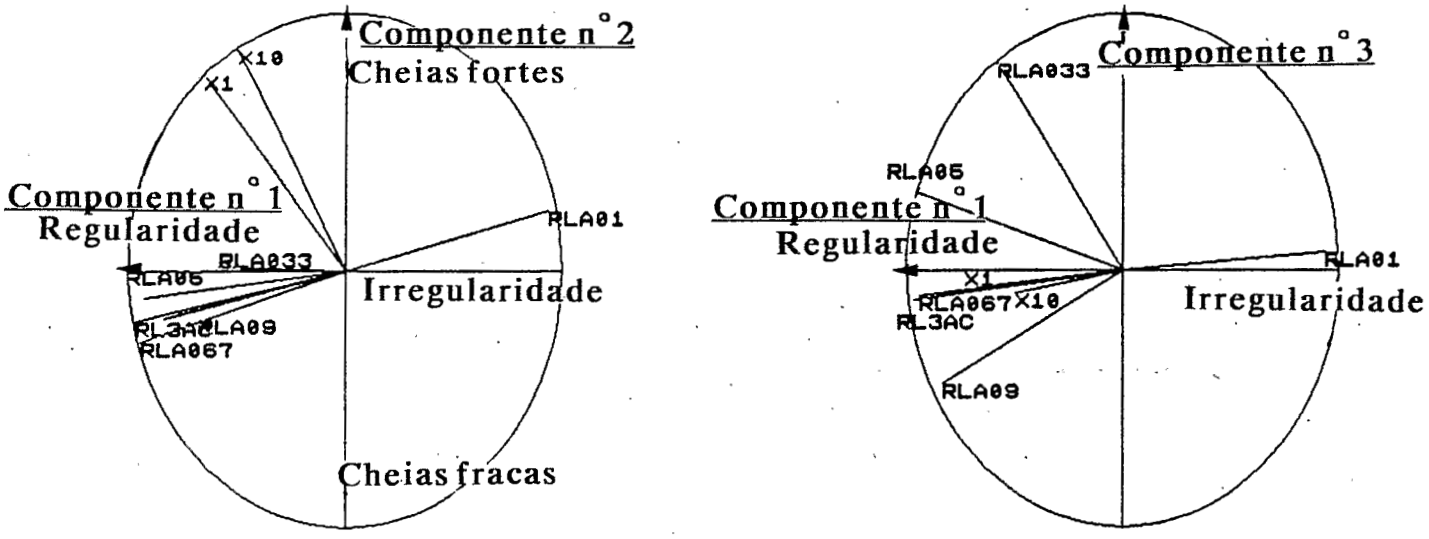
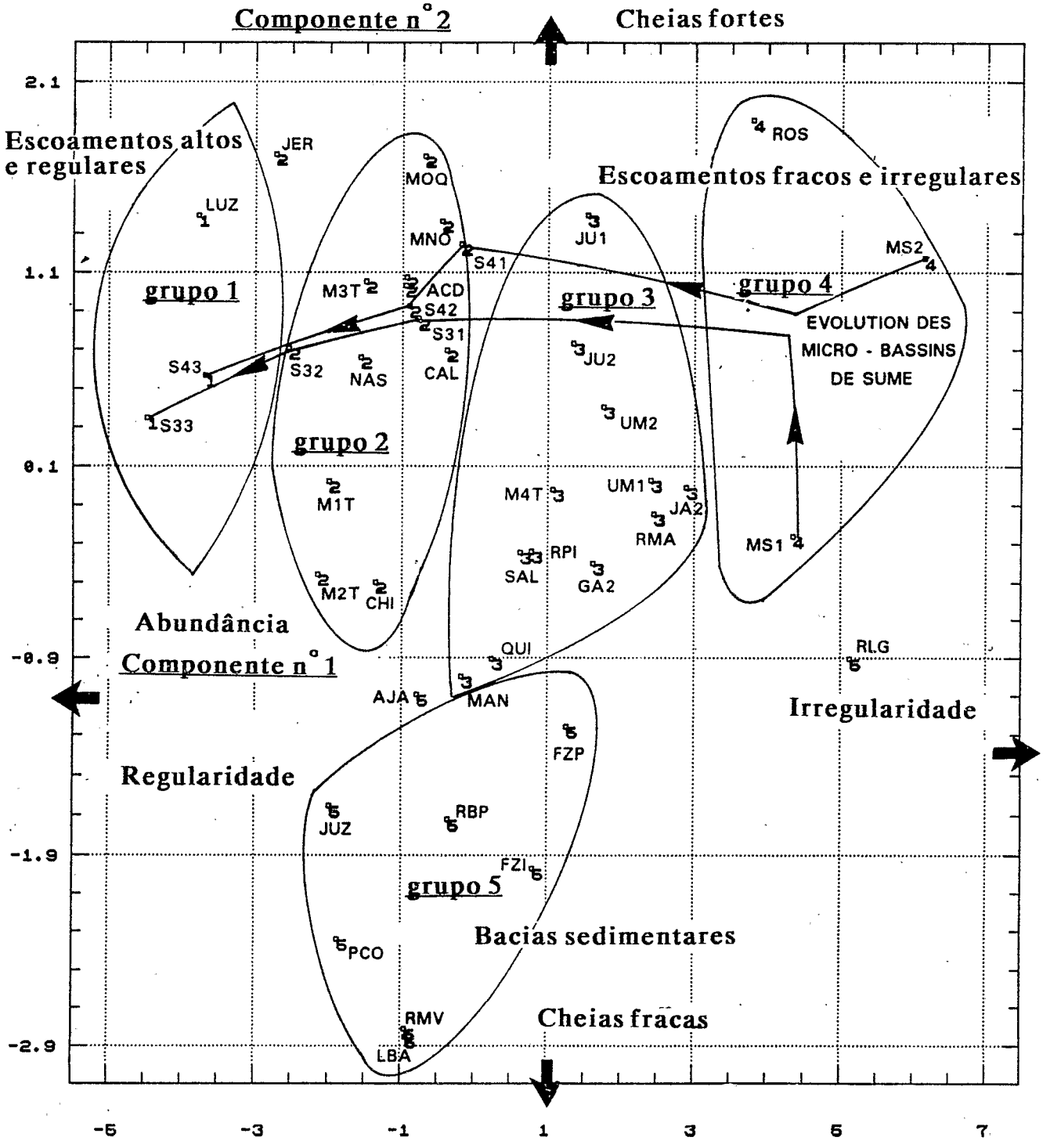


Figura 4.5.4: Tipologia das bacias: a) análise dos componentes

Figura 4.5.4 : Tipologia das bacias: b) reagrupamento das bacias



Tipologia das bacias: Análise em componentes principais

a) Porcentagem da variância explicada por cada componente

Componente	Porcentagem da variância	Porcentagem acumulada
1	66.24140	66.24140
2	18.79572	85.03712
3	11.94985	96.98697
4	1.62471	98.61168
5	.72379	99.33547
6	.39858	99.73405
7	.16194	99.89598
8	.10402	100.00000

b) Coordenadas dos três primeiros componentes

"FACIES"	COMPONENTE 1	2	3
RLA01	0.93752	0.22646	0.06767
RLA033	-0.58329	0.01164	0.79661
RLA05	-0.92936	-0.10929	0.28995
RLA067	-0.94475	-0.27839	-0.10211
RLA09	-0.83971	-0.18588	-0.44272
RL3AC	-0.96808	-0.19879	-0.11721
X1	-0.65547	0.74674	-0.06667
X10	-0.50192	0.85505	-0.09022

■ Reagrupamento das bacias

O ACP permite reunir as bacias da seguinte forma:

Os quatro primeiros grupos de bacias dispõem-se no sentido de uma abundância e de uma regularidade decrescentes:

* **O grupo mais regular é o nº 1.** É composto de **bacias que "escoam"** muito. Suas L_{600} são superiores a 150 mm; nas três bacias deste grupo observam-se fenômenos de degradação do solo e da vegetação, assim como, encrostamento ou películas de superfície. Durante os anos mais deficitários, um escoamento, apesar de fraco, é sempre observado, o que nos permite qualificar este grupo de regular e abundante; escolhemos a bacia de LUZIMAR (LUZ) para representá-lo. Utilizaremos, algumas vezes, o qualificativo de "**implúvio**" para este tipo de bacia.

* Ao contrário do anterior, **o grupo nº 4**, que podemos qualificar de fraco e irregular, é composto de bacias que só apresentam **fraquíssimos escoamentos**, os valores de L_{600} são inferiores a 20 ou 30 mm e a proporção de anos sem nenhum escoamento pode ser superior a 50%. Este grupo é representado por bacias extremamente bem protegidas por uma vegetação densa, sem nenhum sinal de degradação ou de erosão dos solos. Os escoamentos são então muito fracos, irregulares e concentrados em alguns raros anos. As cheias de período de retorno elevado poderão, contudo, ser ainda fortes. Escolhemos **a microbacia nº 2** de SUMÉ (MS2) para representar este grupo cujos recursos correm o risco de decepcionar os construtores de açudes.

* **Os grupos 2 e 3 são intermediários** entre esses dois extremos. Eles representam a maior parte das pequenas bacias do Nordeste.
A lâmina L_{600} das bacias do grupo 2 está compreendida entre 50 e 150 mm. Escolhemos a bacia de **CALDEIRÃO (CAL)** para representar o grupo 2, composto de bacias, geralmente pequenas e caracterizadas por um escoamento relativamente abundante e regular.

* A lâmina L_{600} das bacias do **grupo 3** está compreendida entre 20 e 50mm. Esss bacias, maiores, comportam sempre zonas suscetíveis de reter água, o que acentua a irregularidade, absorvendo totalmente os fracos escoamentos dos anos deficitários. Selecionamos a bacia de **GANGORRA (GA2)** para representar o grupo 3.

O quinto grupo é formado por bacias de **solos espessos** ou situados sobre **formações geológicas sedimentares.** Apresentam escoamentos mais fracos, L_{600} é geralmente inferior a 30 mm. Este grupo é, antes de tudo, caracterizado por cheias menos importantes; escolhemos a bacia de **Fazenda Isabel (FZI)** para representá-lo.

■ Regularidade e abundância "andam juntos"

Colocamos na figura 4.5.5 os valores de L_{600} de todas as bacias. Frisamos que esse gráfico foi estabelecido no *sistema de eixos dos valores relativos*. É muito interessante notar que os L_{600} se ordenam, perfeitamente, em relação ao eixo da regularidade.

■ Evolução de uma bacia como consequência do desmatamento

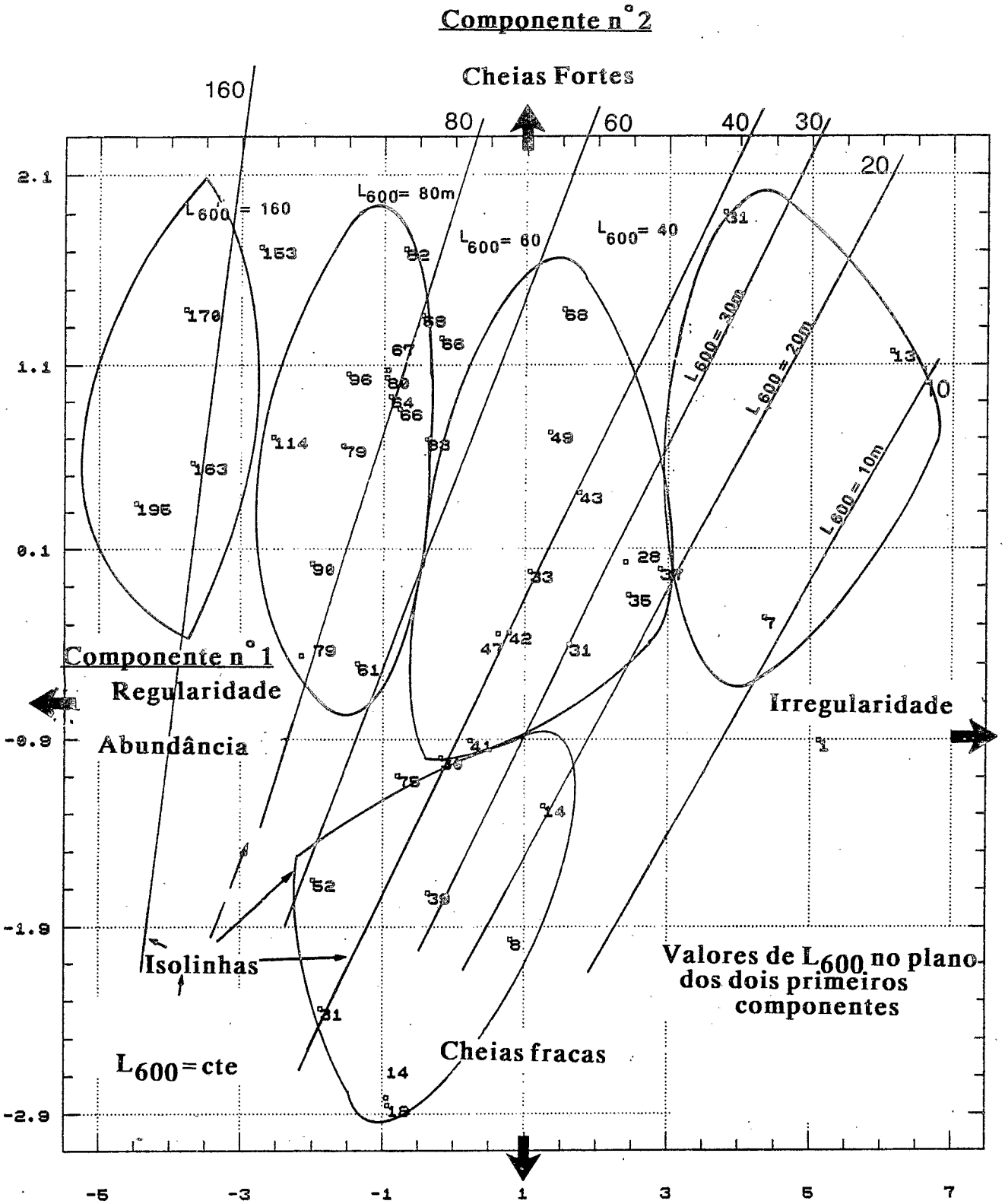
Podemos constatar na figura 4.5.4, no plano dos dois primeiros componentes, a transformação das microbacias da bacia experimental de SUMÉ, em consequência do desmatamento.

As microbacias 1 e 2 (MS1 e MS2) representam as condições iniciais, antes de qualquer desmatamento, quando as bacias estão, ainda, protegidas por uma espessa caatinga. Estas microbacias estão classificadas no grupo da bacia n^{o} 4.

Após o desmatamento, as microbacias n^{os} 3 e 4 evoluem e atravessam três fases que correspondem a degradações sucessivas dos solos. Constatamos claramente essa mudança na figura 4.5.4, na qual os pontos se deslocam desde a posição S31 ou S41, que corresponde à primeira fase dessas duas microbacias, até à posição S33 ou S43 da terceira fase, que reflete o estado de degradação extrema da superfície de seus solos, o que as coloca, neste caso, no grupo n^{o} 1, passando pelo comportamento intermediário S32 ou S42.

Entre essas duas posições extremas, o escoamento médio é aumentado por um fator 20, enquanto que sua regularidade cresce fortemente, características muito favoráveis à estocagem da água!

Figura 4.5.5: Tipologia das bacias: Regularidade e abundância



4.5.2 Caracterização numérica dos diferentes regimes

O quadro 4.5.2 contém os coeficientes das regressões lineares calculados para cada um dos grupos de bacias, entre os diferentes "faciès" do regime e a lâmina média escoada.

O gráfico 4.5.6 mostra uma das melhores dessas regressões (LA05=F(L(P)) com (r = 0,99), estabelecida para as bacias do grupo n°1, bem como uma regressão de qualidade regular, L3AC=f(L(P)), com r=0,90, para o grupo 3.

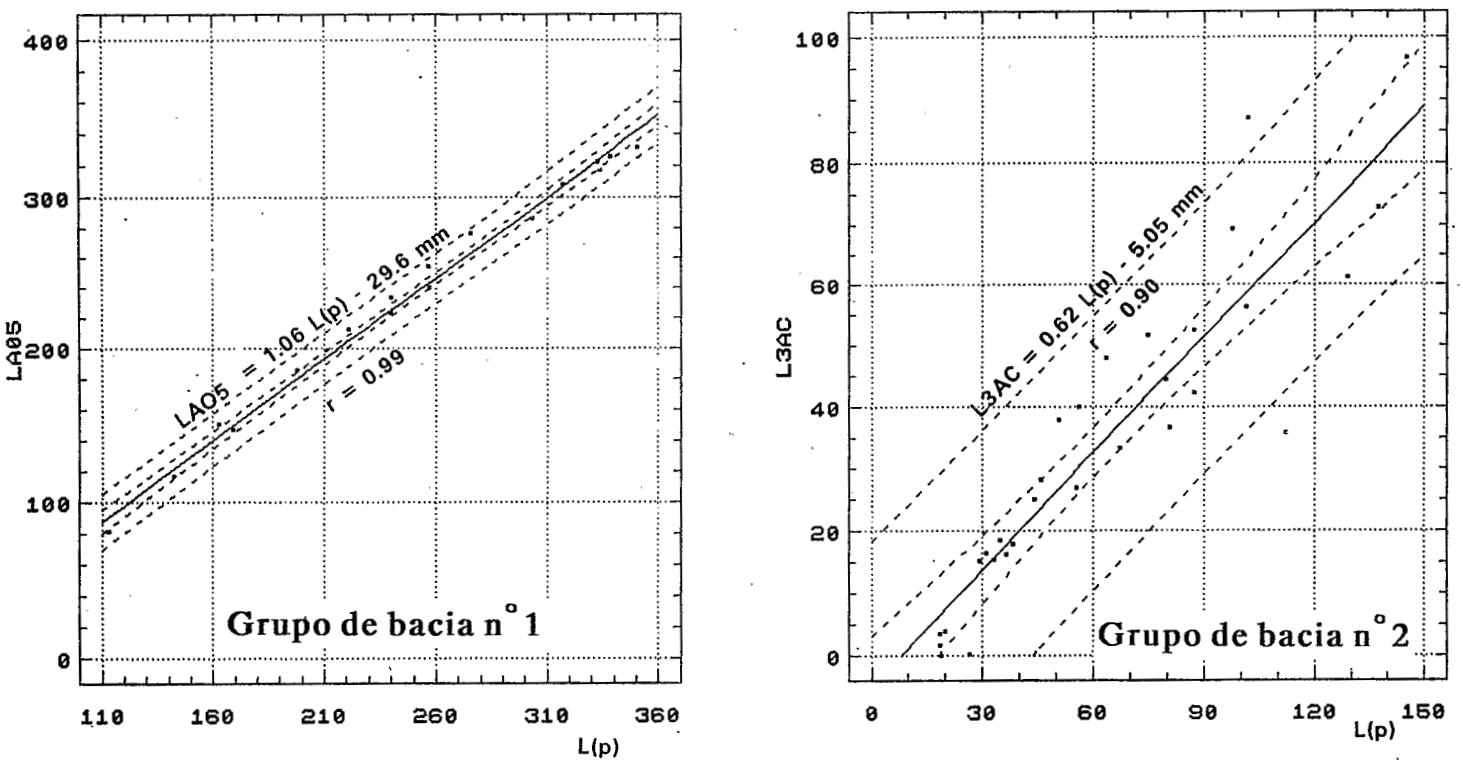


Figura 4.5.6: Exemplo de duas regressões entre "faciès" do regime e módulo

TABELA 4.5.2 Regressões entre os "faciès" do regime hidrológico e o módulo (L(P)), para cinco grupos de bacias.Grande zona climática do Sertão.

BACIA -->		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Faixa de validade(mm) -->		110-360	50-350	20-150	8-70	0-100
"fàcies" Número de bacias -->		3	15	12	3	9
	a	1,49	1,73	2,20	2,95	1,73
LA01	b	47,75	35,02	8,90	- 2,98	5,44
	r	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
	a	1,03	1,11	1,10	0,78	1,14
LA033	b	30,77	5,71	- 2,11	0,09	1,28
	r	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99
	a	1,06	0,95	0,80	0,27	0,95
LA05	b	- 29,58	- 12,26	- 8,07	0,58	- 2,61
	r	0,98	0,99	0,96	0,84	0,99
	a	0,94	0,80	0,58	0,14	0,79
LA067	b	- 46,58	- 27,74	- 11,86	- 0,35	- 5,04
	r	0,93	0,98	0,95	0,75	0,99
	a	0,48	0,31	0,11	2,38	0,32
LA09	b	- 25,37	- 12,51	- 1,49	0,03	- 1,99
	r	0,92	0,90	0,84	0,21	0,95
	a	1,60	1,21	0,62	0,12	1,29
L3AC	b	- 38,23	- 30,75	- 5,05	- 0,03	- 5,20
	r	0,90	0,94	0,91	0,66	0,97
	a	0,07	0,09	0,08	0,35	0,12
X1	b	18,15	11,84	5,60	- 1,07	0,88
	r	0,90	0,90	0,73	0,99	0,86
	a	0,04	0,10	0,09	0,16	0,19
X10	b	54,10	36,40	19,40	19,46	3,47
	r	0,39	0,65	0,49	0,50	0,75

Neste quadro :

- **a** e **b** são os coeficientes da reta de regressão do "fàcies", com L(P). Por exemplo: LA01 = 1,49 * L(P) + 47,75 mm, para o grupo de bacias nº 1, etc;

- **r** é o coeficiente de correlação do ajustamento.

Para cada grupo de bacias, determinou-se essas regressões, utilizando-se simulações realizadas com cada um dos pluviômetros selecionados, cruzados, sucessivamente, com cada bacia representativa do grupo; assim: 6 pluviômetros cruzados com as 3 bacias do grupo 1, correspondem a um total de 18 pontos para este grupo; 6 pluviômetros cruzados com 15 bacias, correspondem a um total de 90 pontos para o grupo 2, etc.

A figura 4.5.7 permite avaliar, para cada "faciès", a coerência e a compatibilidade entre as equações e os domínios de validade propostos para os diversos grupos de bacias.
Constatamos que as diferenças entre os diversos grupos se acentuam para as freqüências que correspondem aos anos mais secos. A irregularidade cresce do grupo 1 para o grupo 4.
As figuras 4.5.8 a 4.5.10 **são de uma grande utilidade prática,** elas permitem o cálculo das lâminas de qualquer freqüência, a partir de lâmina média. Essas figuras mostram que a irregularidade se acentua[7] quando se passa do grupo 1 ao grupo 4, quando a pluviometria diminui quando se passa do Sertão para a zona de Transição, ou quando as lâminas decenais úmidas são mais fortes e às lâminas decenais secas mais fracas.

Variação das lâminas das cheias em função da pluviometria

Os coeficientes de correlação entre as cheias (X_1, X_{10}) e os escoamentos médios L(P) são positivos, porém mais fracos do que para os outros "faciès". As regressões encontradas traduzem um aumento significativo dos valores da cheia decenal entre os dois limites da faixa de validade.

Lembramos que os valores de X_1 e X_{10}, de nossos quadros, são fruto de um cálculo resultante da aplicação das equações de um modelo que utiliza como entrada séries de chuvas diárias.

O estudo estatístico da pluviometria diária efetuado no parágrafo 4.3 não permitiu evidenciar uma ligação entre os totais em 24 h, de período de retorno decenal, e os totais anuais[8]. Somos, pois, levados a pensar que essa correlação positiva é essencialmente provocada por um aumento da média do índice de saturação anterior IK, antes das fortes cheias.

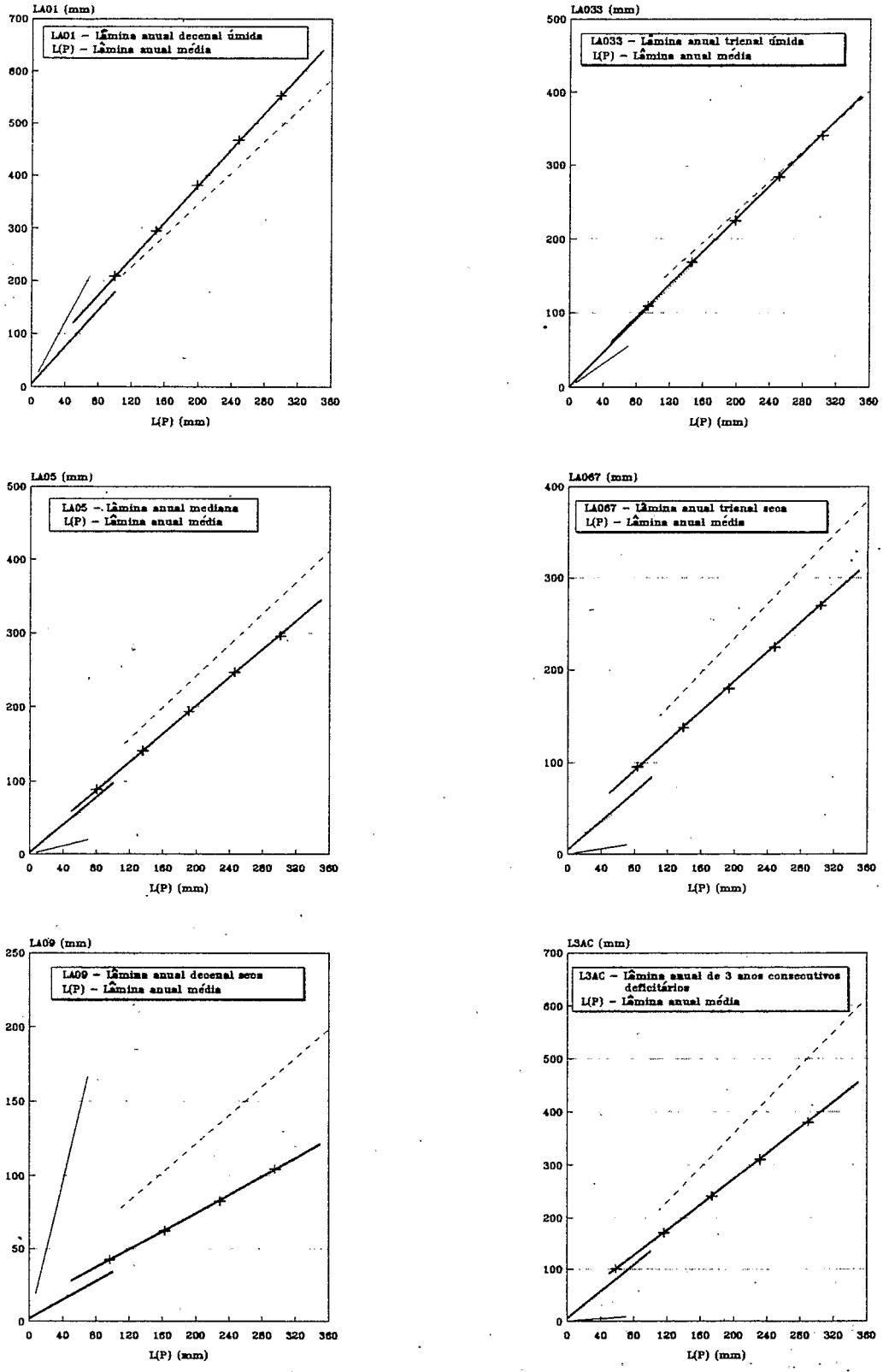
Lembramos, igualmente, que o modelo SUDENE/ORSTOM, que utilizamos, não foi concebido para representar e estudar as cheias, pois, seu intervalo de tempo é muito elevado. Tentamos simplesmente evitar, no momento do seu ajustamento, distorções excessivas entre as maiores lâminas escoadas em 24 h, calculadas e observadas.

Enfim, lembramos que as lâminas e as descargas de picos das maiores cheias serão calculadas utilizando-se um outro método. É preciso, portanto, considerar os valores de X_1 e X_{10} aqui apresentados como simples parâmetros indicadores de um determinado aspecto ou "*faciès*" do regime hidrológico. Eles demonstram, evidentemente, uma certa analogia com as cheias, permitindo comparar e ordenar os comportamentos das bacias, mas não pretendem quantificar diretamente as cheias anuais ou decenais.

[7] A irregularidade se acentua quando as lâminas decenais úmidas são mais fortes e as lâminas secas mais fracas.

[8] Os totais pluviométricos em 24 h da zona climática 6 são mais elevados do que aqueles do resto do Sertão. Esta distribuição diferente não parece provocar variações dos coeficientes X_1 e X_{10} superiores a 10%, ao contrário do que constatamos entre as grandes zonas climáticas Sertão e Transição.

Figura 4.5.7: "Faciès" do regime em função do módulo, para os diferentes grupos de bacias.



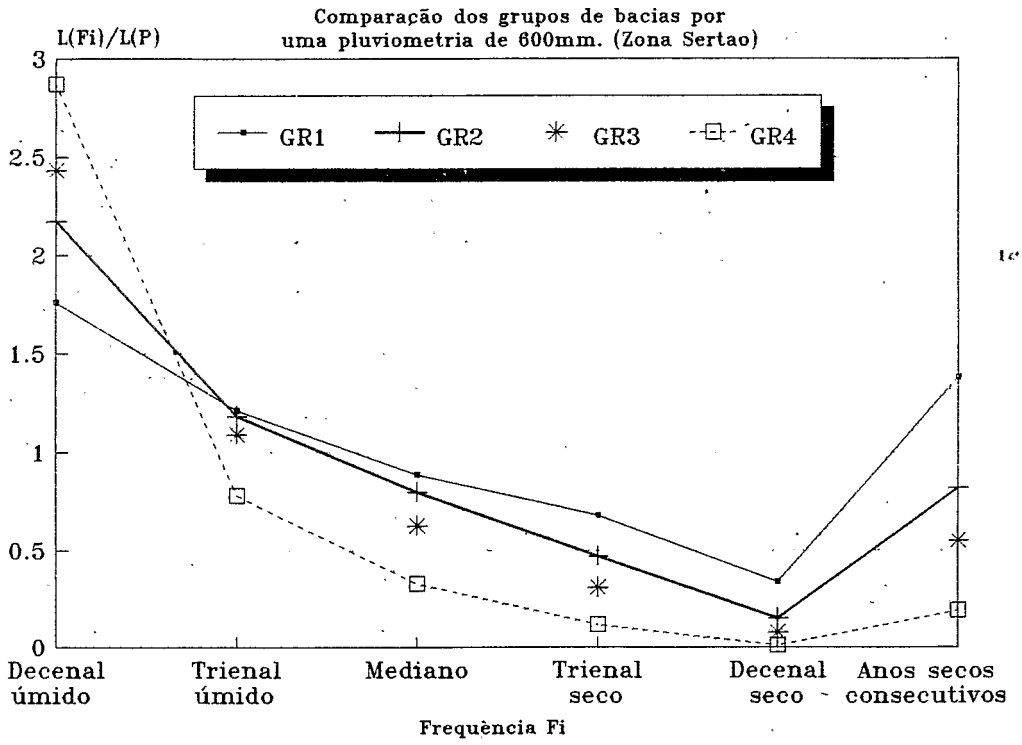


Figura 4.5.8: Evolução do "faciès" do regime em função do grupo de bacias

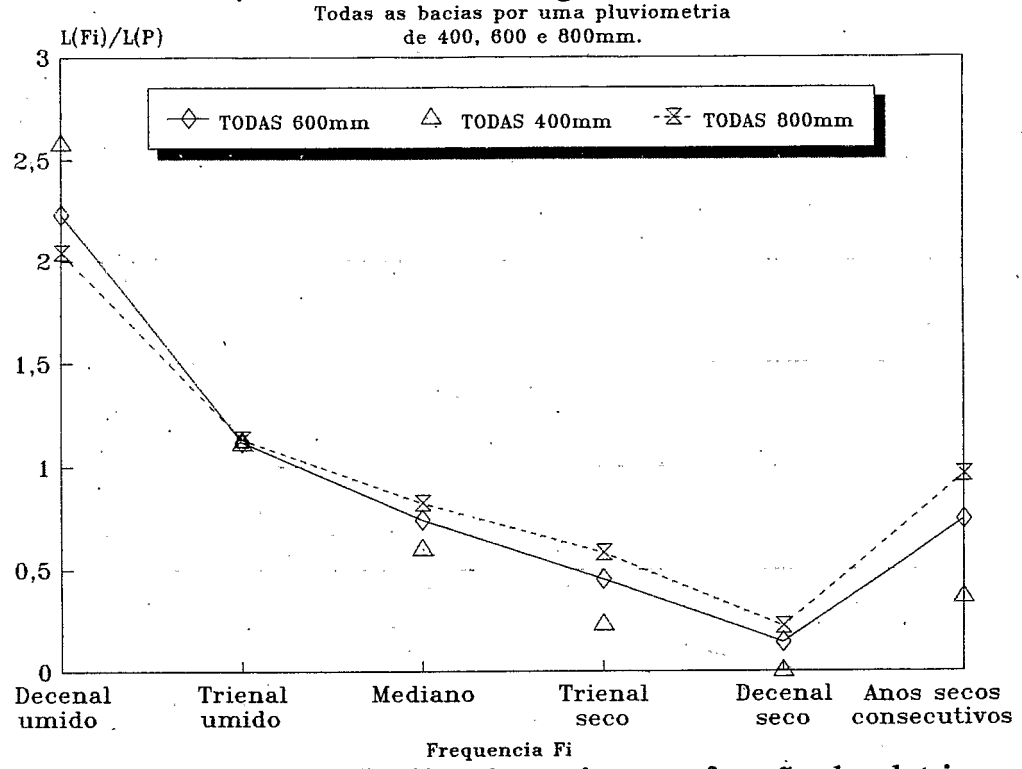


Figura 4.5.9: Evolução do "faciès" do regime em função da pluviometria anual média.

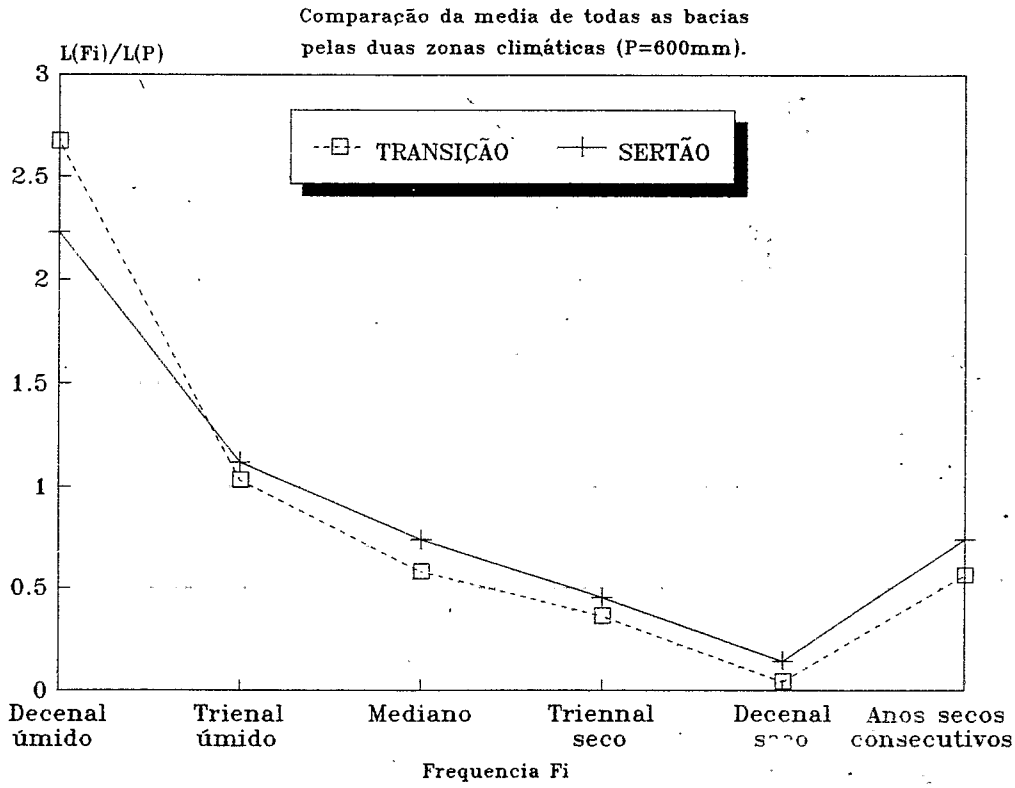


Figura 4.5.10: Evolução do "faciès" do regime em função da zona climática"

Os valores da tabela 4.5.3 relativas às cheias devem assim, ser considerados dentro dessa ótica e com essas restrições.

O quadro 4.5.3, a seguir, fornece os valores de X_{10} para as grandes zonas climáticas Sertão, Transição e para a zona n° 6, com valores da pluviometria anual de 600 e 800 mm.

TABELA 4.5.3 Valores de X_{10} para diversas zonas e pluviometrias.

		Média geral de todas as bacias	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Zona SERTÃO	P = 600 mm	29	62	47	23	22	11
	P = 800 mm	33	64	51	-	31	12
Zona TRANSIÇÃO	P = 600 mm	20	46	30	12	5	7
	P = 800 mm	24	54	39	18	14	9
Zona 6	P = 600 mm	33	70	49	26	-	-

Este quadro 4.5.3 mostra:

- uma diminuição média de 30% de X_{10} na grande zona climática de Transição,em relação à grande zona climática do Sertão que serve de referência;

- no interior da grande zona Sertão, a zona n^{o} 6 é caracterizada por valores de X_{10} superiores em 10 a 15% aos das regiões vizinhas.

Conclusão prática:

* No interior de uma mesma grande zona climática, os valores de X_{10} das bacias cujas cheias são mais perigosas, apresentarão variações relativas inferiores a 10%, quando a pluviometria anual cresce (ou diminui) de 200 mm em relação ao valor referência de 600 mm.
* As lâminas das cheias na zona de Transição serão inferiores em 20 a 30% às do Sertão.

4.5.3 Análise dos fatores condicionantes dos módulos

Onde se mostra que o solo e a vegetação têm um papel preponderante.

O módulo ou a lâmina escoada anual média pode ser expressa, como já vimos, em função dos coeficientes L_{600} e A, que caracterizam a bacia, assim como da pluviometria P e da zona climática.

É natural, como o fizeram DUBREUIL *et al* (1975) e numerosos outros autores, procurar as relaçãoes existentes entre os módulos e os parâmetros que caracterizam os aspectos físicos e morfológicos das bacias hidrográficas.

4.5.3.1 Apresentação dos parâmetros físicos estudados

O quadro 4.5.4 reagrupa os valores disponíveis para caracterizar o meio físico das bacias estudadas.

Essa informação não é muito homogênea. Foi extraída de diversos relatórios elaborados com técnicas e documentos cartográficos heterogêneos. Um mesmo parâmetro pode, além disso, não ter a mesma significação para uma bacia de 100 km^2 que para uma parcela de um hectare!

Para cada bacia, escolhemos os seguintes parâmetros:

- O coeficiente ($\mathbf{L_{600}}$) em mm, definido anteriormente.
- O coeficiente (**A**), definido anteriormente.
- A superfície da bacia hidrográfica (**SUP**), em km^2.
- A classe de solo (CSOL, classificação empírica que caracteriza, de um modo global, os solos das 42 bacias, repartindo-as em 5 classes definidas, a partir de duas classes"pivô" - 2 e 5 - da seguinte maneira:

  Classe 2: Bacias cobertas de solos espessos, apresentando um escoamento superficial de fraco a médio. Quase todas as sub-bacias de Ibipeba pertencem a esta classe.

  Classe 5: Bacias cobertas de solos de 20 a 50 cm de espessura, de permeabilidade média (20 a 40 mm/h, pelo método de MUNTZ). As sub-bacias de TAUÁ pertencem a esta classe.

  As *classes 3 e 4* são compostas de bacias cujos solos são intermediários ou são justaposições de solos das classes 2 e 5:

  Classe 3: Contém as bacias estudadas pelo programa GEVJ (Missão Velha, Batateiras, Quixabinha, Açude Jardim), constituídas, em sua maior parte, de solos permeáveis, mas com algumas partes apresentando um escoamento superficial importante. Esta classe contém, igualmente, a microbacia n^o 4 de Tauá sobre Vertissolos e os açudes Manoel (MAN) e Pedro Costa (PCO).

Classe 4: Contém as sub-bacias de SUMÉ, onde uma parte é composta de solos Vérticos ou então de solos permeáveis; aí estão, igualmente, as do RIACHO DO NAVIO onde uma parte é composta de Regossolos permeáveis e a de JUATAMA, de solos impermeáveis, associados a Planossolos e Podzólicos muito permeáveis.

Classe 6: Contém a bacia do açude Jericó (JER) cujos solos são impermeáveis, muito pouco espessos e não apresentam zona capaz de reter a água.

Classe 1: Bacias cobertas de solos muito espessos que devem apresentar um escoamento nulo ou muito fraco. Somente a sub-bacia Lagoa do Canto (LGC), da bacia de Ibipeba, pertence a esta classe.

- A classe de vegetação (**CVEG**). Integra a proteção oferecida pela vegetação e a influência da degradação da superfície do solo. A CVEG varia entre 1 e 7 da seguinte maneira:

Classe 1: Vegetação que protege totalmente o solo. As bacias de três dos açudes de TAUÁ e das microbacias 1 e 2 de SUMÉ, estão nesta classe.

Classe 2: Bacia bastante bem conservada, com algumas zonas de cultivo. Corresponde à maioria das bacias estudadas, quando a vegetação natural não está muito alterada.

Classe 3: As degradações da vegetação começam a ser importantes ou, então, quando mais de 30% da bacia estão cultivados.

Classe 4: A vegetação não oferece, praticamente, nem proteção ao solo nem obstáculo ao escoamento superficial.

Duas outras classes de (CVEG) foram adicionadas, para se poder considerar as degradações da superfície do solo:

Classe 6: Degradações importantes da superfície do solo e formação de crostas. As bacias de LUZIMAR e as microbacias 3 e 4 de SUMÉ (segunda fase) foram equipadas nesta classe.

Classe 7: Degradação ainda mais avançada da superfície do solo, retirados os primeiros horizontes. As microbacias 3 e 4 de SUMÉ (terceira fase) foram incluídas nesta classe.

As classes de solo (CSOL) e da vegetação (CVEG) são variáveis discretas. No entanto, os códigos destas variáveis foram escolhidos para que se pudesse, igualmente, considerá-las em primeira aproximação, como variáveis contínuas. Essa técnica não é muito ortodoxa, do ponto de vista estatístico, porém, ela nos permite utilizar métodos habitualmente reservados às variáveis contínuas, tais como as correlações.

TABELA 4.5.4 Parâmetros físicos e morfológicos das bacias estudadas.

SIGLA	L_{600}	A	SUP	CSOL	CVEG	ACUD	COMP	Ds	ALT	DREN	GRBAC
PIR	42.3	0.02545	194.0	5.	2.	.50	1.41	25	490.	2.13	3.
MNO	67.6	0.02564	19.0	5.	2.	.30	1.28	14	520.	1.07	2.
MOQ	82.4	0.03224	7.76	5.	2.	.00	1.26	30	506.		2.
JOF	66.8	0.03119	4.59	5.	2.	.00	1.20	30	500.		2.
ACD	64.2	0.03099	0.83	5.	1.	.00	1.20	30	500.		2.
CAL	82.5	0.02768	0.77	5.	2.	.00	1.30	30	510.	4.23	2.
LUZ	170.1	0.02279	0.16	5.	6.	.00	1.70	30	500.		1.
CHI	61.2	0.02694	0.92	5.	2.	.00	1.30	30	500.		2.
JUZ	51.9	0.02681	0.35	5.	1.	.00	1.50	30	500.		5.
NAS	78.9	0.02793	1.71	5.	1.	.00	1.20	30	500.		2.
M1T	89.9	0.02282	0.01	5.	4.	.00	1.40	30	500.		2.
M2T	79.4	0.02227	0.014	5.	4.	.00	1.40	30	500.		2.
M3T	95.5	0.02614	0.009	5.	3.	.00	1.40	30	500.		2.
M4T	33.0	0.03251	0.011	3.	2.	.00	1.40	30	500.		3.
GA2	31.4	0.03297	137.40	4.	2.	.30	1.66	46	592.	2.30	3.
JA2	36.9	0.03689	26.80	4.	3.	.10	1.54	26	651.	1.28	3.
UM1	28.0	0.02607	10.70	4.	2.	.10	1.55	48	588.	1.86	3.
UM2	43.5	0.02908	10.70	4.	2.	.10	1.55	48	588.	1.86	3.
MS1	6.7	0.02811	0.006	4.	1.	.00	1.40	50	600.		4.
MS2	12.7	0.03884	0.011	4.	1.	.00	1.40	50	600.		4.
S31	66.0	0.02511	0.005	4.	3.	.00	1.40	50	600.		2.
S32	114.2	0.02209	0.005	4.	6.	.00	1.40	50	600.		2.
S33	195.1	0.01691	0.005	4.	7.	.00	1.40	50	600.		1.
S41	66.0	0.02800	0.005	4.	3.	.00	1.40	50	600.		2.
S42	79.8	0.02317	0.005	4.	6.	.00	1.40	50	600.		2.
S43	162.9	0.02039	0.005	4.	7.	.00	1.40	50	600.		1.
MAT	34.7	0.04264	468.0	4.	2.	.25	1.17	200	528.	1.40	3.
OSB	30.7	0.05273	45.20	4.	2.	.00	1.23	125	580.	1.40	4.
SAL	47.2	0.03511	15.60	4.	2.	.00	1.28	110	604.	1.70	3
JU1	67.8	0.03555	19.20	4.	2.	.20	1.19	142	250.	5.40	3.
JU2	48.6	0.04135	19.20	4.	2.	.30	1.19	142	250.	5.40	3.
LAG	1.3	0.03146	321.50	2.	3.	.50	1.58	172	750.	0.57	5.
LBA	18.4	0.02913	19.10	2.	2.	.00	1.23	160	930.	0.48	5.
FZI	8.0	0.02439	46.80	2.	3.	.00	1.41	70	710.	0.94	5.
FZP	13.9	0.02486	14.80	2.	3.	.00	1.31	53	730.	0.69	5.
BAT	39.0	0.02945	203.20	3.	2.	.00	1.20	412	584.		5.
HVE	14.0	0.02414	323.50	3.	2.	.00	1.17	423	596.		5.
AJA	75.3	0.02749	49.0	3.	2.	.00	1.40	300	700.		5.
QUI	41.2	0.02689	85.60	3.	2.	.00	1.24	144	515.		3.
MAN	30.1	0.03305	2.35	3.	3.	.00	1.20	150	280.		3.
JER	153.4	0.02892	0.41	6.	2.	.00	1.20	40	260.		2.
PCO	31.2	0.01900	0.09	3.	3.	.00	1.40	100	500.		5.
LGC	0.0	?*	61.30	1	3	.00	1,16	36	785.	0.07	?
ACU1	?	?	48.50	?	?	.10	1.31	47	82.	1.22	?
ACU2	?	?	18.50	?	?	.00	1.12	40	105.	0.46	?
ACU3	?	?	8.80	?	?	.00	1.04		88.	1.32	?
ACU4	?	?	178.80	?	?	.20	1.41	52	87.	0.91	?

(*) A bacia de Lagoa do Canto em Ibipeba não escoou no período observado.

- A proporção da bacia controlada por açudes (**AÇUD**).
- O índice de compacidade da bacia (**COMP**) calculado com a fórmula da GRAVELIUS: $COMP = 0{,}282 * P * SUP^{0,5}$, onde SUP é a superfície da bacia e P seu perímetro.
- O desnível específico da bacia, (**Ds**), expresso em metros, de acordo com a fórmula proposta por DUBREUIL e GUISCAFRE (1971), já apresentada no parágrafo 2.3.1.1. Segundo estes autores, (Ds) permite comparar diretamente os relevos de bacias de tamanhos diferentes, dentro de uma gama de superfície cuja extensão varia entre 7 e 500 km^2. No caso de pequenas bacias de superfície inferior a 7 km^2, para as quais a fórmula não é mais válida, adotamos um valor de Ds medido em bacias vizinhas, maiores e de relevo similar.
- A altitude média da bacia (**ALT**), em m.
- A densidade de drenagem (**DREN**), expressa em km de talvegues por km^2 de bacia (km/km^2). A densidade de drenagem não pôde ser calculada para todas as bacias. Além disso, a escala e a precisão dos documentos cartográficos ou fotográficos utilizados, variam de uma bacia para outra.
- O grupo de bacias (**GRBAC**) varia entre 1 e 5 e foi definido por ocasião da tipologia das bacias realizada anteriormente.

4.5.3.2 Correlações entre os parâmetros físicos e morfológicos e os dos modelos

■ Apresentação das correlações

Calculou-se, sistematicamente, os coeficientes de correlação entre, cada um dos parâmetros físicos e morfológicos do quadro 4.5.4, e os parâmetros principais dos ajustamentos que foram apresentados no capítulo 4.2 e no quadro 4.2.5.

A tabela 4.5.5 reúne três conjuntos de coeficientes de correlação:

a) **Conjunto completo das 42 bacias:** os coeficientes são calculados com a amostra completa das 42 bacias disponíveis (1ª linha do quadro 4.5.5).

b) **Conjunto das 16 bacias maiores:** os coeficientes são calculados com a amostra das 16 bacias para as quais a densidade de drenagem DREN foi determinada. As pequenas bacias, as microbacias experimentais, os pequenos açudes ou as bacias estudadas pelo programa GEVJ (exceto JUATAMA), não fazem parte deste conjunto. Para este grupo reduzido de 16 bacias, pode-se considerar que os parâmetros físicos e morfológicos foram determinados de maneira relativamente homogênea (2ª linha do quadro 4.5.5).

c) **Conjunto das 32 bacias cujos CI são comparáveis:** os coeficientes são calculados com a amostra das 32 bacias cujo CI está compreendido entre 0,94 e 0,96. Este terceiro conjunto permite analisar as relações existentes entre, de um lado, os parâmetros dos modelos CI, IKX, IKN, IK1 e IK3 e, de outro lado, todos os outros parâmetros fisiográficos, tendo como base uma amostra homogênea (3ª linha do quadro 4.5.5).

■ Análise das correlações

Notamos, primeiramente, a fraqueza geral das correlações: aproximadamente a metade dos coeficientes têm um valor absoluto inferior a 0,25 (não significativo, em todos os casos, ao nível de 5 % da distribuição de STUDENT); um quarto, apenas, é superior a 0,50 e uma minoria ínfima ultrapassa o limite de 0,75 e, isto, apesar da existência de relações quase "funcionais" entre certos parâmetros dos modelos, como as que existem entre D1 e D3, entre IKX e IK1 ou entre IKN e IK3. Isso mostra que o funcionamento das bacias é complexo e possui um grande número de graus de liberdade. Não poderá, pois, ser reduzido ou explicado por um número muito pequeno de parâmetros sem perder, inevitavelmente, uma parte da riqueza de sua informação e de sua diversidade. A fraqueza destas correlações limitará, então, o alcance das análises que vamos empreender quanto às relações entre os diversos parâmetros.

■ Definição dos tipos de relações entre parâmetros

Definamos, inicialmente, três tipos de relações:

a) **Relações** (que parecem) **lógicas** ou que correspondem a idéias geralmente aceitas. Por exemplo:

- A lâmina escoada (L_{600}) diminui com a superfície (SUP).
- A lâmina escoada aumenta com (D1) ou (D3).
- O número de açudes e, portanto, o coeficiente (AÇUD) aumenta com a superfície, etc...

b) **Relações** (que parecem) **paradoxais** (ou ainda **ilógicas**), que se afiguram contrárias às idéias geralmente admitidas ou a um raciocínio simples. Demos um exemplo: o relevo (Ds) é correlacionado negativamente ao escoamento, contrariamente ao que se esperaria desse coeficiente!

c) As relações julgadas **não significativas** ou **fortuitas**:

- não são significativas no sentido estatístico;

- são "***distorcidas***" por certas características particulares da amostra das bacias[1] estudadas. Assim, por exemplo, todas as bacias sobre formação geológica sedimentar (que apresentam menor escoamento), estão situadas em altitudes mais elevadas do que as outras. Não se deve, por isso, deduzir, prematuramente, qualquer propriedade miraculosa da altitude...

■ Análise sistemática das correlações

*** Análise das relações da lâmina escoada (L_{600}) :**

- Relações lógicas: CSOL, SUP (relação negativa), DREN, D1, D2, X03, AÇUD (relação muito fraca).
- Relações paradoxais: o relevo DS está ligado negativamente ao escoamento. Esse paradoxo parece provocado pelo fato de que as bacias de relevo mais forte (GEVJ e RIACHO DO NAVIO) têm escoamentos bastante fracos, por razões ligadas sobretudo à permeabilidade de seus solos[2].

[1] A escolha das bacias que estudamos é fruto de uma planificação... Encontramo-nos, pois, em condições que desaprovariam qualquer estatístico que recomendasse, bem ao contrário, obter uma amostra por sorteio no conjunto de todas as pequenas bacias do Nordeste.

[2] Uma relação paradoxal análoga tinha sido encontrada por BARRETO *et al* (1989), que evidenciam uma pequena influência negativa (mas, pouco significativa), da declividade de parcelas sobre o escoamento.

TABELA 4.5.5 Correlações entre parâmetros físicos e morfológicos e os dos modelos.

A	SUP	CSOL	CVEG	ACUD	COMP	Ds	ALT	DREN	CI	IKX	IKN	IK1	XO1	D1	IK3	XO3	D3	
-.43	-.35	.55	.66	-.25	.09	-.30	-.28	-	.16	-.54	-.15	-.59	-.08	.64	-.27	-.49	.59	L600(42b)
.06	-.31	.83	-.61	-.01	-.36	-.29	-.69	.68	.18	.19	.12	.17	.24	.69	.25	-.51	.58	(16bacias)
									-.08	-.69	-.20	-.75			-.42			(32bacias)
																		etc
1.00	.24	-.02	-.52	.24	-.30	.16	-.17	-	.36	.60	.46	.58	-.08	-.19	.40	.33	-.30	A
1.00	.22	.17	-.24	-.04	-.37	.56	-.31	.21	.71	.76	.59	.81	-.05	-.10	.52	-.17	-.06	
									.45	.50	.31	.47			.31			
	1.00	-.29	-.16	.55	-.06	.59	.08	-	-.19	.25	-.23	.27	-.27	-.53	-.15	.24	-.38	SUP
	1.00	-.08	.08	.59	.05	.50	.06	-.24	-.15	-.20	-.34	-.14	-.59	-.41	-.42	.48	-.39	
									.41	.43	-.21	.42			-.04			
		1.00	-.03	-.04	-.02	-.52	-.55	-	.16	-.31	.03	-.28	.11	.67	-.02	-.16	.41	CSOL
		1.00	-.66	.22	-.09	-.41	-.66	.48	.13	.28	.09	.35	.07	.74	.20	-.34	.66	
									.01	-.60	-.00	-.59			-.19			
			1.00	-.15	.34	-.16	.12	-	-.02	-.46	-.25	-.47	-.21	.33	-.35	-.34	.55	CVEG
			1.00	-.05	.34	-.08	.46	-.44	-.50	-.55	-.48	-.49	-.42	-.58	-.57	.36	-.53	
									-.09	-.49	-.26	-.50			-.38			
				1.00	.22	.02	-.08	-	-.51	.15	-.04	.14	-.33	-.28	-.14	.43	-.08	ACUD
				1.00	.24	.10	-.32	.12	-.44	-.14	-.18	-.07	-.43	-.07	-.25	.59	-.05	
									.49	.51	.29	.42			.15			
					1.00	-.33	.40	-	-.27	-.20	-.13	-.21	-.01	.10	-.21	.11	.19	COMP
					1.00	-.47	.33	-.31	-.37	-.21	-.29	-.15	-.01	.00	-.35	.27	-.06	
									-.38	-.13	-.09	-.17			-.11			
						1.00	.18	-	.16	.52	-.01	.48	-.13	-.59	.16	-.12	-.40	Ds
						1.00	-.00	.06	.45	.29	.37	.22	-.03	-.53	.25	.17	-.44	
									.19	.58	-.10	.53			.13			
							1.00	-	-.13	.03	-.22	-.02	.08	-.31	-.08	.24	-.16	ALT
							1.00	-.86	-.10	-.32	-.39	-.39	.17	-.54	-.28	.22	-.53	
									-.35	.01	-.34	.02			-.09			
								1.00	.24	.31	.47	.27	.10	.42	.37	-.39	.33	DREN
									.34	.74	.81	.68			.72			
									1.00	.38	.43	.30	.30	.12	.47	-.40	.03	CI
									1.00	.83	.65	.73	.54	.03	.75	-.64	.02	
									1.00	.12	.13	.10	-.19	-.28	.09	.05	-.21	
										1.00	.51	.96	.04	-.40	.66	.08	-.20	IKX
										1.00	.76	.96	.38	.17	.78	-.46	.20	
										1.00	.36	.97	-.05	-.59	.59	.19	-.35	
											1.00	.49	.26	.15	.80	-.04	.21	IKN
											1.00	.75	.46	.26	.87	-.20	.32	
											1.00	.35	.21	.16	.79	.07	.23	
												1.00	.03	-.36	.67	.14	-.19	IK1
												1.00	.23	.26	.73	-.34	.31	
												1.00	-.02	-.55	.63	.24	-.37	
													1.00	.13	.37	-.05	.00	XO1
													1.00	.25	.64	-.43	.22	
															.28			
														1.00	.07	-.10	.72	D1
														1.00	.30	-.28	.95	
															-.01			
															1.00	-.01	.08	IK3
															1.00	-.36	.31	
															1.00	.21	.00	
																1.00	-.20	XO3
																1.00	-.21	

- A relação com CVEG é lógica e significativa para a amostra de 42 bacias, porém torna-se paradoxal com a amostra de 16 grandes bacias. No caso das grandes bacias, aquelas que têm uma CVEG elevada são justamente as que foram escolhidas pelos cultivadores por causa de seus solos espessos. Essas bacias escoam muito pouco; é o que ocorre na bacia de JATOBÁ, em SUMÉ, e nas bacias de IBIPEBA. No caso das pequenas bacias e das parcelas, as CVEG elevadas correspondem a zonas desmatadas que escoam muito mais.
- Relações pouco significativas: COMP, ALT, CI e os outros parâmetros.

*** Análise das relações do coeficiente (A):**

- A está ligado positivamente a CI, IKX, IKN, IK1 e IK2, e negativamente a CVEG. As outras relações parecem pouco significativas ou fortuitas.

*** Análise das relações da superfície (SUP):**

- SUP está ligada de maneira lógica, mas fraca, a L_{600} e DREN (relações negativas de - 0,25 a - 0,35) assim como a AÇUD (relação positiva).
- As relações com Ds e ALT parecem, como já explicamos, fortuitas ou "*distorcidas*" pela amostragem de bacias.

*** Análise das relações da classe de solos (CSOL):**

- CSOL está fortemente correlacionada, de maneira lógica, com L_{600}, DREN, D1 e D3.
- As correlações com Ds e ALT parecem ilógicas ou fortuitas e com os outros parâmetros são desprovidas de significação.

*** Análise das relações da classe de vegetação (CVEG):**

- Como assinalamos, as relações do parâmetro CVEG invertem-se, quando se passa da amostra das 16 grandes bacias para a de 42. Os solos cultivados (cuja cobertura vegetal é fraca) são, com efeito, mais espessos na amostra das 16 bacias, o que é verídico para as outras 26 bacias da amostra total. Isso implica uma correlação lógica muito elevada para as pequenas bacias.
- CVEG está fracamente ligada, de maneira negativa a X01, o que significa que a ausência de vegetação diminui a precipitação limite do escoamento das bacias saturadas. CVEG parece ligado, de maneira negativa, a A.

*** Análise das relações do parâmetro (AÇUD):**

- Relações lógicas, mas bastante fracas, com L_{600} SUP e X03 (os açudes diminuem o escoamento superficial das cheias que acontecem no início da estação das chuvas).
- As outras relações são pouco significativas, excetuando-se a relação com CI que é "*distorcida*" pelo fato de que os CI das grandes bacias (que possuem mais açudes) são, freqüentemente, inferiores à 0,95 por razões devidas à evolução das técnicas de ajustamento dos modelos.

*** Análise das relações dos parâmetros (COMP), (Ds) e (ALT):**

- As relações de Ds com a maior parte dos outros parâmetros são paradoxais.
- Relações fracas entre COMP e Ds e entre ALT e Ds.
- As outras ligações parecem desprovidas de significação, fortuitas ou mesmo paradoxais. Isso se explica, sobretudo, pela amostra distorcida pelas grandes bacias do GEVJ, que têm uma altitude e um relevo elevado, muito embora seus coeficientes L_{600} sejam fracos.

*** Análise das relações do parâmetro (DREN):**

- Relação lógica e elevada com L_{600} e CSOL, menos forte com D1 e D3.
- Relação paradoxal com CVEG e, sobretudo, com ALT, pelas razões apresentadas anteriormente.

*** Análise das relações dos parâmetros (CI), (IKX), (IKN), (IK1) e (IK2):**

- Estes parâmetros, que utilizam o índice das precipitações anteriores IK, estão fortemente ligados entre si, o que é normal levando-se em consideração a maneira pela qual eles foram introduzidos nos modelos. Assim, as relações entre IKX e IK1, por um lado, e IKN e IK3, por outro lado, são muito fortes.
- Estes parâmetros estão ligados, de maneira positiva, ao coeficiente A.
- Estes parâmetros estão ligados, de maneira lógica, aos parâmetros físicos como CSOL, CVEG, AÇUD e DREN.
- As relações são pouco significativas, e mesmo paradoxais, com COMP, Ds e ALT.

*** Análise das relações dos parâmetros (X01) e (X03):**

- As relações do parâmetro X01 com o conjunto dos outros parâmetros são fracas e parecem desprovidas de significação. A inconsistência dessas relações e a relação negativa e paradoxal com o parâmetro AÇUD poderiam ser explicadas pelo fato de que, para os grandes valores do índice pluviométrico IK, compreeendidos entre IKX e IK1 (que correspondem a uma extrapolação acima da primeira hipérbole do modelo), a influência dos parâmetros do modelo sobre o escoamento calculado "se inverte".
- As relações do parâmetro X03 são maiores que as do X01 ,e em geral, coerentes e lógicas.
- A relação entre X01 e X03 é muito fraca.

*** Análise das relações dos parâmetros (D1) e (D3):**

- Forte relação lógica entre D1 e D3.
- D1 e D3 estão correlacionados de maneira lógica e relativamente forte, com L_{600}, CSOL e de maneira lógica (e negativa), com SUP.
- A relação com os outros parâmetros é mais fraca, e mesmo paradoxal, no caso de Ds, o qual já foi comentado.

Em resumo:

- Os coeficientes de correlação são geralmente fracos e ultrapassam raramente 0,50. Isso reflete a complexidade das interações e a heterogeneidade da amostra que analisamos.

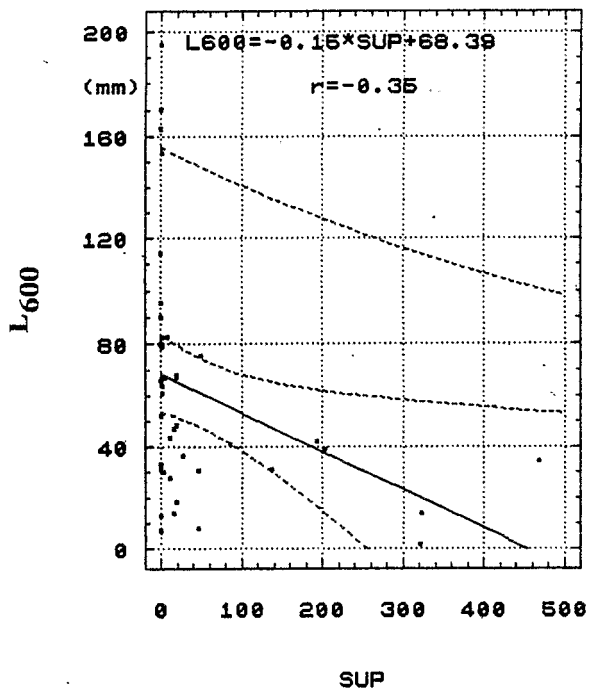
- L_{600}, parâmetro que tentamos explicar, está ligado a CSOL, D1, D2, X03 e AÇUD e oposto a SUP. Para as pequenas bacias L_{600} e CVEG são fortemente correlacionados.

- As relações encontradas para A parecem desprovidas de significação estatística ou física.

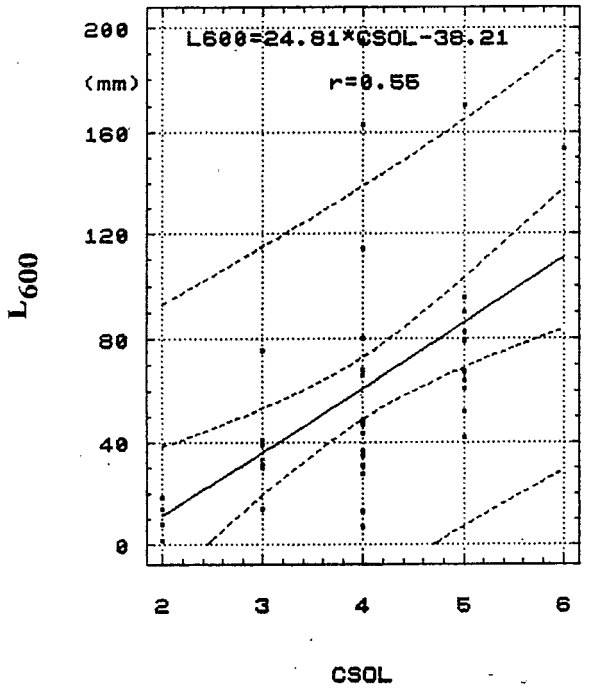
- O relevo Ds apresenta relações paradoxais com a maior parte dos outros parâmetros.

Figura 4.5.11A: Correlação entre parâmetros característicos das bacias.

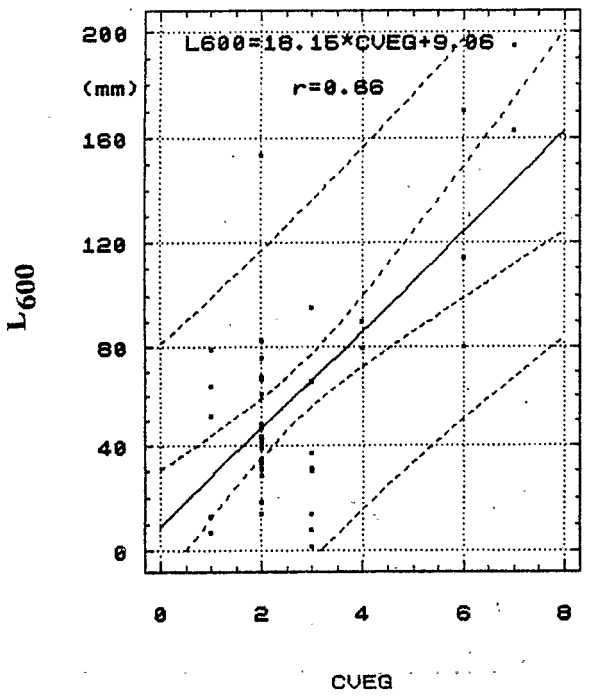
Regressão entre L_{600} e SUP



Regressão entre L_{600} e CSOL



Regressão entre L_{600} e CVEG



Regressão entre L_{600} e Ds

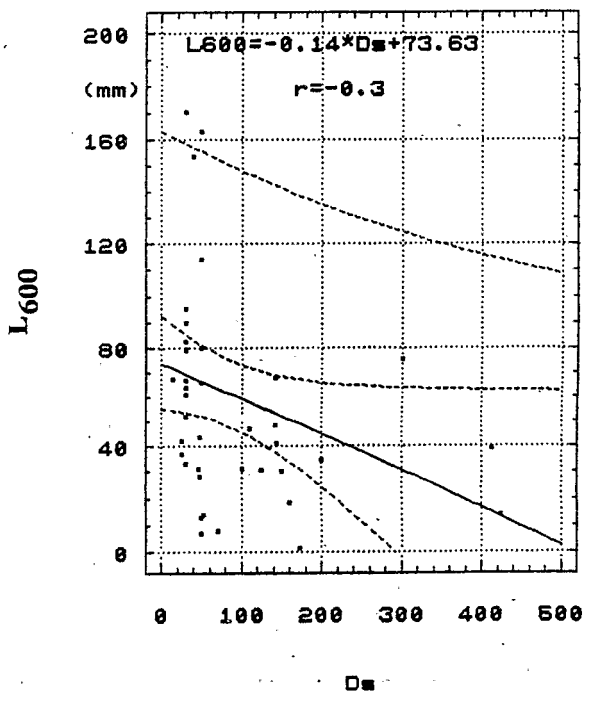
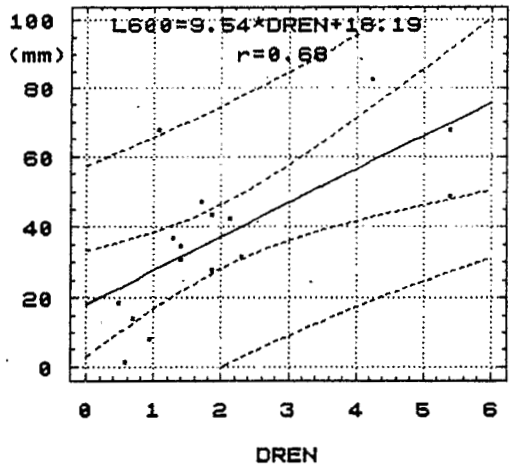
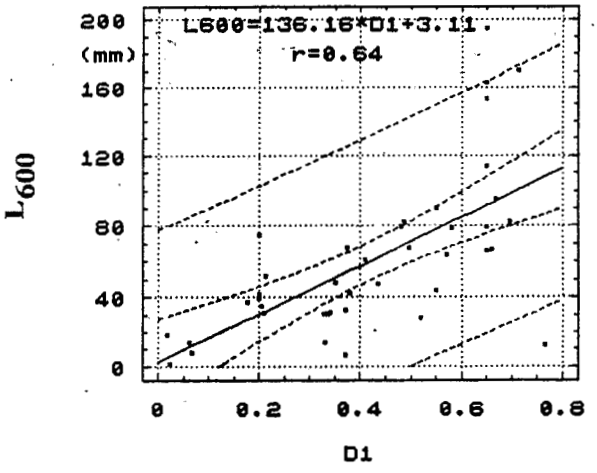


Figura 4.5.11B: Correlação entre parâmetros característicos das bacias.

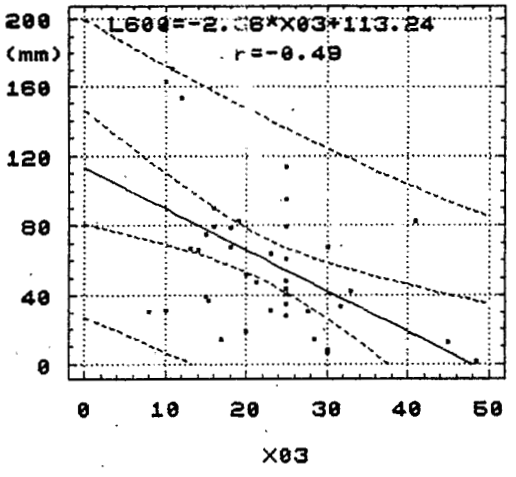
Regressão entre L_{600} e DREN



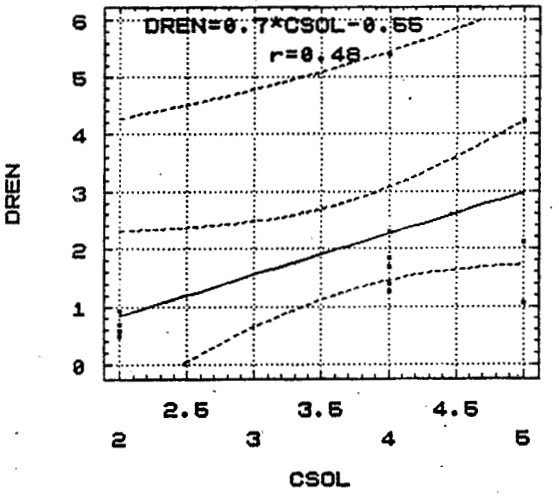
Regressão entre L_{600} e D1



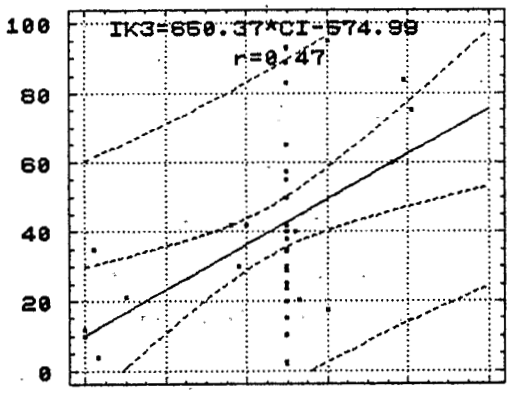
Regressão entre L_{600} e X03



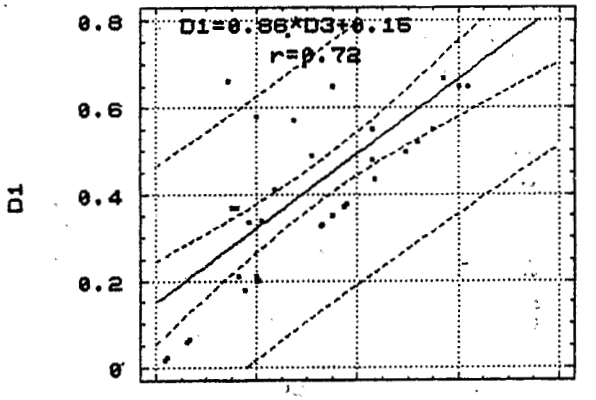
Regressão entre DREN e CSOL



Regressão entre IK3 e CI



Regressão entre D1 e D3



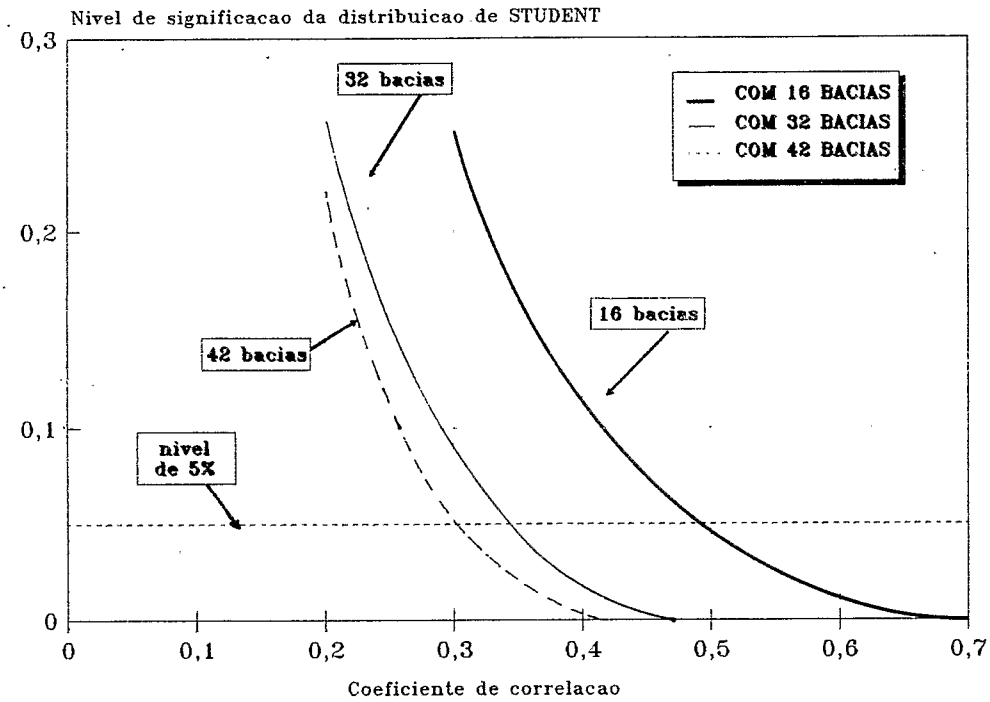


Figura 4.5.11C: Nível de significação dos coeficientes de correlação.

4.5.3.3 Análise, em componentes principais, do papel dos diferentes parâmetros

A análise, em componentes principais, confirma, felizmente, as grandes linhas da análise anterior do parágrafo 4.5.3.2:

- As relações entre os diversos parâmetros físicos, e morfológicos e os dos modelos são complexas. Não se pode ir muito longe na sua simplificação, sem sofrer uma perda sensível de informação. Os dois primeiros componentes explicam menos de 50% da variância ou da inércia total do sistema.

- O primeiro componente, que explica 33% da variância, pode ser representado pela variável L_{600} que é justamente a que tentamos explicar em primeiro lugar.

- O reagrupamento dos parâmetros e das bacias, em relação ao primeiro eixo, confirma as relações evidenciadas no momento do estudo precedente das correlações: L_{600}, D1, D3, CVEG e CSOL compõem esse primeiro eixo e se opõem a SUP e a AÇUD.

- **A** está muito próximo do **segundo componente** que explica ainda 15% da variância. A e CSOL compõem esse segundo eixo. Eles se opõem a ALT, COMP e CVEG.

- As associações e os reagrupamentos **em função dos componentes 3 e 4**, que explicam, cada um, mais ou menos 13% da variância, são menos evidentes. Não encontramos para isto explicação física simples.

- Os oito últimos eixos explicam ainda 25% da variância, sem que nenhum dentre eles ultrapasse 6%.

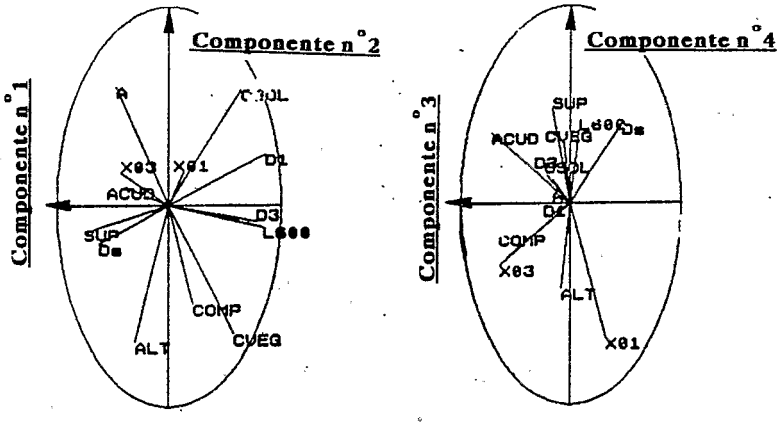
Os reagrupamentos de bacias no plano dos dois primeiros componentes confirmam também o que havíamos encontrado quando do estudo tipológico das bacias realizado no parágrafo 4.5.1: As bacias S33, S43, LUZ, S32 e S42 são reagrupadas, FZ1, LBA, RLG também, etc.

É muito interessante lembrar que a primeira tipologia do parágrafo 4.5.1 tinha sido realizada, unicamente, a partir das características do regime hidrológico, **e sem considerar, ainda, as características físicas das bacias.** Apesar disso constatam-se aqui os mesmos reagrupamentos de bacias!

Figura 4.5.12a : Análise, em componentes principais, dos diferentes parâmetros - Análise dos componentes

Porcentagem da variância explicada por cada componente

Componente N°	Porcentagem da Variância	acumulada
1	33.14	33.14
2	15.61	48.75
3	13.38	62.13
4	12.28	74.41



Coordenadas dos quatro primeiros componentes

	1° componente	2° componente	3° componente	4° componente
L_{600}	0.83251	-0.11194	0.07580	0.36413
A	-0.47457	0.59920	-0.12028	0.04539
SUP	-0.67591	-0.12010	-0.16981	0.47572
CSOL	0.63960	0.58116	-0.15792	0.11269
CVEG	0.57540	-0.64680	-0.06224	0.30383
ACUD	-0.38577	0.08760	-0.72019	0.35160
COMP	0.71392	-0.50140	-0.57143	-0.27770
Ds	-0.62826	-0.19822	0.46352	0.39651
ALT	-0.30428	-0.68247	-0.08169	-0.43604
X01	0.12710	0.16411	0.31740	-0.67851
D1	0.85079	0.25321	-0.16375	-0.05648
X03	-0.42638	0.15989	-0.64860	-0.31696
D3	0.76787	-0.08129	-0.21481	0.13501

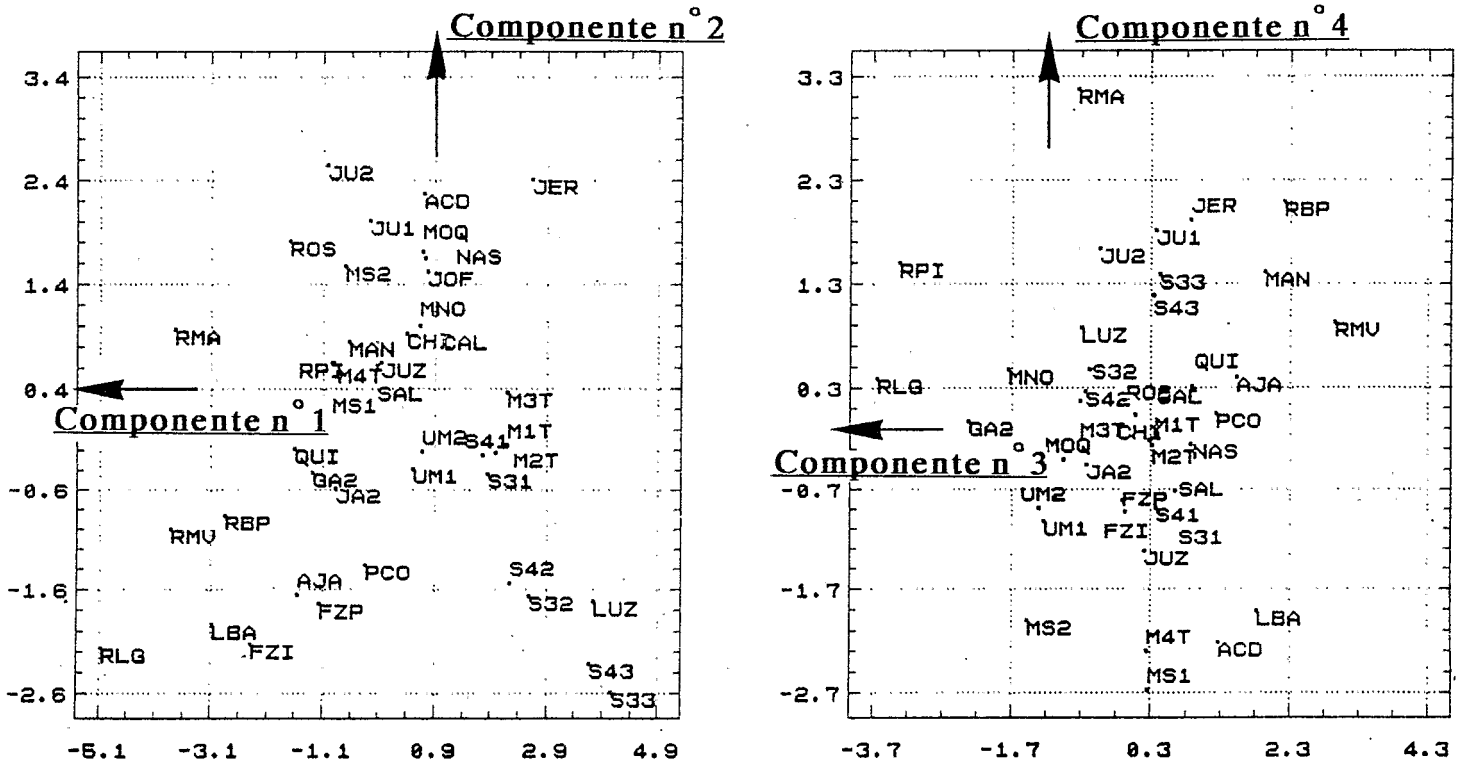


Figura 4.5.12b : Análise, em componentes principais, dos diferentes parâmetros - Reagrupamento das bacias

4.5.3.4 Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE

■ Explicações de L_{600} pelos parâmetros físicos ou morfológicos da bacia.

O método de STEPWISE, proposto por STATGRAPHICS, ajusta um modelo linear que é, na realidade, uma equação que permite uma estimativa da variável dependente (L_{600}) a partir de um ou vários parâmetros físicos e morfológicos.
O método estatístico de STEPWISE identificou rapidamente, e sem ambiguidade, os fatores CSOL e CVEG como sendo os que provocam a continuação mais importante da variância da relação. Eles explicam, sozinhos, mais de 74% dessa variância.

A equação proposta é : $L_{600} = 25{,}9\ CSOL + 19{,}7\ CVEG - 95\ mm$ (4)

A figura 4.5.13 permite comparar a coerência das L_{600} iniciais com as calculadas pelo modelo.

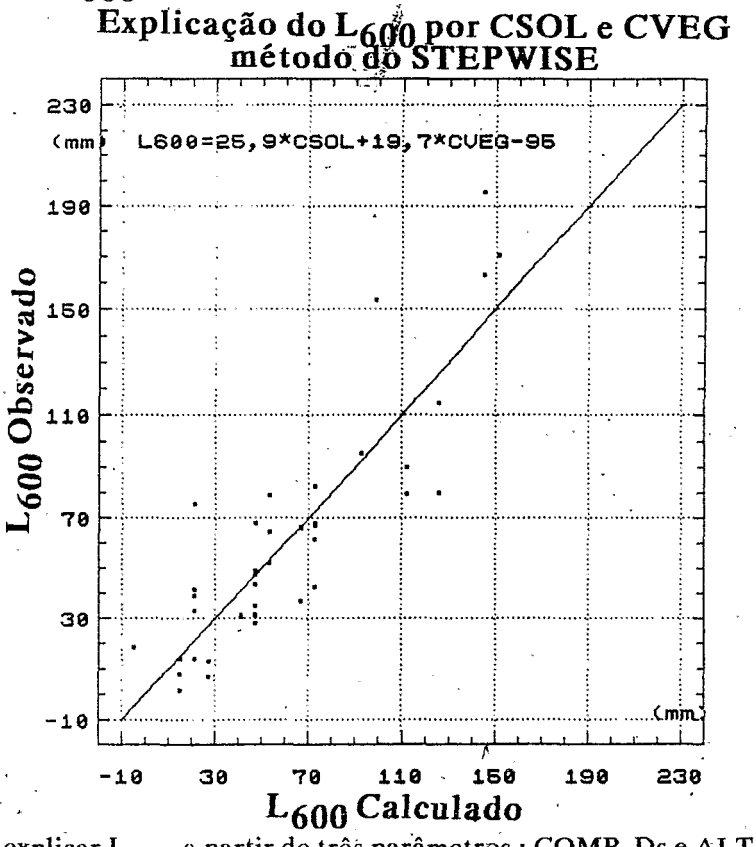
Figura 4.5.13 Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE (parâmetros físicos das bacias). Explicação do L_{600} por CSOL e CVEG.

Seleção dos parâmetros pelo método do Stepwise

Variável	Correlação	Variância explicada
1. SUP	.3480	5.5116
2. CSOL	.5460	16.9909
3. CVEG	.6616	31.1401
4. ACUD	.2540	2.7583
5. COMP	.0875	.3089
6. Ds	.3039	4.0687
7. ALT	.2793	3.3837

Variáveis selecionadas	Coef.	Variância explicada
2. CSOL	25.7973	52.2346
3. CVEG	19.6766	74.8855

$r^2 = 0{,}76$



Tentamos utilizar o mesmo método para explicar L_{600}, a partir de três parâmetros : COMP, Ds e ALT. A relação encontrada é muito pior, visto que ela suprime, apenas, 13% da variância. Isso prova claramente, *por absurdo*, a importância do papel desempenhado pelos fatores CSOL e CVEG.

▪ Explicação de L_{600} pelos parâmetros do modelo

Utilizamos o mesmo método para estimar L_{600}, porém, desta vez, a partir dos parâmetros do modelo.

A equação encontrada é a seguinte : $\mathbf{L_{600} = -0{,}27\ IK1 + 99{,}7\ D1 - 1{,}9\ X03 + 108}$

Esta equação explica 71% da variância de L_{600}. A figura 4.5.14 ilustra sua pertinência.

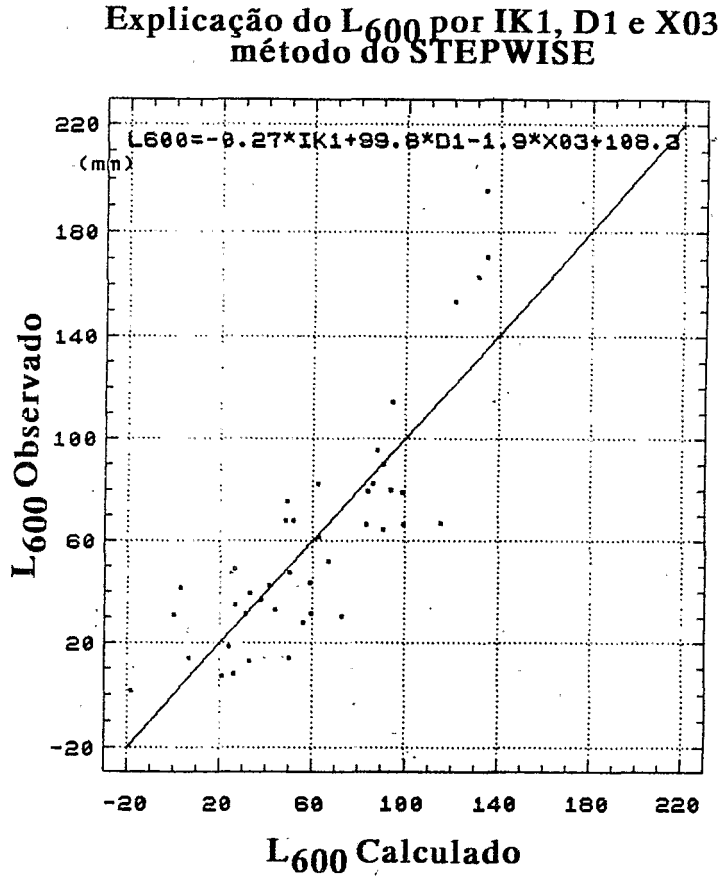
Figura 4.5.14 Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE (parâmetros do modelo). Explicação do L_{600} por IK1, D1 e X03.

Seleção dos parâmetros pelo método de Stepwise

Variável	Correlação	Variância explicada
1. CI	.1643	1.1103
2. IKX	.5399	16.4549
3. IKN	.1528	.9560
4. IK1	.5944	21.8508
5. X01	.0803	.2598
6. D1	.6418	28.0114
7. IK3	.2669	3.0689
8. X03	.4861	12.3752
9. D3	.5884	21.1830

Variáveis selecionadas	Coef.	Variância explicada
4. IK1	-0.26978	15.3820
6. D1	99.7536	25.1045
8. X03	-1.87659	19.0908

$r^2 = 0{,}71$



4.5.4 Primeira tentativa de transposição

A explicação das L_{600} das bacias estudadas pelos parâmetros CSOL e CVEG, utilizando a equação (4) proposta no parágrafo precedente, é simples, coerente e satisfatória : 70% da variância é explicada, o que corresponde a um coeficiente de correlação de 0,84.

Dois grandes problemas surgirão, no entanto, para o usuário que desejar aplicar essa fórmula para bacias desconhecidas:

1) As 42 bacias estudadas foram objeto de estudos pedológicos específicos que requereram muito tempo. Para repeti-los, mesmo sumariamente, numa bacia desconhecida, seria necessário contar com a participação de um pedólogo que tenha uma certa experiência da hidrodinâmica das vertentes e que conheça os solos das 42 bacias representativas estudadas.

2) Se tiver a sorte de conseguir a participação de tal especialista, ele constatará, de imediato, que a estimativa dos parâmetros CSOL e CVEG, base da fórmula precedente, é empírica e muito aproximativa!

Enfim, a aplicação dessa fórmula, de aspecto muito simples, tornar-se-á muito complicada! Que fazer, então? Como traduzir os critérios subjetivos empregados, fundados sobre anos de experiência, de observação e de raciocínio? Como transformá-los em critérios mais imparciais, que tenham por base documentos e conhecimentos disponíveis nas bacias do Nordeste?

Tentamos (CADIER, 1984) estabelecer uma classificação das bacias em seis classes, tendo por base critérios principais (solo e sub-solo) e critérios secundários (relevo, vegetação, aspectos da rede de drenagem). Esta classificação, estabelecida a partir da tipologia das bacias de que dispunhamos na época (mais ou menos 50% da informação atual), foi reapresentada no quadro 4.5.6. Este quadro permite uma descrição mais detalhada da bacia a classificar. Sua utilização está sujeita, infelizmente, às mesmas restrições que a fórmula precedente: para classificar, corretamente, uma bacia, será preciso assegurar-se da participação de um pedólogo especializado, que deverá conhecer os solos das bacias representativas do presente estudo. Para diminuir as dificuldades de emprego da fórmula precedente e/ou do quadro 4.5.6, decidimos utilizar duas novas fontes de informação: os módulos da rede geral e os mapas de solos da EMBRAPA, os quais serão o assunto do próximo capítulo.

TABELA 4.5.6 Primeira tentativa de classificação das pequenas bacias do Nordeste brasileiro (*segundo CADIER, 1984*)

	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃON				CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS		
Classe e L_{600}	Tipo e permeabilidade da FORMAÇÃO GEOLÓGICA	SOLO DOMINANTE Tipo	SOLO DOMINANTE Espessura e Permeabilidade	Sequências típicas de solos na bacia	Vegetação	Relevo	Rede de drenagem
Cl: 0 L_{600}: 0-6 mm	Sedimentar permeável (Arenoso, dunas, calcários, etc.)	AQ LA arenosos Associação LA+CA	Muito esp. > 2 m Muito permeável (200mm/h) ou mais	AQ e LA situadas nas partes baixas, qualquer que seja os solos a mont.	Natural- ou Cultura	Nulo ou fraca - mente ondulado	Inexistente ou muito fraca
Cl: 1 L_{600}: 6-12 mm	Sedimentar permeável p.e. Calcários ou arenitos siltosos. Cristalino: granito grosseiro	CA+LA (textura média)) PE, TR, PL espesso RE espesso	Espesso 1 a 2 m Permeavel (100 mm/h)	CA,LA,PE,TR nas partes altas. PE nas partes baixas, sem afloramento rochoso.	Natural ou Cultura	Fraca - mente ondulado	Pouco densa
Cl: 2 L_{600}: 12-24mm	Cristalino fissurado ou sedimentar com zonas impermeáveis	PVA NC vértico RE espesso PL sem SS V	Espessura média de 0,5 à 1 m Permeabilidade moderada:50 a 100mm/h.	Solos com uma grande capacidade de retenção nas partes baixas (PL, Aluviões).	Natural ou degradada	Ondulado	Marcada
Cl: 3 L_{600}: 24-48mm	Cristalino que pode ser fissurado ou Sedimentar impermeável	NC, RE, Re PL+SS	Pouco espesso (0,5 m)- Pouco permeável (50mm/h)	Associação PL+SS nas partes baixas. Quando a géologia o permite, alguns afloramentos nas partes altas.	Natural ou dégradada	Ondulado a fortemente ondulado.	Bem marcada.
Cl: 4 L_{600}: 48-96mm	Cristalinos Sedimentares impermeáveis argilosos, lateritos.	NC, Re, SS Re rasos Sedimentos argilosos Lateritos	Raso 0,5m Permeabilidade fraca <50mm/h	Proporção de afloramento de rocha ou de zonas impermeáveis superiores a 5% da bacia	Natural ou pouco degradada	Ondulado e montanhoso.	Densa
Cl: 5 L_{600}: > 96 mm	Sub-solo impermeável: Cristalino sem falha ou sedimentar impermeável	NC e Re raso, SS Lateritos Afloramentos Sedimentos argilosos Impermeabilização artificial (cisternas, etc.)	Solos muito rasos. Permeabilidade muito fraca	Proporção de afloramento ou de zonas impermeáveis superiores a 25%. Quando o relevo é fraco o sub-solo deve ser totalemente impermeável	Pouco desenvolvida nesse tipo de bacia	Todo tipo, de fraco a montanhoso.	Muio desenvolvida.

Nota: * Para as classes 2, 3 e 4, a degradação da vegetação natural pode significar um aumento de meia a uma classe suplementar.

* Ver abaixo da tabela 4.6.10 as significações das abreviaturas dos solos.

4.6 UTILIZAÇÃO DOS DADOS DA REDE GERAL

4.6.1 Por que utilizar os dados da rede geral? Objetivos e estratégia.

Agora, precisamos estabelecer regras que permitam uma estimativa quantativa dos escoamentos em bacias que não possuem informação hidrológica. Lembramos os elementos dos quais dispomos:

a) **A informação adquirida nas bacias hidrográficas representativas não permite estabelecer diretamente estas regras.**

A tipologia dos regimes dessas bacias permitiu-nos hierarquizá-las e reagrupá-las de maneira lógica e coerente, em função de algumas características físicas, porém, encontramos grandes dificuldades para ir além de uma simples análise qualitativa. A estimativa dos valores de L_{600}, a partir das características apresentadas no parágrafo precedente, revelou-se de difícil utilização por não-especialistas.

Não podemos, portanto, empregar diretamente os resultados qualitativos da tipologia das bacias, para efetuar uma **transposição** sistemática das características hidrológicas. Esta transposição requer uma quantificação dos regimes que ainda não possuimos.

b) **As precipitações, o solo e a vegetação são os principais fatores explicativos dos regimes, na zona semi-árida.**

Como se previa, a tipologia das bacias mostrou que as características dos solos (características hidrodinâmicas e estado da sua superfície) e da vegetação são os principais fatores explicativos desses reagrupamentos. Lembramos que, em primeiro lugar, nos livramo da influência das precipitações que é um dos fatores condicionantes dos regimes mais importantes.

c) **Contraste entre a cartografia "hidro-pedológica" detalhada e específica realizada nas BHR e a cartografia pedológica geral do Nordeste efetuada pela EMBRAPA.**

As bacias representativas foram objeto de uma cartografia pedológica detalhada, especificamente realizada para compreender melhor os mecanismos hidrológicos. Sistematicamente, observou-se, mediu-se e tentou-se estimar a permeabilidade do solo, sua espessura, sua capacidade de retenção, o estado de sua superfície e da vegetação bem como, a situação das diferentes unidades de solos na toposequência, isto é, no percurso da água.

Infelizmente, esse tipo de informação não existe, sob essa forma, nos mapas pedológicos que cobrem todo o Nordeste. Suas escalas são muito menos detalhadas. Esses mapas pedológicos utilizam a classificação da EMBRAPA, que foi concebida, principalmente, em função de critérios de fertilidade agronômica e atribuem uma importancia secundária às características hidrodinâmicas. Assim sendo, determinados solos, com a mesma denominação e, portanto, pouco ou não diferenciados nos mapas, podem ter espessuras muito variáveis ou apresentar horizontes impermeáveis que os tornam diferentes na visão dos hidrólogos. É o caso dos Planossolos cuja espessura e localização na toposequência regem o comportamento

hidrológico, como também, dos Regossolos para os quais a existência e a profundidade da camada impermeável chamada "fragipan" é responsável pelos raros escoamentos produzidos por este tipo de solo.

d) **As estações da rede geral hidrométrica: uma fonte de informação ainda não utilizada.**

Propomo-nos a utilizar a informação fornecida pela rede geral, com a finalidade de estabelecer uma **estimativa quantitativa** (e não mais qualitativa) dos escoamentos oriundos dos diferentes **grupos ou classes de solo**. A escala dos mapas da EMBRAPA parece compatível com o tamanho das bacias da rede geral.

Utilizaremos, no final dos nossos cálculos, os resultados obtidos nas bacias representativas a fim de validar essa estimativa e propor coeficientes corretivos específicos para as pequenas bacias.

O esquema 4.6.1 resume as diversas etapas e o roteiro seguido

4.6.2 Seleção e homogeneização dos dados das bacias da rede geral

■ Critérios de seleção das bacias

Selecionamos todas as bacias da rede hidrométrica geral que possuiam as seguintes características:

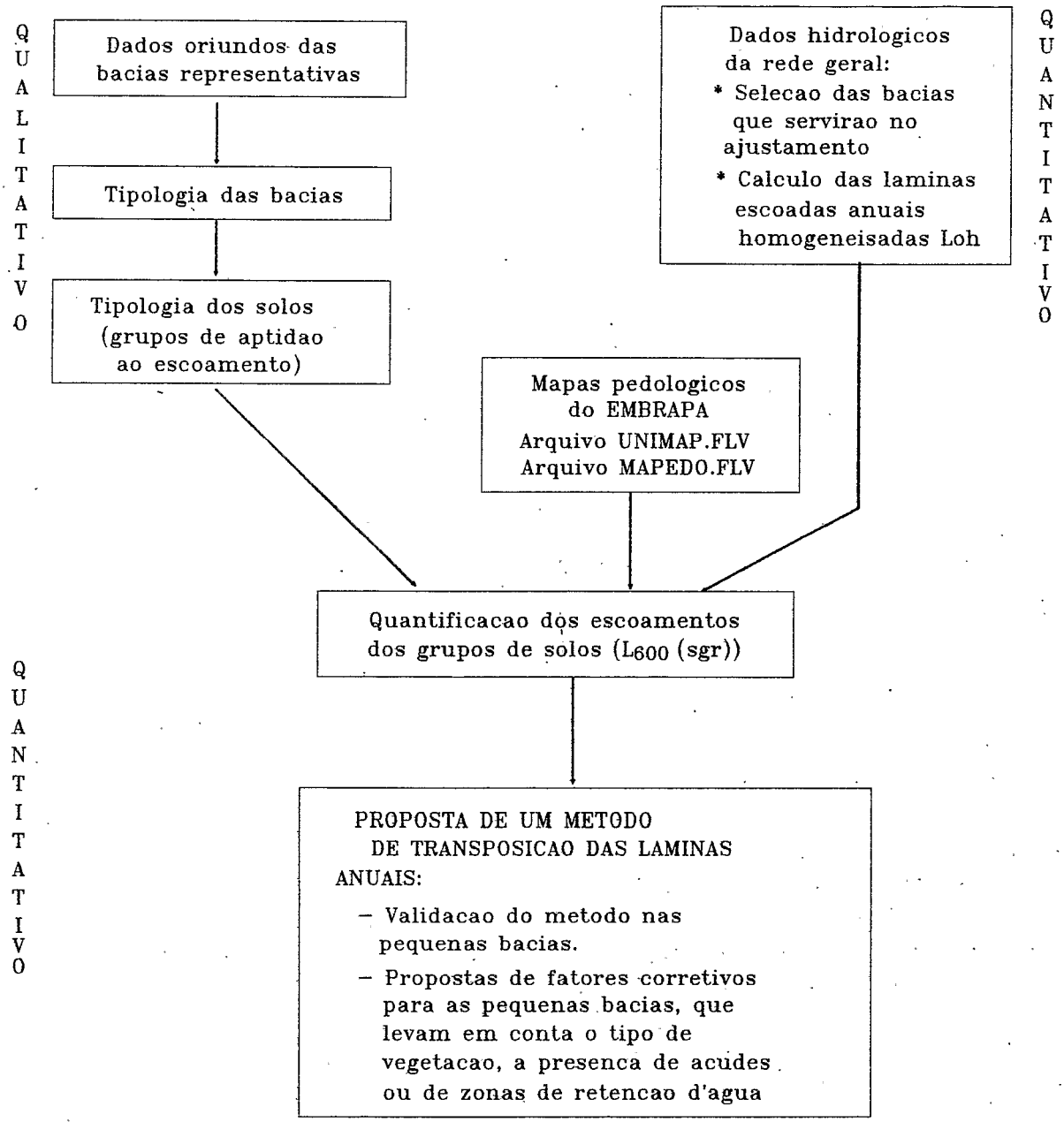
1) Estar situada na zona semi-árida, portanto, com uma pluviometria média inferior a 800 mm. A parte da bacia que recebe mais de 1.000 mm por ano, quando existe, deve ser pequena.

2) Ter uma superfície inferior a 5.000 km^2.

3) Possuir uma série de descargas de duração e de qualidade suficientes para permitir uma estimativa aceitável dos escoamentos médios anuais em um período de, ao menos, sessenta anos. Essa última condição, baseada em critérios de avaliação subjetivos, é delicada em sua aplicação e requer experiência; ela provocou a eliminação da maior parte das bacias que respondiam as duas primeiras condições.

A figura 4.6.2 indica as bacias da rede geral que foram, finalmente, selecionadas.

Figura 4.6.1: Utilização da rede geral para elaboração de um método de transposição



As 15 bacias selecionadas[3] estão, praticamente, situadas na parte cristalina da zona semi-árida.

A metade dessas bacias faz parte da bacia do Vale do Jaguaribe, cujos dados beneficiaram-se, estes últimos 60 anos, de um melhor tratamento. Com efeito, eles foram criticados, analisados e interpretados por F.G. AGUIAR, nos anos 30, e pelo programa do GEVJ, nos anos 60. Perto de três quartos das bacias selecionadas estão situadas no Estado do Ceará, o restante nos Estados da Paraíba, do Rio Grande do Norte e de Pernambuco.

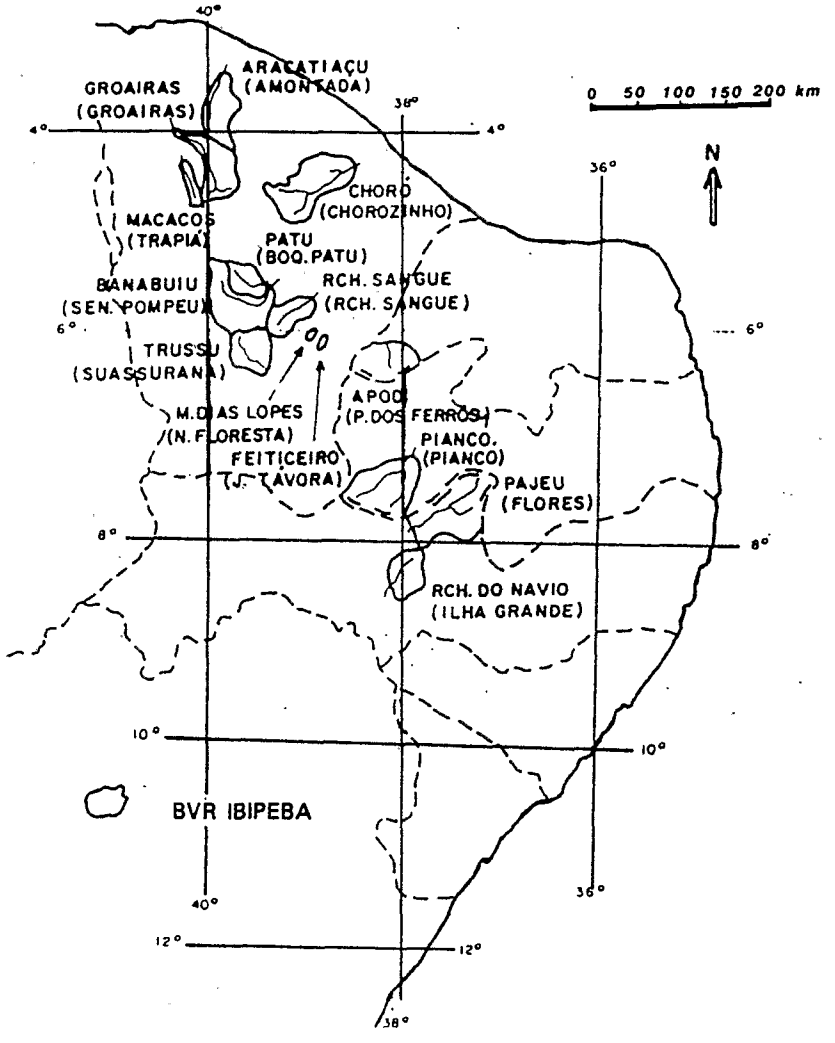


Figura 4.6.2 Mapa da situação das bacias selecionadas.

[3] O número muito pequeno de bacias (15 bacias de um total de 35, respondendo aos dois primeiros critérios) que, finalmente, puderam ser selecionadas é uma conseqüência da severidade dos critérios de seleção, necessária para obter uma estimativa confiável da média de longa duração. Isso demonstra a importância e a urgência de **um programa de recuperação e reabilitação da rede geral** de medição hidrométrica, nesta parte do Brasil. Por exemplo, é **frustrante e preocupante** constatar que só pudessemos selecionar uma única estação em todo o Estado de Pernambuco, nenhuma no Estado da Bahia (cuja parte semi-árida cobre uma superfície superior à da França) ou que nenhuma dessas estações esteja situada na grande zona climática de Transição!

■ Processamento e homogeneização da informação hidropluviométrica:

*** Cálculo da lâmina média escoada, Loh.**

Processamos e homogeneizamos a informação obtida das quinze estações de acordo com o roteiro seguinte que tem a finalidade de fornecer uma **estimativa da lâmina anual média escoada.** Como é frequente, a série das descargas é sempre mais curta do que as das precipitações. As etapas desse roteiro foram concebidas para conseguir uma estimativa dos escoamentos, "*homogeneizada e estendida*", ou seja, o mais independente possível das anomalias climáticas dos períodos realmente observados.

a) **Cálculo da série das lâminas escoadas** anuais observadas (Lo_i). O sufixo "o" significa "observado" e o índice "i" corresponde ao "ano $_i$".

b) **Seleção do maior número possível de pluviômetros** de boa qualidade situados na bacia (ou o mais próximo possível)..

c) **Cálculo da série cronológica de um índice pluviométrico anual** (Po_i), através da média aritmética das precipitações desses pluviômetros, para o período cujas lâminas escoadas foram realmente observadas.

d) **Ajustamento de uma função potência às séries das lâminas anuais** Po_i; e dos índices Lo_i, do tipo $L = a(P-b)^c$ (1); a, b e c são os parâmetros deste ajustamento, como demonstra o exemplo da figura 4.6.3.

e) **Extensão e homogenização da série dos índices pluviométricos.** Para isso, ajusta-se e utiliza-se uma regressão[4] entres as séries dos índices pluviométricos (Po_i), definidas no item c, e as séries pluviométricas observadas nos postos pluviométricos da região, com a maior duração possível (50 a 70 anos), de boa qualidade e os mais próximos possíveis da bacia.

f) Enfim, aplica-se a equação (1) para **completar a série das descargas a partir da pluviometria.** Obtem-se, assim, uma estimativa "homogeneizada" ou, ainda, uma reconstituição crítica da lâmina escoada média interanual, chamada **Loh.** O período de homogeneização varia entre 50 e 70 anos.

O quadro 4.6.1 mostra algumas características das bacias selecionadas. Este quadro contém, por outro lado, antecipando-se ao que segue, as lâminas escoadas calculadas com o método que vamos propor no final deste capítulo.

[4] Forçamos a reta dessa regressão a passar pelo ponto de origem para evitar que sua utilização para a extensão das séries não levasse a superestimar, exageradamente, a variança das descargas, em virtude da não-linearidade da relação chuva-deflúvio que utilizamos.

TABELA 4.6.1 Principais características das bacias selecionadas: Comparação entre os escoamentos calculados e os observados

Nº bacia	SUPERFÍCIE em Km^2	PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTOS ANUAIS em mm		
		P	Loh	L(p)
1-RCH. DOS MACACOS (TRAPIA)	1520	750	90	82,9
2-GROAIRAS (GROAIRAS)	2700	720	65	70,9
3-ARACATIAÇU	2800	700	79,9	77,3
4-CHORO (CHOROROZINHO)	4050	750	85,2	80,0
5-TRUSSU (SUSSUARANA)	2068	770	57	62,0
6-M. DIAS LOPES (AC.NOVA FLORESTA)	161	718	68	68,4
7-FEITICEIRO (AC.JOAQUIM TAVORA)	119	718	72	57,5
8-RCH. DO SANGUE (RCH. DO SANGUE)	1363	740	59,5	58,2
9-PATU (BOQ.PATU)	1021	817	76,5	77,3
10-BANABUIU (SENADOR POMPEU)	4555	703	58	59,2
11-APODI (PAU DOS FERROS)	2050	850	63,9	66,4
12-PIANCO (PIANCO)	4550	800	69,9	69,0
13-PAJEU (FLORES)	5066	620	37,3	44,9
14-RCH. DO NAVIO (ILHA GRANDE)	2372	470	17,8	24,5
15-IBIPEBA	321	600	10,8	10,0

Com: **P** = Precipitação média

Loh = Lâmina escoada média interanual (o sufixo "**oh**" significa "*observada e depois homogeneizada*")

L(p) = Lâmina calculada pelo método de transposição proposto.

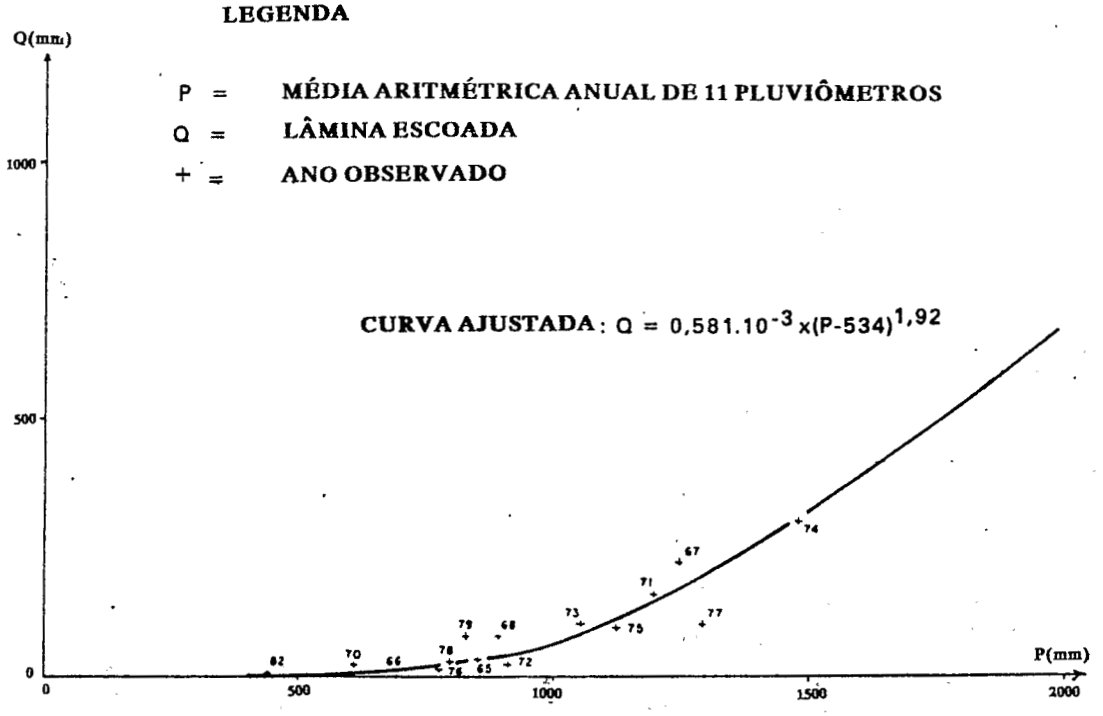


Figura 4.6.3 Exemplo de ajustamento de uma função potência entre lâminas escoadas e precipitadas

4.6.3 Introdução da informação pedológica e pluviométrica

4.6.3.1 Elaboração final da informação pedológica e pluviométrica: os arquivos UNIMAP e MAPEDO

Tentemos explicar as variações de Loh através das variações dos solos e da pluviometria. Para isso, sigamos o roteiro seguinte para cada uma das bacias do quadro 4.6.1.

1) Determinação, por planimetria, da superfície de cada uma das **Unidades de Mapeamento Pedológico** (UMP) existentes na bacia. Estas UMP são as associações de solos definidas e delimitadas nos mapas de solos editados pela EMBRAPA. Esses mapas existem para todo o Nordeste, numa escala que varia entre 1:400.000 e 1:1.000.000.

2) Identificação, para cada uma das UMP, da proporção e das características dos diversos tipos de solos (TS) que as compõem.

3) Cálculo da chuva anual média em cada UMP. Este cálculo é efetuado sobrepondo-se o mapa das isoietas aos das UMP, como mostra a figura 4.6.4. Quando se constata uma diferença pluviométrica superior a 300 mm entre as partes mais e menos chuvosas de uma UMP, será preciso subdividir esta UMP em duas, para não haver diferença superior a 300 mm.

Essas informações foram reagrupadas em dois arquivos por Flávio H. BARRETO, pedólogo da EMBRAPA.

- **MAPEDO.FLV**. Este arquivo indica, para cada bacia, a proporção coberta por cada uma das UMP e a precipitação média, máxima e mínima das UMP. Mostra, também, a superfície total da bacia e a lâmina escoada média interanual Loh.

Apresentamos na tabela 4.4.2 um extrato do arquivo MAPEDO.FLV que apresenta algumas das UMP que cobrem as bacias da rede geral de BANABUIU, FEITICEIRO e MANOEL DIAS.

TABELA 4.6.2: Extrato do arquivo MAPEDO.FLV

Rio: MANOEL DIAS em NOVA FLORESTA
Bacia N°: 6 Superfície: 161 km² Loh: 68,0 mm Número de UMP: 2

Estado	UMP	%	Pmédia(mm)	Pmáx	Pmín
CE	Red9	80.0	710.0	730.0	690.0
CE	Red5	20.0	710.0	720.0	700.0

Rio: FEITICEIRO em JOAQUIM TAVORA
Bacia N°: 7 Superfície: 119 km² Loh:72,0 mm Número de UMP: 2

Estado	UMP	%	Pmédia(mm)	Pmáx	Pmín
CE	Red10	21.2	690.0	700.0	690.0
CE	PE39	78.8	695.0	690.0	690.0

Rio: BANABUIU em SENADOR POMPEU
Bacia Nº: 10 Superfície: 4555km^2 Loh: 58,0mm Número de UMP: 3

Estado	UMP	%	Pmedio(mm)	Pmax	Pmin
CE	PE17	28.4	700.0	750.0	650.0
CE	BV1	10.1	700.0	720.0	680.0
CE	PE26	1	660.0	670.0	650.0
CE	Re6	6.8	680.0	710.0	650.0
CE	PE23	1.2	655.0	660.0	650.0
CE	NC3	5.7	680.0	710.0	650.0
CE	PE20	3.8	715.0	740.0	690.0
CE	BV2	13.2	755.0	820.0	690.0
CE	PE13	11.2	730.0	750.0	710.0
CE	Re5	0.1	675.0	680.0	670.0
CE	Re19	0.2	695.0	700.0	690.0
CE	BV3	12.3	740.0	790.0	690.0
CE	PE11	6	705.0	740.0	670.0

- **UNIMAP.FLV** contém a lista de todas as Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP) do Nordeste semi-árido. Este arquivo apresenta, também, os percentuais e as características[5] dos diferentes tipos de solos (TS) que compõem cada UMP. O extrato do arquivo UNIMAP.FLV, a seguir, apresenta 5 das UMP das bacias precedentes (tabela 4.6.3).

TABELA 4.6.3: Extrato do arquivo UNIMAP.FLV

Nome da UMP e número de TS	Nome do TS	CARACTERÍSTICAS DOS TS: Porcentagem coberta pelo TS	Sub-classe (textura)	Horizonte A	Classe de relevo	Classe de Vegetação	Permeabilidade de MUNTZ
CE NC3							
4 TS:	Re	15	1.1	5.0	2.5	3	83.
	NC.arg	50	1.7	4.1	2.0	3	32.
	PL.ind	20	1.3	5.0	1.5	3	82.
	SS.ind	15	1.3	5.0	1 0	3	8.
CE BV3							
3 TS:	Re	20	1.1	3.7	2.5	2	83.
	NC.arg	30	1.7	4.1	2.5	2	32.
	BV.trun	50	1.7	6.0	2.5	2	24.
CE Re5							
2 TS:	Re	60	1.1	4.5	4.5	2	83.
	PE.arg	40	1.7	4.5	4.5	2	50.
CE Red9							
3 TS:	Red	65	1.1	5.0	2.5	3	83.
	NC.arg	20	1.7	4.1	2.5	3	32.
	SS.ind	15	1.3	5.0	1.0	3	8.
CE Red5							
3 TS:	Red	50	1.1	4.5	4.0	2	83.
	PE.arg	20	1.7	4.5	2.5	2	50.
	NC.ind	30	1.5	4.1	2.5	2	40.

[5] UNIMAP.FLV contém indicações das principais características de cada TS: textura, tipo de horizonte A, relevo, vegetação, profundidade, permeabilidade.

As características dos TS do arquivo UNIMAP foram definidas seguindo as convenções seguintes:

Significação dos códigos de textura (subclasse), segundo F. BARRETO

Código	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
Significação	arenosa	arenosa média	arenosa argilosa	média a argilosa	argilosa	rocha

Significação do código do horizonte A :

Código	1	2	3	4	5	6	7
Significação	úmico	chernozênico	proeminente	de espessura média	pouco espesso	decapado	rochosos

Significação do código de relevo :

Código	1	2	3	4	5
Significação	plano	suave a ondulado	ondulado	fortemente ondulado	montanhoso

Significação do código da vegetação :

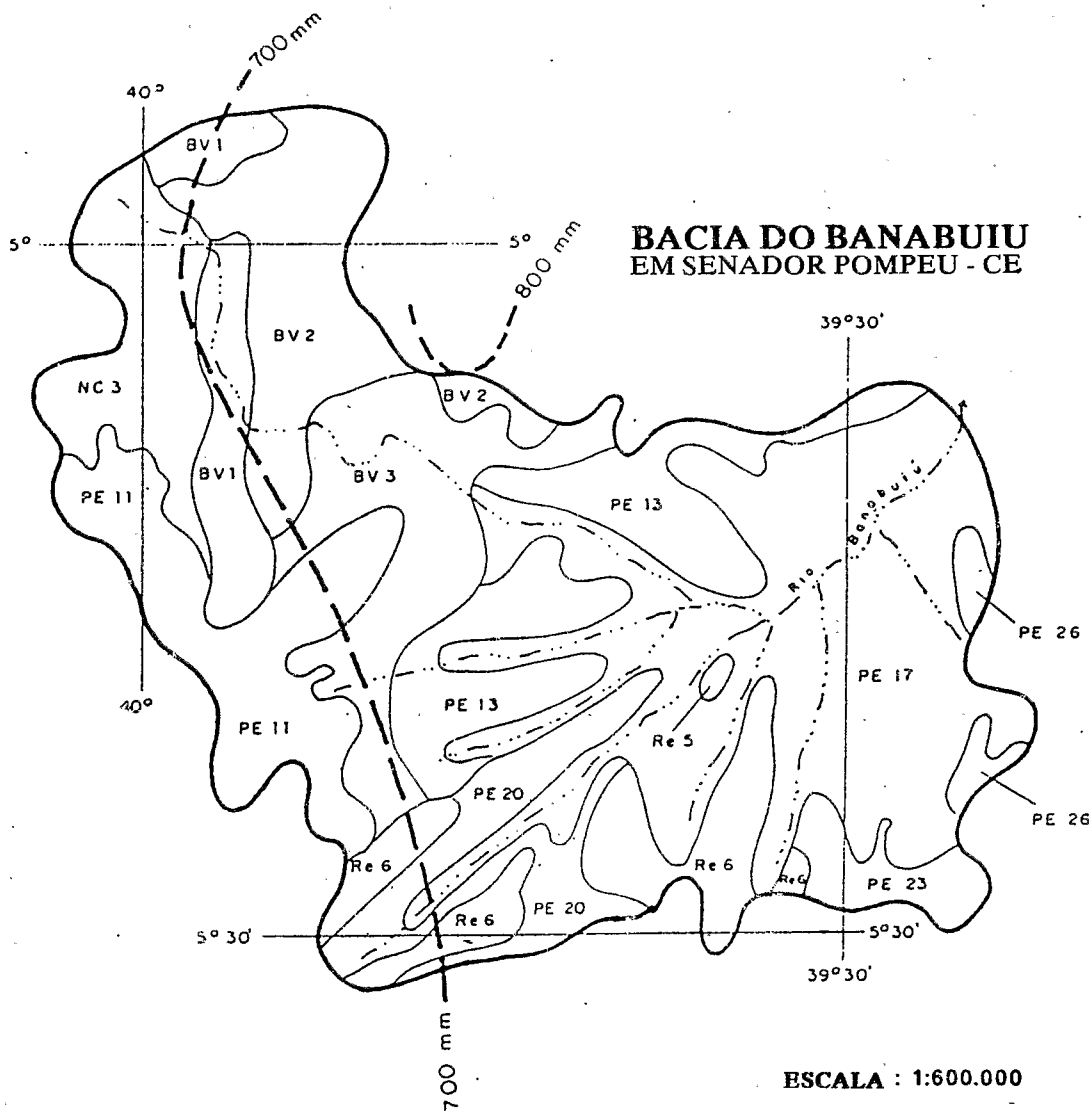
Código	1	2	3
Significação	floresta	formação hipoxerófila	formação hiperxerófila

A tabela 4.6.4 fornece uma idéia do tamanho do arquivo UMIMAP.FLV, que, uma vez impresso, atinge uma centena de páginas. O número elevado de UMP é sobretudo devido à imcompatibilidade das legendas dos mapas dos diferentes Estados. O grande tamanho desse arquivo torna indispensável o emprego de técnicas de otimização.

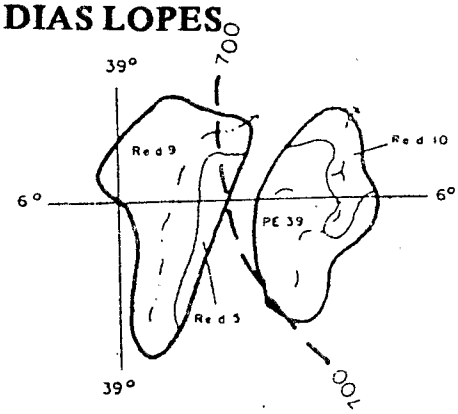
Tabela 4.6.4: Números de UMP e de TS contidos no arquivo UNIMAP.FLV

	Todo o Nordeste	Nordeste semi-árido	15 Bacias estudadas
Número de UMP	1413	844	152
Número de TS	-	170	79

Figura 4.6.4: Exemplo de mapa pedológico e de isoietas para três bacias da rede geral



BACIA DO MANOEL DIAS LOPES
EM NOVA FLORESTA - CE



BACIA DO FEITICEIRO
EM JOAQUIM TÁVORA - CE

CONVENÇÕES: RED 9, PE17, etc..., SÃO AS UNIDADES DE MAPEAMENTO PEDOLÓGICO (UMP) DOS MAPAS DE SOLOS DO EMBRAPA

4.6.3.2 Tipologia dos solos: definição dos grupos de solo

Buscaremos, naturalmente, reagrupar os diferentes tipos de solos (TS) relacionados, em função de suas características hidrodinâmicas (espessura, porosidade, capacidade de retenção, permeabilidade, presença de uma camada situada na superfície do solo ou em profundidade que impeça a infiltração, vegetação, relevo, etc.).

Temos que utilizar a nomenclatura e as definições propostas nos mapas de solos da EMBRAPA, que são os únicos documentos disponíveis em todo o Nordeste sobre o assunto.

Na legenda desses mapas, cada tipo de solo (TS) é definido por:

1) Seu nome: Bruno não Cálcico, Latossolo, etc.
2) O que chamamos suas "características adicionais": teor em argila, espessura, etc...

Propomos os quatro grupos de solo discriminados a seguir:

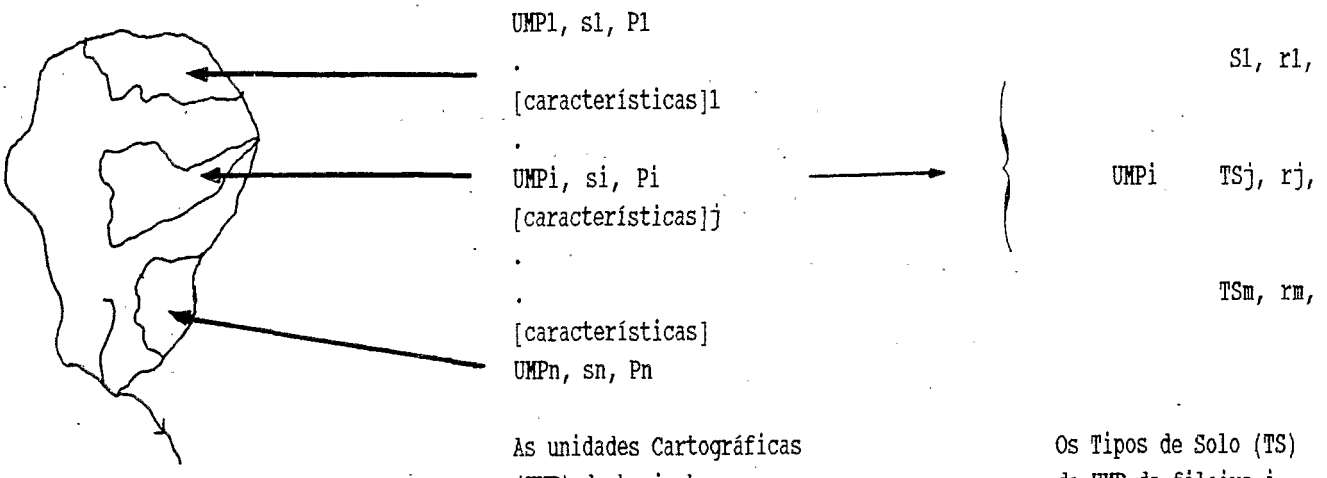
Grupo 1 : os solos muito espessos e permeáveis.
Grupo 2 : os solos ainda espessos e de permeabilidade média a elevada.
Grupo 3 : os solos de espessura média a fraca e de permeabilidade média a fraca.
Grupo 4 : os solos que apresentam características hidrodinâmicas particulares, tais como, os horizontes que bloqueiam a infiltração, ou com muito fortes heterogeneidades (por exemplo, afloramentos de rocha impermeáveis cercados por solos arenosos muito permeáveis) ou, ainda, solos que possuem fendas de retração (Vertissolos), etc.

Dentro de cada grupo, definimos vários sub-grupos para os quais buscaremos calcular os escoamentos médios interanuais corrigidos para o valor padrão de 600 mm (coeficiente L_{600}). A lista e as características desses sub-grupos encontram-se no quadro 4.6.5 do parágrafo 4.6.4.3.

4.6.4 Cálculo dos valores de L_{600} dos sub-grupos de solo

4.6.4.1 Princípio do método de otimização

A subdivisão de uma bacia em UMP e TS pode ser esquematizada da seguinte maneira:



Bacia K

A lâmina escoada média anual da bacia k pode ser obtida pela fórmula:

$$Lcalc_k = \sum_{UMP=1}^{n} [(L_{600}(UMP) * e^{(0,0033(P(UMP)-600)} * s(UMP)]^{6} \quad \textbf{(1)}, \text{ com:}$$

- UMP são as diferentes UMP que compõem a bacia.
- P(UMP) é a pluviometria anual média de cada UMP.
- $L_{600}(UMP)$ é o coeficiente L_{600} da UMP, calculado da seguinte maneira:

$$L_{600}(UMP) = \sum_{TS=1}^{m} [L_{600}(TS) * r(TS)] \quad \textbf{(2)}, \text{ com:}$$

- $L_{600}(TS)$ é a L_{600} do subgrupo de solo, ao qual pertence o TS, isto é, $L_{600}(sgr)$. Encontra-se no quadro 4.6.5 a lista desses subgrupos.

- r(TS) é a proporção do TS na UMP; está definido nos mapas de solo da EMBRAPA e no arquivo UNIMAP.FLV.

6 Todas as bacias da rede geral estão situadas na grande zona climática Sertão e são, então, caracterizadas por um coeficiente climático C = 1. Não transcreveremos este coeficiente para simplificar.

Finalmente, reagrupando-se os solos por subgrupo, a lâmina calculada da bacia k pode ser escrita:

$$\mathbf{Lcal_k} = \sum_{sgr=1}^{t} [(L_{600}(sgr) \times a(sgr))] \quad (3)$$

- **sgr** é o subgrupo de solo.
- $\mathbf{L_{600}(sgr)}$ é a lâmina L_{600} do subgrupo de solo sgr.
- **a(sgr)** é um coeficiente que depende da proporção total e das características dos solos do subgrupo sgr na bacia k, como, também, da pluviometria da UMP ou do TS [a(sgr) depende, também, de outras características específicas dos solos da bacia que, no momento, não levamos em consideração].

M. MONGAILLARD (inédito, 1990) implantou os programas que permitem o cálculo das diferentes $L_{600}(sgr)$. Estes programas escritos em PASCAL, chamados CTL.PAS e OPTM.PAS, utilizam toda a informação dos arquivos UNIMAP.FLV e MAPEDO.FLV, para minimizar, com a ajuda do algoritmo de ROSENBROCK (1960), os três critérios seguintes:

$$Srel = \sum_{k=1}^{nb} (Lcal_{bacia\ k} - Loh_{bacia\ k})$$

$$Sabs = \sum_{k=1}^{nb} ABS\ (Lcal_{bacia\ k} - Loh_{bacia\ k})$$

$$Scar = \sum_{k=1}^{nb} (Lcal_{bacia\ k} - Loh_{bacia\ k})^2$$

Estes critérios permitem comparar as lâminas calculadas Lcal com as lâminas observadas homogeneizadas Loh.

4.6.4.2 Realização da otimização: discussão, precauções e artifícios

Esses cálculos otimizam um número de variáveis (as L_{600} dos subgrupos) superiores ao número de bacias que dispomos. Assim, o número de variáveis é superior ao de equações! Para resolver essa situação (normalmente incontornável), recorremos a certos artifícios e impusemos algumas condições suplementares baseadas no bom senso e na experiência, a fim de impedir que se cometam deslizes na otimização.

* Primeiramente, foi preciso "impedir" que o método de otimização modificasse, de maneira excessiva, os valores de L_{600} de determinados solos que só cobrem superfícies bem pequenas. Entende-se, intuitivamente que, para compensar, por exemplo, um erro de 5 mm na L_{600} de um TS que cobre 25% de uma bacia, o computador (ou, melhor dito, seu programa) poderá propor aumentar em 125 mm a L_{600} de um TS que só cobre 1% da bacia. Pode-se, facilmente, não tendo o devido cuidado, atingir valores absurdos. Em termos metafóricos, poderíamos dizer que não se pode pesar, ao mesmo tempo e sobre a mesma balança, um rato e um elefante; basta que o elefante se alimente, para aumentar consideravelmente a estimativa de peso do rato...

* Evitar-se-á, por outro lado, que as L_{600} de subgrupos diferentes alcancem valores que não sejam coerentes com o que se sabe do comportamento hidrodinâmico de seus solos. Assim, impedir-se-á, por exemplo, que um solo mais espesso tenha uma L_{600} superior à de um solo semelhante, mas menos espesso, etc.

Empregamos, igualmente, um outro artifício chamado a **otimização "por parte"**: quando um tipo de solo só se apresenta de maneira significativa em duas ou três bacias, efetua-se a otimização das L_{600} desse TS, unicamente com essas bacias, que ficam "bloqueadas" para os demais cálculos.

Os programas que utilizam o método de ROSENBROCK são bem adaptados a esse tipo de problemas, pois permitem efetuar a otimização de uma, de algumas ou de todas as variáveis, impondo-lhes os limites que se quer.

Alguns processos que fomos obrigados a empregar requerem bastante cuidados, pois induzem *"efeitos perversos ou colaterais"* que podem levar a não se saber mais quais são os valores que correspondem a uma realidade hidrológica ou pedológica. Retomando nosso primeiro exemplo, não se pode deixar o programa acrescentar 125 mm à L_{600} do TS que só cobre 1% da bacia; ele será fixado arbitrariamente. Porém, quem pode afirmar que nossa estimativa é correta? Fomos coagidos e forçados a utilizar esses procedimentos por não termos encontrado uma outra solução.

4.6.4.3 Resultados obtidos: os valores de L_{600}, base da transposição.

A otimização é um cálculo iterativo; tomamos como ponto de partida os valores de L_{600} contidos na primeira classificação proposta em 1983 para os diferentes sub-grupos. (ver tabela 4.5.6)

O quadro 4.6.5 resume as principais características e os resultados obtidos para cada subgrupo.

Tabela 4.6.5: Características e valores de L_{600} dos subgrupos de solo.

Grupo 1: Solos espessos, arenosos muito bem drenados

Subgrupo	L_{600}	Solos e características
1.1	0	Areias, dunas, etc.
1.2	3	Regossolos cujo horizonte de bloqueio da infiltração, chamado "Fragipan", está a mais de 1,20 m de profundidade.

Grupo 2: Solos profundos de textura média a argilosa, bem drenados que devem produzir um escoamento fraco a médio

Subgrupo	L_{600}	Solos e características
2.1	5	Solos espessos de textura média: Latossolos, Cambissolos, Regossolos com fragipan entre 0,8 e 1,20 m.
2.2	10	Solos espessos de textura média a argilosa: Latossolos, Cambissolos.
2.3	15	Latossolos e Cambissolos de textura argilosa. Solos Podzólicos de textura arenosa a média.
2.4	15	Cambissolos, solos Podzólicos de textura média.
2.5	25	Solos aluviais; Podzólicos de textura média a argilosa.
2.6	30	Podzólicos de textura média a argilosa ou plíntica.

Grupo 3: Solos de profundidade média (de 20 a 50 cm) e de permeabilidade média.

Subgrupo	L_{600}	Solos e características
3.1	37	Solos Litólicos
3.2	37	Podzólicos pouco espessos
3.3	37	Brunizem
3.4	37	Brunos não Cálcicos
3.5	37	Cambissolos e Rendzinas pouco espessos
3.6	37	Solos argilosos (Podzólicos, Cambissolos, Brunos não Cálcicos, Litólicos).
3.7	37	Podzólicos e "terra roxa" erodidos.
3.8	60	Cambissolos argilosos e erodidos.

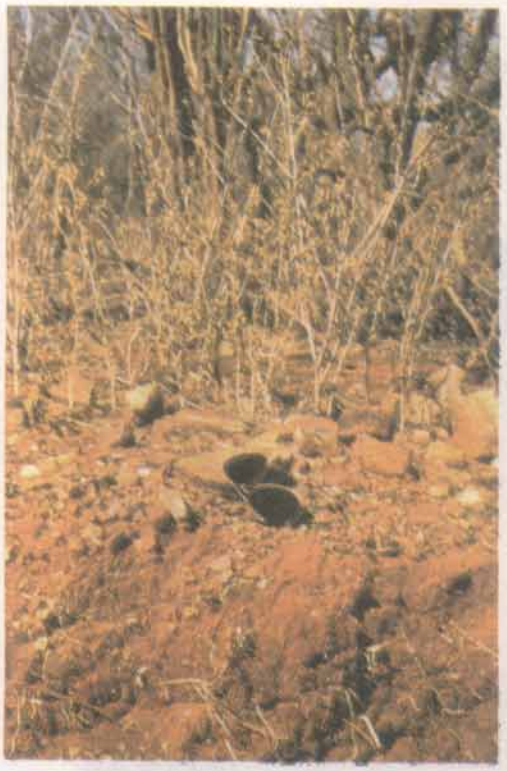
Grupo 4: Solos cuja hidrodinâmica é especial

Subgrupo	L_{600}	Solos e características
4.1	25	Solos Vérticos com fendas de retração. Vertissolos, Cambissolos e Brunos não Cálcicos vérticos.
4.2	25	Solos Planossólicos. Brunos não Cálcicos planos e Planossolos não solossódicos, espessos.
4.3	60	Solos truncados ou erodidos. Bruninsem, Brunos não Cálcicos ou Litólicos.
4.4	70	Planossolos solossódicos quando são pouco espessos (Planossolos cujo horizonte argiloso é halomórfico).
4.5	125	Solos halomórficos.
4.6	37	Brunos não Cálcicos erodidos e vérticos
4.7	50	Plintossolo (solo com horizonte impermeável).
4.8	70	Plintossolo erodido.
4.9	37	Solos não determinados
5.0	90	Afloramentos.

Os valores de L_{600} contidos neste quadro são fundamentais e constituem a base do método de transposição que propomos. A tabela A do anexo 1 destinada aos usuários é diretamente oriunda deste quadro 4.6.5.

OS SOLOS QUE ESCOAM

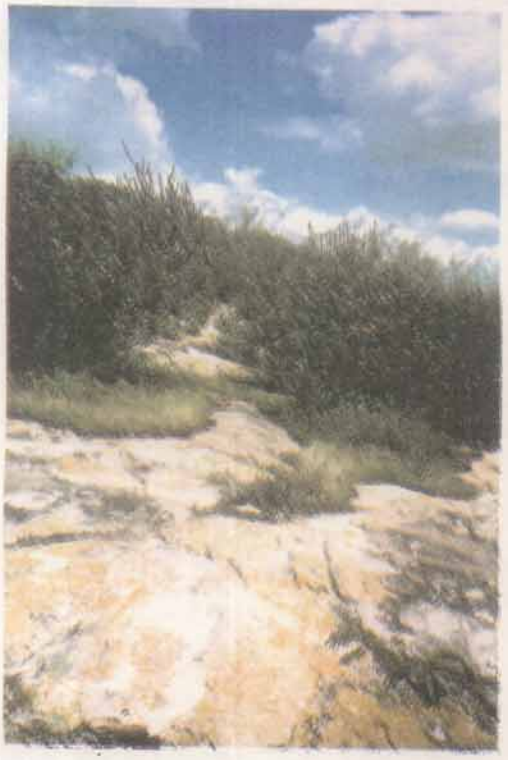
Prancha 10



Solos brunos não cálcicos vérticos (bacia de Sumé) L_{600} = 25mm



Solos litólicos L_{600} = 37mm



Afloramentos L_{600} = 90mm
Atenção com a heterogeneidade



Solonetz L_{600} = 125mm. Cuidado com o sal!
Observar o aspecto arredondado da parte superior das pequenas colunas na superfície do solo

SOLOS QUE NÃO ESCOAM

(Podem reter a água proveniente de montante)



Areias quartzosas L_{600} = *0mm*



Latossolos L_{600} = *5mm*

Prancha 11

OUTROS TIPOS DE SOLOS

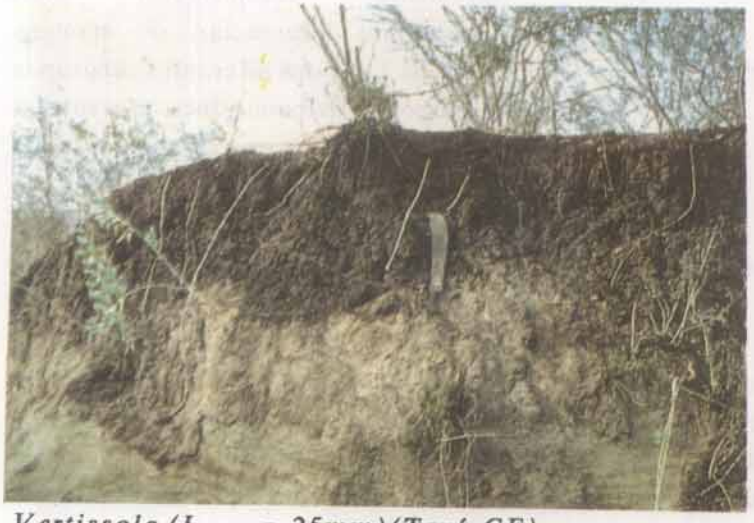
Prancha 12



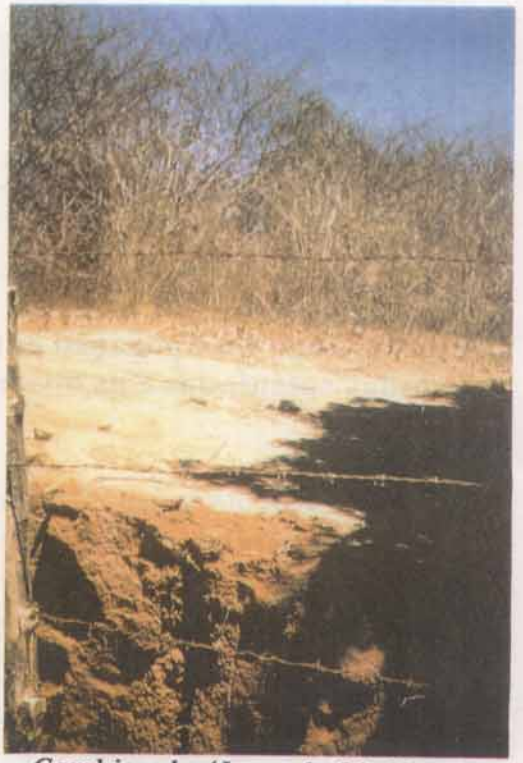
Solo podzólico (L_{600} = de 15 à 60mm) (Juatama-CE)



Forte erosão regressiva em cima de Solonetz (L_{600} = 125mm) (Açu-RN)



Vertissolo (L_{600} = 25mm) (Tauá-CE)



Cambissolo (L_{600} de 5 à 60mm) (Ibipeba-BA)

■ Comparação entre as lâminas calculadas e as observadas das 15 bacias.

A figura 4.6.5 mostra a coerência entre os valores das **lâminas calculadas** com o método de transposição proposto L(P) e a estimativa da lâmina média interanual Loh, das mesmas bacias.

Os valores de L(P) e de Loh já foram apresentados no quadro 4.6.1.

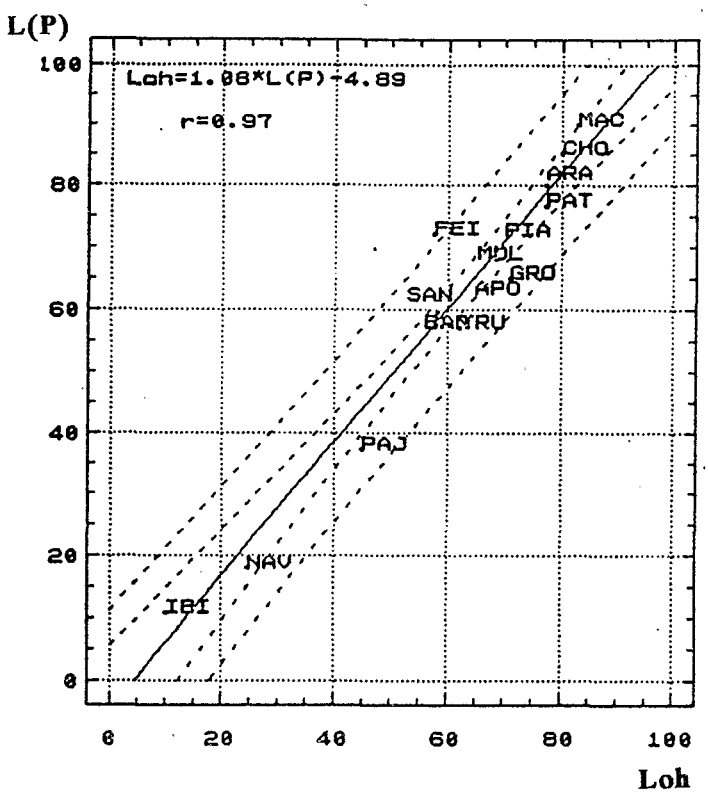


Figura 4.6.5 Comparação entre as lâminas calculadas e as observadas.

A correlação entre as duas séries é boa. O coeficiente de correlação é de 0,97 e a reta de regressão, cuja equação é Loh = 1,08 * L(P) - 4,89 mm, está próxima da primeira bissetriz.

Notamos:

a) A quase invariância do L_{600} dos **solos do grupo 3**. Os "efeitos colaterais" assinalados anteriormente devem ser mínimos, visto que estes solos representam mais de 50% das superfícies das bacias estudadas. É muito forte a convergência da otimização para 37 mm, da L_{600} deste grupo. Tentativas realizadas com 35 mm ou 40 mm dão, por exemplo, resultados claramente desajustados. Não conseguimos diferenciar, de maneira nítida, as L_{600} dos diferentes subgrupos do grupo 3. Atribuimo-lhes, portanto, o mesmo valor, com exceção do subgrupo 3.8.

Os solos do grupo 3 são os mais freqüentes na parte cristalina do semi-árido. São caracterizados por espessuras que variam entre 20 e 50 cm e permeabilidades regulares (entre 20 e 60 mm/h, medidas com o método de MUNTZ). Inclinamo-nos a qualificar esses solos de "**normais**", do ponto de vista hidrológico. Eles escoam "**normalmente**" quando acontecem algumas chuvas ou depois de um forte aguaceiro. Sua capacidade de retenção permite às culturas suportarem períodos secos de 8 a 10 dias. São solos, freqüentemente, tomados como exemplo pelos hidrodinâmicos/modelizadores do solo (Molinier *et al*, 1989b).

Veremos, mais adiante, que o valor de 37 mm que propomos está muito próximo do que propunha F.G. AGUIAR (1940) para as bacias do Ceará.

b) A convergência da otimização para os **valores das L_{600} dos grupos 1 e 2 é menos claro**[7]. Temos alguns pontos de referência: **as areias** e os **Regossolos** não geram nenhum escoamento, ou escoam muito pouco. Acontece o mesmo com a maioria dos **Latossolos**.

O caso dos **Cambissolos** e, sobretudo, dos **Podzólicos**, é mais delicado, visto que sua L_{600} varia entre 5 e 60 mm, segundo a espessura, a permeabilidade e os efeitos da erosão.

Quanto aos **aluviões**, o valor de 25 mm proposto é uma média muito imperfeita, visto que aluviões arenosos não escoam e os aluviões argilosos são completamente impermeáveis.

Se se considera como finalidade prática deste trabalho, o estabelecimento de normas de dimensionamento de barragens, poder-se-á tolerar uma imprecisão relativamente importante nas L_{600} dos grupos 1 e 2, que escoam pouco, de qualquer maneira. Não se construirá barragem a jusante de uma bacia formada unicamente desses solos. Se, por outro lado, esses solos estão associados a solos de outros grupos, o escoamento nesses últimos será predominante e dissimulará, portanto, a imprecisão em questão.

c) Os resultados do **grupo 4**, constituído de solos cujo comportamento hidrodinâmico é "especial", são mais difíceis de comentar:

Os Solonetz:

A convergência para o valor de 125 mm (é o valor de L_{600} mais elevado que encontramos), atingida pelos **Solonetz** e pelos **solos halomorfos**, é muito clara. Isso corresponde aos nossos conhecimentos das características hidrodinâmicas desses solos, que são impermeáveis.

Os Planossolos:

Estes solos são formados de uma camada de areia permeável situada sobre uma camada totalmente impermeável e são encontrados nas partes baixas das bacias. Pode-se pensar que durante a estação das chuvas a parte baixa das toposequências satura-se e torna-se impermeável, da mesma maneira que os fenômenos de zona contributiva, com superfície variável, descritos por HEWLETT e NUTTER (1970), e MEROT (1988). Isso poderia explicar o fato de a contribuição dos Planossolos, em bacias de certo tamanho, ser superior ao que deixaria prever sua permeabilidade.

[7] O método de otimização empregado leva a um erro absoluto constante no valor das L_{600} dos diferentes TS. Isso conduz, evidentemente, a erros relativos mais importantes das L_{600} dos solos que escoam pouco.

Propomos dois valores para a L_{600} dos **Planossolos**:

- L_{600} = 25, quando seu horizonte A arenoso é espesso e eles são solossódicos.
- L_{600} = 70, quando, ao contrário, o horizonte A não é espesso e o Planossolo é solossódico. Neste caso, o Planossolo tem algumas das características de um Solonetz.

Isto conduziu-nos a corrigir e aumentar o valor que havíamos proposto em 1983.

Certamente que existem situações intermediárias. A espessura da camada de areia e a posição na toposeqüência, constituem as chaves do comportamento dos Planossolos.

Os Vertissolos:

O valor moderado dos **Vertissolos** (L_{600} = 25 mm) é, igualmente, difícil de interpretar. Estes solos são permeáveis, quando secos, por causa de suas fendas de retração; trata-se de uma *"macro-permeabilidade"*. Uma vez saturados, suas argilas se dilatam e tornam-se totalmente impermeáveis. Para complicar o problema, os Vertissolos estão situados em lugares planos onde, finalmente, a água recusada pelo solo pode permanecer no local até que se evapore ou até formar pequenas lagoas. Esse valor de 25 mm deve ser considerado como uma média imperfeita que pode esconder fortes variações. Parece que, como constatamos nas bacias de TAUÁ e de SUMÉ, os Vertissolos ou os solos vérticos provocam, geralmente, escoamentos anuais médios bastante fracos. Atenção, estes solos podem gerar cheias muito fortes.

Os afloramentos de rocha:

O valor de 90 mm proposto para os **afloramentos rochosos** corresponde, também, a uma média regional que integra valores e situações muito variáveis:

. Um afloramento cercado de areia pode não escoar, é o caso dos amontoamentos de pedras graníticas. Observa-se, assim, frequentemente, matériais de origem detrítica fortemente permeáveis situados imediatamente a jusante dos afloramentos. Esta associação diminui fortemente o escoamento que se poderia esperar de uma região acidentada e rochosa. É o caso da bacia representativa de JUATAMA, caracterizada por numerosos inselbergs.

. Inversamente, um afloramento uniforme que constitui um "implúvio perfeito" poderia ter uma L_{600} próxima, teoricamente, de 600 mm (370 mm, segundo os cálculos efetuados em 1983). Como assinalou J. RODIER, na África: "*Muitas vezes é o caso de afloramentos que estão no mesmo nível que o solo, em zonas de relevo geral fraco e quando os solos das depressões são pouco profundos. Esta associação podendo constituir um conjunto plano caracterizado por escoamentos muito fortes*".

4.6.4.4 Importância relativa dos fatores explicativos "solo" e "chuva"

Os cálculos de otimização que efetuamos consideraram a influência das precipitações anuais pela fórmula:

$$L(P) = L_{600} \cdot e^{0,0033(P-600)}$$

Procuramos saber qual seria o peso real dos fatores "**precipitação**" e "**grupo de solo**" na explicação da variância das lâminas escoadas **Loh**.

Para isto, consideramos quatro situações diferentes:

Tabela 4.6.6 Explicação dos escoamentos em função da chuva e do solo.

Fator explicativo considerado	% de explicação da variância	Correlação Loh x L(P)	Critérios Scar (mm^2)	Sabs (mm)	Srel (mm)
SOLO e CHUVA: Chuva real; L_{600} otimizada.	87	0,94	467	62	-2
SOMENTE SOLO: Chuva fixada em 710 mm; L_{600} otimizada.	63	0,78	2910	166	-8
SOMENTE CHUVA: Chuva real; L_{600} fixada em 42,7 mm.	39	0,60	4650	228	+8
NEM UM NEM OUTRO: Chuva fixada em 710 mm; L_{600} fixada em 42,7 mm.	0	0	7280	246	+10

Notas:

P = 710 mm e L_{600} = 42,7 mm são os valores médios para as bacias estudadas. A adoção destes valores permite obter um valor máximo para a percentagem de explicação do fator não fixado.

Esses cálculos foram feitos com uma amostra de bacia da rede geral mais importante do que aquela das 15 bacias mencionadas no quadro 4.6.1, o que explica ser o coeficiente de correlação entre Loh e L(P) ligeiramente inferior ao proposto na figura 4.6.5.

Esse quadro demonstra, para as bacias estudadas, que o solo é o primeiro fator explicativo das variações dos escoamentos. Notamos que as precipitações médias, nessas bacias, não variam muito; se não fosse assim, seria possível que a importância relativa dos fatores "solo" e "chuva" se invertessem.

4.6.4.5 Tentativa de evidenciar outros fatores explicativos

Uma vez admitido os valores de L_{600} de cada subgrupo de solo, procutamos aplicar o mesmo método de otimização ao segundo termo da equação (3) do parágrafo 4.6.4.1.

Esse coeficiente, que havíamos chamado **a(sgr)**, só conteve, até agora, as fórmulas que permitem introduzir a correção pela precipitação anual. Vamos, agora, utilizar esse coeficiente para tentar evidenciar o papel das características dos tipos de solo contidas no arquivo UNIMAP.FLV. Lembramos que a maior parte dessas características (textura, tipo de horizonte A, relevo, vegetação, profundidade e velocidade de infiltração) provêm, diretamente, das legendas dos mapas de solos da EMBRAPA.

■ As características dos TS:

Os resultados dessa segunda tentativa de otimização são muito decepcionantes.

Tentou-se, por exemplo, introduzir uma fórmula de correção do tipo:

$$L_{melhorada} = L_{cal}(\text{Relevo-Ro})^a * (\text{Horizonte A - Ho})^b * (\text{Veget. - Vo})^c * (\text{Text. - Tod})^d ...$$

Os cálculos são efetuados para cada TS de cada uma das UMP de cada bacia, entendendo-se que os coeficientes a otimizar (a,b,c,d,Ro,Ho,Vo,To, etc.) devem ser os mesmos para todas as bacias e todos os TS.

As correções encontradas estão desprovidas de significação estatística, parecendo, algumas vezes, contrárias à lógica. Encontra-se, por exemplo, uma ligeira (porém, felizmente, não significativa) correlação **negativa** entre o escoamento e o relevo!

■ A pluviometria

Tentamos também melhorar o coeficiente A = 0,0033 da fórmula de correção pluviométrica. Sem êxito! O algoritmo de ROSENBROCK confirma este valor oriundo dos estudos de pequenas bacias hidrográficas representativas.

■ Conclusão:

O método de otimização empregado parece convergir, de maneira relativamente "estável" e "robusta", para um conjunto de valores de L_{600}, que permitirão estimar os escoamentos dos principais solos que escoam no Nordeste, o que constituía nosso objetivo. Parece, entretanto, que se aproxima dos limites desse método (pelo menos com os dados de que dispomos), pois, nenhuma das tentativas ulteriores de aperfeiçoamento dos resultados se desenvolveu de maneira convincente.

O método de ROSENBROCK não evidencia nem propõe qualquer correção dos desvios residuais pelos fatores condicionantes testados. Esses fatores são os utilizados de maneira clássica, em hidrologia: o relevo, a vegetação, a espessura do solo ou sua permeabilidade. ROSENBROCK não propõe, também, um aperfeiçoamento do coeficiente de correção pluviométrica A = 0,0033 que havíamos admitido a priori.

Estes insucessos são frustrantes, mas, depois de algumas reflexões, parecem normais pelas seguintes razões:

1) Tentamos otimizar um conjunto de equações das quais uma parte dos coeficientes já **tinha sido otimizada**. É, portanto, normal que não se possa melhorar muito os critérios de otimização, sobretudo, quando se considera o volume insuficiente de informações disponíveis.

2) Por outro lado, o tipo de solo (TS) ou seu subgrupo (sgr) contém, implicitamente, uma boa parte dos fatores condicionantes dos quais testamos a influência. Assim ;

os Planossolos encontram-se sempre sobre relevo fraco;
os Latossolos são sempre solos espessos;
as areias são sempre solos permeáveis, etc.

Portanto, a L_{600} calculada para cada subgrupo já continha uma boa parte da informação que se esperava obter com os fatores condicionantes. Isto explica parcialmente os insucessos encontrados.

3) A cartografia da EMBRAPA foi realizada em pequena escala, sem querer representar, especialmente, as características hidrodinâmicas dos solos. Esses mapas permitem a estimativa de médias regionais, porém, não seria razoável esperar obter, com esse tipo de mapa, num tão pequeno número de bacias, uma estimativa e uma compreensão mais perfeita das variações das L_{600} dos diferentes TS. Será necessário, para isso, conceber e executar estudos específicos.

4.6.5 Adaptação da fórmula às pequenas bacias

As fórmulas propostas para o cálculo dos valores de L_{600} e de L(P) dos diferentes grupos de solo foram ajustadas, como vimos anteriormente, para quinze bacias da rede geral que estão, em sua maior parte, situadas sobre embasamento cristalino e no Sertão norte semi-árido, principalmente no Estado do Ceará. Os valores que propomos correspondem, portanto, ao comportamento médio dessas bacias, de seus solos, de sua cobertura vegetal, da densidade dos açudes existentes e das sequências dominantes dos diferentes solos ao longo das vertentes (ou toposequências).

Quando as bacias são menores, cresce a variabilidade imposta por esses fatores. Será necessário corrigir as lâminas escoadas e calculadas com a ajuda das UMP e dos TS, por um ou vários *fatores corretivos* que considerarão as especificidades ou as diferenças de cada pequena bacia, em relação às condições regionais médias.

Esses **fatores corretivos** devem permitir levar em conta:

- A influência do tamanho e do número de açudes presentes na bacia.
- A influência das anomalias da cobertura vegetal.
- A influência de zonas permeáveis, situadas no percurso da água e suscetíveis de reter uma parte dos escoamentos (é, muitas vezes, o caso de quando a permeabilidade aumenta de montante para jusante).
- A influência do tamanho da bacia
- Toda e qualquer outra anomalia não constante dos itens precedentes.

Analisaremos nos itens seguintes a informação disponível para avaliar esses fatores corretivos.

4.6.5.1 Influência da cobertura vegetal no escoamento (correção CV)

■ Condições de referência da cobertura vegetal:

Os valores de L_{600} propostos para as UMP ou os TS correspondem a situações médias (ou centrais) da cobertura vegetal, nas condições atuais dessa parte semi-árida do Nordeste, que são intermediárias entre uma cobertura virgem (não desmatada) e uma inteiramente cultivada.

■ Informações quantitativas disponíveis a respeito da influência da cobertura vegetal sobre o escoamento:

O bom senso indica-nos que a vegetação intervem na gênese do escoamento de várias maneiras:

- Pela interceptação direta da chuva através de sua parte aérea, estudada, entre outros pesquisadores, por BULTOT *et al* (1976), FRANKEN *et al* (1982) e GIRARD (1974).
- Pelas modificações causadas no subsolo por suas raizes ou pela fauna que lhe está associada.
- Pela influência da camada das folhas e de detritos sobre a superfície do solo.
- Pela influência das práticas culturais.

Na realidade, só se dispõe de pouquíssimas informações quantitativas a respeito da influência da vegetação sobre o escoamento.

A VEGETAÇÃO

Prancha 13



Caatinga no período seco



Caatinga no período chuvoso



Suas variações brutais



Plantar morro abaixo, é muito mais fácil...

■ Resultados obtidos nas parcelas:

* Estudando-se uma amostra constituída de 72 parcelas cujas superfícies eram compreendidas entre 100 m^2 e 1 ha, BARRETO *et al* (1989) mostraram que, para coberturas pedológicas de Regossolo (RE) e de solo Bruno não Cálcico (NC), os escoamentos podem aumentar cerca de cinco vezes quando a cobertura vegetal passa de uma caatinga nativa, bem conservada (a qual assegura ao solo uma proteção máxima) para um plantio intensivo (solo descoberto).

* Na Bacia Experimental de SUMÉ (PB), estudando o comportamento de 4 microbacias cobertas de solos Bruno não Cálcicos Vérticos, evidenciamos um acréscimo do escoamento por um fator 7, em decorrência do desmatamento. O coeficiente L_{600}, com efeito, passa de 9 mm para 65 mm, depois do desmatamento e de um plantio de tomate nas duas microbacias (CADIER *et al* 1983b).
Após termos submetido, durante três anos, essas mesmas bacias a uma erosão intensiva que removeu as camadas superiores dos solos, o valor de L_{600} pulou para 180 mm, significando que os valores iniciais foram multiplicados por um fator 20. Lembramos que a L_{600} proposta para o solo Bruno não Cálcico Vértico é de 25 mm, valor que pode, como verificamos, variar entre 9 e 180 mm, de acordo com a degradação da vegetação e da superfície do solo!

■ Resultados obtidos nas pequenas bacias:

* Na Bacia Hidrográfica Representativa de TAUÁ (CE), foram evidenciadas variações de L_{600} da ordem de 50% para bacias de tamanho maior (de superfícies de 1 a 10 km^2), em função de variações da cobertura vegetal. Dessa vez, as bacias foram modificadas por camponeses, sem intervenção das equipes de pesquisa e, portanto, em condições mais próximas das variações que se observam normalmente no Nordeste.

■ Solos muito permeáveis ou muito impermeáveis:

Notamos, enfim, que para solos permeáveis como os Regossolos, os Latossolos ou os solos Podzólicos espessos, a degradação da cobertura vegetal não chegará a aumentar, de maneira muito forte, o escoamento, **com a condição expressa de que esta degradação não provoque a formação de uma crosta impermeável**. Do mesmo modo, a influência das variações da cobertura vegetal sobre o escoamento superficial de solos muito impermeáveis, como os Solonetz e os afloramentos, será relativamente fraca.

Esses dados mostram a forte influência que pode ter a cobertura vegetal sobre o escoamento. No entanto, é preciso sublinhar que, colocando-se de lado o caso de TAUÁ, essas variações correspondem a experimentações que implicam modificações extremas muito raras em superfícies maiores.

Em conclusão, ainda que se tenha mostrado que em SUMÉ a vegetação possa dividir por 3 ou multiplicar por 6 o escoamento médio, proporemos um intervalo mais reduzido para o fator corretivo multiplicativo (CV) de L_{600} pela vegetação.

■ Fator de correção CV proposto:

* Para as condições médias atuais do Sertão, CV vale 1.

* Para os solos, nem muito impermeáveis nem muito permeáveis, cujo coeficiente L_{600} está compreendido entre 20 e 50 mm, CV pode variar entre 0,5 e 2,0, de acordo com o estado da vegetação. Excluimos, voluntariamente, valores extremos que possam aparecer, embora sejam pouco prováveis para bacias de tamanho superior a 1 km^2. Para solos muito permeáveis (L_{600} < 20 mm), ou pouco permeáveis (L_{600} > 50 mm), as variações de CV devem ser mais fracas; proporemos, neste caso, uma faixa de variação máxima de 0,75 a 1,50.

Tabela 4.6.7 Fator de correção CV

Estado da cobertura vegetal	Extremamente bem conservada	Bem conservada	Ocupação normal	Muito degradada	Extremamente degradada
L_{600} compreendido entre 20 e 50 mm	0,5	0,75	1	1,5	2
L_{600} inferior a 20 ou superior a 50 mm	(0,75)	(0,9)	1	(1,25)	(1,5)

* Deve-se sobretudo considerar o grau de proteção do solo e de interceptação das precipitações asseguradas pela vegetação. Assim, uma pastagem em bom estado, isto é, na qual as plantas criam uma camada contínua e densa que protege totalmente o solo, pode ser colocada na classe de "*vegetação bem (ou extremamente bem) conservada*", visto que é equivalente, em termos de interceptação de precipitação, a uma caatinga nativa (CV = 0,5 ou 0,75). As zonas de solo nu, sem cobertura vegetal e com solo compacto, devem ser consideradas como "*extremamente degradadas*" (CV = 2).

4.6.5.2 Correção devida à presença de açudes na bacia hidrográfica (correção CA)

■ Densidade de açudes nas condições de referência

* Os valores de L_{600} propostos foram estabelecidos nas condições atuais para as 15 grandes bacias da rede geral utilizada. Nessas bacias podemos estimar que os açudes existentes controlam, em média, 30 a 50% das superfícies, com um volume total de armazenagem da ordem de 25 a 50% do volume natural médio escoado. Quando os volumes e as superfícies controladas pelos açudes situados dentro da bacia estudada estão próximos dos valores de referência que acabamos de indicar, não é necessário efetuar qualquer correção.

* Por outro lado, os açudes são muito raros nas zonas sedimentares.

■ Informações quantitativas existentes

* Estudos realizados pela SUDENE, UFCE e ORSTOM sobre a Bacia Hidrográfica Experimental de TAUÁ (CE), evidenciaram uma diminuição de mais de 50% da lâmina escoada entre as bacias hidrográficas elementares que não contêm nenhum açude e a bacia maior, de superfície de 180 km^2, que contém 30 açudes.

* DUBREUIL e GIRARD (1970) estimaram que, na bacia do Jaguaribe, o volume total dos açudes equivaleria a uma lâmina de 18 mm, isto é, perto de 40% do escoamento anual médio.

* Estes pesquisadores evidenciaram, igualmente, na bacia-teste do rio SITIÁ de 2.000 km^2 de superfície, uma diminuição de 32% do escoamento médio, provocada pela existência de numerosas represas. Esses açudes do rio SITIÁ têm uma capacidade total equivalente a uma lâmina de 37 mm, ou seja, 42% do escoamento anual médio[8]. Um simples cálculo mostra que essa diminuição de 32% corresponde a um coeficiente de correção CA de 1,47.

* MOLE (1991 b e c) constatou densidades de açudes superiores a 0,7 por km^2 na bacia do rio SACO. A superfície total dos espelhos de água atinge 5,5% da superfície daquela bacia.

■ Fator de correção (CA) proposto

* Como para a vegetação, definiremos um fator corretivo de açude CA que dependerá das características dos açudes existentes na bacia de alimentação.

* Este coeficiente vària, normalmente, entre 1 e 1,6, mas pode ser, excepcionalmente, inferior a 1, quando o número e o volume dos açudes situados a montante são extremamente elevados. Nesse caso, recomenda-se a realização de um estudo específico mais detalhado.

Tabela 4.6.8: Fator de correção (CA) proposto

Fórmula de correção: L_{600} corrigida = CA * L_{600}

Valores do coeficiente de correção CA para as zonas cristalinas

Densidade de açudes	Muito forte: superior a 0,5 aç/km^2* ou presença de um grande açude	Normal**	Nula
Coeficiente de Correção CA	< 1	1	1,6

* Necessidade de realizar um estudo específico.

** Volume total dos açudes da ordem de 40% do escoamento anual; densidade entre 0,25 e 0,5 açude por km^2; a superfície controlada pelos açudes varia entre 30% e 50% da superfície total.

Frisamos a necessidade de multiplicar por 1,6 as lâminas e os volumes escoados calculados para pequenas bacias, quando elas estão totalmente desprovidas de açudes.

[8] A lâmina escoada anual média no rio Sitiá é aproximadamente o dobro da do rio Jaguaribe.

4.6.5.3 Influência de zonas de retenção situadas no percurso da água (correção CL)

A água do escoamento superficial pode ser retida, em vários pontos críticos de seu percurso:

- Zona aluvial no sopé ou na parte mais baixa do relevo quando é espessa e permeável.
- Zona aluvial beirando os rios.
- Depressões
- Zonas kársticas.

A importância relativa das zonas planas e aluviais cresce, geralmente, com o tamanho da bacia. Todo o problema consiste em avaliar o volume efetivo do escoamento superficial que pode ser retido.

▪ A informação numérica disponível para estimar CL é muito pequena.

Entretanto, constatamos que:

* Nas zonas cristalinas, as lâminas escoadas dos pequenos açudes de TAUÁ, que são praticamente desprovidos de qualquer zona de retenção, são bem superiores às das sub-bacias do RIACHO DO NAVIO ou de SUMÉ, onde se observa ou zonas aluviais importantes ou solos permeáveis situados na parte inferior das vertentes (Regossolos de SALOBRO, na bacia do RIACHO DO NAVIO).

* Os escoamentos da bacia de JUATAMA são bem inferiores ao que se poderia esperar de zonas impermeáveis constituídas de afloramentos rochosos e de Solonetz. No entanto, encontram-se, na toposeqüência desta bacia, duas unidades de solos que são perfeitos exemplos de zonas de retenção (ver figura e parágrafo 3.4.2).

* Os escoamentos fracos das pequenas sub-bacias da bacia de IBIPEBA são devidos, primordialmente, à forte permeabilidade de seus solos, como também, a fenômenos Kársticos e/ou à presença de formações arenosas como as que se encontram a jusante da bacia de Lagedo de Baixo.

* São flagrantes as perdas e a diminuição do escoamento que acontecem nos leitos das bacias ou nas depressões, como as que estão situadas logo a montante da estação principal de Lagoa Grande. HERBAUD *et al* (1989a) propuseram uma estimativa dessas perdas.

Estes poucos exemplos mostram claramente que as zonas permeáveis, que retêm ou absorvem a água, têm um peso bem mais importante do que deixariam prever a ponderação das lâminas escoadas pelas superfícies, que efetuamos para estimar as L_{600} das UMP, quando elas estão situadas a jusante. *A permeabilidade crescente dos solos de montante para jusante ou a presença de zonas de solos muito permeáveis a jusante das vertentes, constitui um importante fator inibidor do escoamento superficial.*

Concluindo, proporemos uma faixa de variação de 0,8 a 1,2 para o fator de correção CL.

Tabela 4.6.9: Fator de correção CL.

IMPORTÂNCIA DO MECANISMO DE RETENÇÃO	Muito elevado	Elevado	Normal	Fraco ou nulo
Fator CL	0,8	0,9	1,0	1,2

4.6.5.4 Papel da superfície

A maior parte dos autores atribuem uma influência negativa da superfície da bacia sobre o escoamento: "*quanto maior for a bacia, menores serão as lâminas escoadas*".

Analisando o conjunto das bacias representativas estudadas, encontramos um coeficiente de correlação bastante fraco, porém negativo, r = - 0,35, entre as L_{600} e a superfície, com a seguinte equação de regressão:

$$L_{600} = -0,15 * SUP + 68,4$$

Vários fatores podem explicar esta diminuição:

1) Quanto maior for a bacia, maior se torna a importância relativa das zonas aluviais que são geralmente permeáveis e produzem pouco escoamento.
2) As zonas de retenção, definidas anteriormente, são, estatisticamente, mais importantes e mais numerosas nas bacias maiores.
3) Fenômenos endoréicos ou de karst (ou carste) são mais freqüentes nas grandes bacias.

Consideremos, agora, especificamente, a aplicação do método de transposição que propomos para o Nordeste. Constatamos que:

- Os fatores indicados nos pontos 1 e 2 supracitados já foram considerados, seja no cálculo dos coeficientes L_{600} das UMP e dos TS, seja pelo fator de correção CL.

- Na zona semi-árida sobre embasamento cristalino, não se encontram, praticamente, zonas endoréicas ou fenômenos de degradação hidrográfica, em bacias do tamanho que nos interessa. Isto se explica, como já vimos, por uma orogênese ativa desta parte do continente sul-americano, que assegura uma declividade mínima aos rios.

Conseqüentemente, não proporemos a aplicação sistemática de nenhum fator de correção para os escoamentos anuais médios , em função da superfície da bacia. No entanto, é evidente que, quando se constata, no campo, fenômenos endoréicos ou de karst será preciso, nesse caso, introduzir uma correção específica.

4.6.6 Validação

Esforçamo-nos para diminuir, na medida do possível, a parte arbitrária no emprego do método de transposição que propomos. Agora é preciso validá-lo.

4.6.6.1 Validação com a ajuda dos resultados obtidos nas bacias representativas

Não utilizamos os valores dos escoamentos medidos nas bacias hidrográficas representativas para calcular os coeficientes L_{600} dos diferentes tipos de solo que propusemos. Podemos, portanto, utilizar essas bacias representativas para validar, a posteriori, nosso método.

Procedemos da seguinte maneira:

a) Cálculo das L600 a partir dos TS e das características físicas das bacias hidrográficas representativas:

- Seleção das bacias e sub-bacias para as quais se dispõe de uma informação quantitativa relativa aos seus tipos de solo (TS) (essa informação encontra-se no capítulo 3).
- Cálculo da percentagem da bacia coberta por cada TS e estimativa de sua L_{600}, com a ajuda do quadro 4.6.5 ou do quadro A do anexo 1.
- Cálculo da L_{600} bruta média de cada sub-bacia.
- Determinação dos fatores corretivos CA, CV e CL, obedecendo-se às regras indicadas no parágrafo 4.6.5 e/ou no anexo 1.
- Cálculo final: obtenção da L_{600} calculada.

Aplicar a fórmula: $L_{calculada} = L_{bruta} \times CA \times CV \times CL$

As etapas deste cálculo estão resumidas na tabela 4.6.10.

Tabela 4.6.10: Elementos do cálculo de L_{600} das diferentes sub-bacias

Bacia de TAUA

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol-->R+Af L_{600}-->50 (%)	SS 120 (%)	NC 37 (%)	V 25 (%)	PL 70 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
MNO	67,60	10	20	20		50	71,4	1,2	1	0,9	77,1
MOQ	82,36	10	5	70	15		40,6	1,6	1	1,2	78,0
JOF	66,85	10	5	70	15		40,6	1,6	1	1,2	78,0
CAL	82,52	10	10	70	10		45,4	1,6	1	1,2	87,2
LUZ	170,10			80	20		34,6	1,6	2	1,2	132,9
M1T	89,89			100			37	1,6	1,4	1,2	99,5
M2T	79,38			100			37	1,6	1,4	1,2	99,5
M3T	95,50			100			37	1,6	1	1,2	71,0
M4T	32,98				100		25	1,6	1	1,2	48,0

Bacia de SUME

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol-->Af L_{600}-->90 (%)	PE 15 (%)	NC+NCV 32 (%)	Re 37 (%)	AL 25 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
GA2	31,43	1	15	73	7	4	30,1	1,3	1	0,9	35,2
JA2	36,95	6	74	19		1	22,8	1,4	1	1	32,0
UM1	28,01	0		74	19	7	32,4	1,5	0,8	0,8	31,2
UM2	43,47	0		74	19	7	32,4	1,5	0,8	0,8	31,2
MS1	6,73			100			32	1,6	0,5	1,2	30,7
MS2	12,75			100			32	1,6	0,5	1,2	30,7
S31	66,05			100			32	1,6	1,2	1,2	73,7
S32	114,16			100			32	1,6	1,5	1,2	92,2
S33	195,08			100			32	1,6	2	1,2	122,9
S41	66,02			100			32	1,6	1,2	1,2	73,7
S42	79,84			100			32	1,6	1,5	1,2	92,2
S43	162,91			100			32	1,6	2	1,2	122,9

Bacia do RIACHO DO NAVIO

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol --> L_{600}	R+Af --> 50 %	R+NC 37 %	PL 70 %	RE 3 %	NC+REraso 37 %	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
ROS	30,66		38	17		39	6	29,46	1,6	0,9	1	42,4
SAL	47,20		55			38	7	31,99	1,6	0,9	1,1	50,7

Bacia de JUATAMA

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol --> L_{600}	R+Af --> 60 (%)	PE 25 (%)	SS 120 (%)	PL 70 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
JU1	67,77		45	22	21	12	66,1	1,2	1	0,8	63,5
JU2	48,62		45	22	21	12	66,1	1,1	1	0,8	58,2

Bacia de IBIPEBA

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol--> L_{600}	C1 --> 15 (%)	C2 5 (%)	L 5 (%)	R 37 (%)	AQ 0 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
RLG	1,31		27	21	32	17	3	12,99	0,6	1	0,8	6,2
LBA	18,43					100		37	1	1	0,8	29,6
FZI	7,96		69		31			11,9	1	1	0,8	9,5
FZP	13,94		86		14			13,6	1	1	0,8	10,9
LGC	0		23	44	33			7,3	1	1	0,8	5,8

Bacias do G.E.V.J.

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol--> L_{600}	L --> 5 (%)	R+PV+V 20 (%)	PVA+AQ 8 (%)	PV+L 15 (%)	Al 100 (%)	Urb 120 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
RBP	39,02		12	13	18	23	30	4	42,89	1	1	1	42,9
RMV	13,99		22	17	12	39	10	0	21,31	1	1	1	21,3

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol --> L_{600}	Re+NC --> 37 (%)	Rd+Af 37 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
QUI	41,19		43	57	37	1,3	1	0,9	43,3

Acudes dos Projetos pilotos

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol-->PE L_{600}-->15 (%)	Re 37 (%)	Al 25 (%)	Af 90 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
MAN	30,1	47	44	7	2	26,88	1,4	1	0,8	30,1

Bacia	L_{600} obs (mm)	Sol-->Re+Af L_{600}--> 50 (%)	PE erodido 37 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
JER	153,42	95	5	49,25	1,6	1	1,2	94,6

Bacia	L_{600} obs calc.	Sol-->PVE L_{600}--> 20 (%)	PV erodido 30 (%)	PVmuito erodido 37 (%)	L_{600} bruto (mm)	Fatores corretivos CA	CV	CL	L_{600} calc. (mm)
PCO	31,19	33	33	33	28,71	1,6	0,8	1	36,7

Legenda:

Af	Afloramento de rocha	PL	Planossolo
Al	Aluviões	PE,PV,PVA,PVE	Podzólico
AQ	Areia quartzosa	RE	Regossolo
C1,C2	Cambissolo	R,Rd,Re	Litólico
L	Latossolo	SS	Solonetz
NC	Bruno não Cálcico	Urb	Zona urbanizada
NCV	Bruno não Cálcico Vértico	V	Vertissolo

b) Cálculo das L_{600} das bacias, utilizando diretamente os valores das L_{600} determinadas para cada UMP dos mapas da EMBRAPA (a partir quadro B do anexo 1).

Como mostra a figura 4.6.6, calculamos as L_{600} das diferentes bacias representativas, utilizando os valores propostos para as diferentes Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP) que recobrem essas bacias, de acordo com os mapas da EMBRAPA. Levando-se em consideração a precisão e a escala desses mapas calculamos uma L_{600} média que permanecerá constante para todas as sub-bacias de uma mesma bacia representativa.

Essas L_{600} médias são, em seguida, corrigidas pelos coeficientes corretivos CV, CA e CL próprios de cada sub-bacia.

c) Comparação entre as L_{600} calculadas e as observadas.

O quadro 4.6.11 e a figura 4.6.7 permitem comparar as L_{600} calculadas às L_{600} obtidas a partir das observações hidrométricas efetuadas em cada bacia, as quais denominamos L_{600} observadas.

O coeficiente de correlação entre L_{600} observadas e calculadas com os TS, é de 0,93. Isto significa que o método de cálculo proposto explica 87% da variância do escoamento. A equação da reta de regressão é $\mathbf{L_{600}\ obs = 1,32\ L_{600}\ calc - 16,0}$.[9]

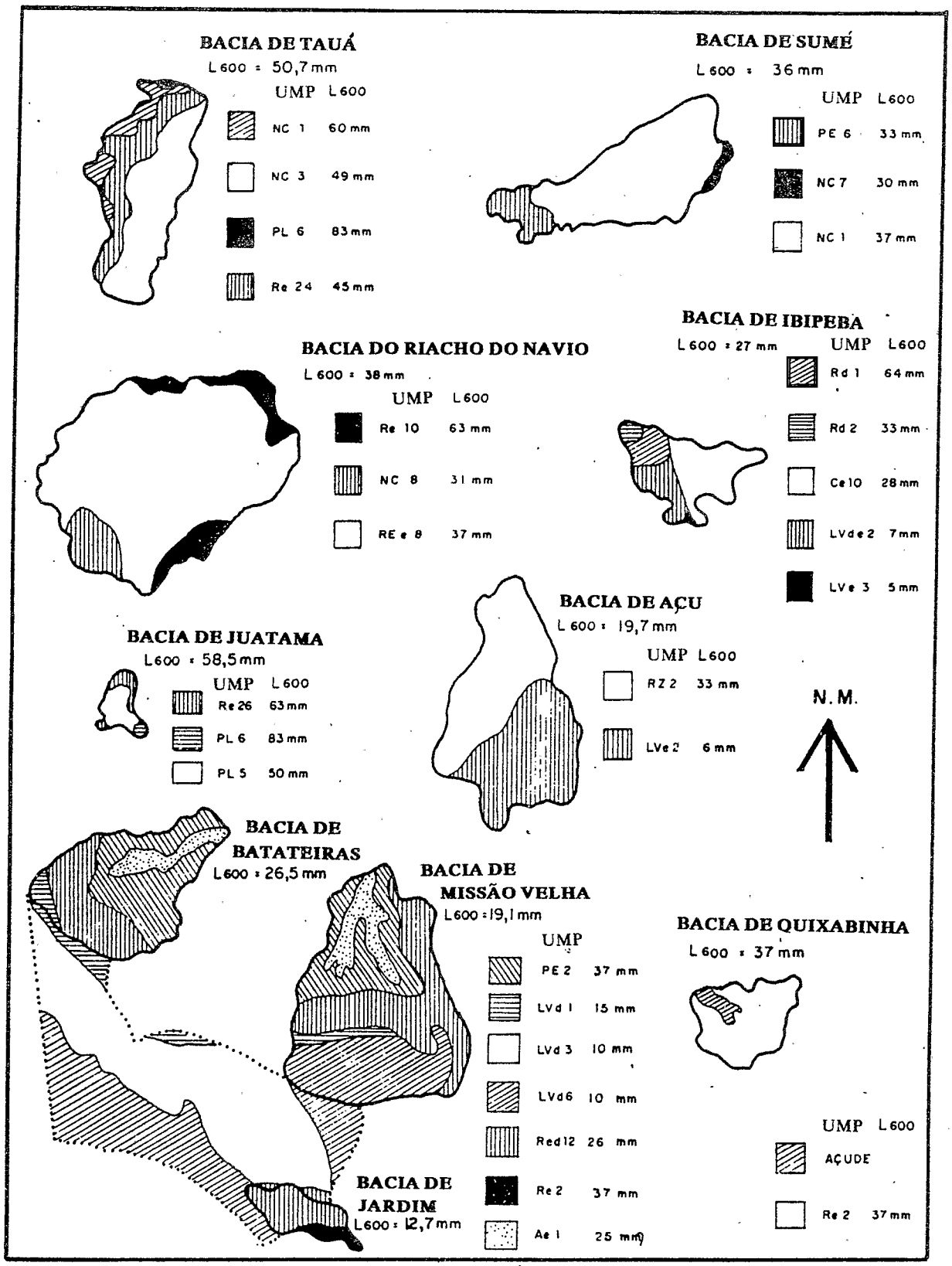
O mesmo cálculo efetuado com o método da EMBRAPA fornece os seguintes resultados:
O coeficiente de correlação entre L_{600} observadas e calculadas é de 0,79. Isto significa que o método de cálculo proposto explica 62% da variância do escoamento. A equação da reta de regressão é $\mathbf{L_{600}\ obs = 1,02\ L_{600}\ calc - 6,25}$.

Tabela 4.6.11: Validação do método: comparação entre as lâminas calculadas e as observadas.

Bacia	L_{600} observada	L_{600} calculada com o método (TS)	L_{600} calculada através dos mapas da EMBRAPA	Bacia	L_{600} observada	L_{600} calculada com o método (TS)	L_{600} calculada através dos mapas da EMBRAPA
MNO	68	77	51	S41	66	74	36
MOQ	82	78	51	S42	80	92	36
JOF	67	78	51	S43	163	123	36
CAL	83	87	51	ROS	31	42	38
LUZ	170	133	51	SAL	47	51	38
M1T	90	99	51	JU1	68	63	58.5
M2T	79	99	51	JU2	68	63	58.5
M3T	96	71	51	RLG	1,3	6,2	27
M4T	33	48	51	LBA	18	30	27
GA2	31	35	36	FZI	8	9,5	27
JA2	37	32	36	FZP	14	11	27
UM1	28	31	36	LGC	0	5,8	27
UM2	43	31	36	RBP	39	43	27
MS1	7	31	36	RMV	14	21	19
MS2	13	31	36	QUI	41	43	37
S31	66	74	36	MAN	30	30	37
S32	114	92	36	JER	153	95	37
S33	195	123	36	PCO	31	37	25

[9] Se tivéssemos aplicado um coeficiente corretivo CV mais elevado para as bacias S33, S43, LUZ e JER (o que seria justificado, como já vimos, pois o limite superior de 2,0 imposto a CV é antes de tudo um reflexo de prudência visando impedir correções exageradas), o coeficiente de 1,32 baixaria de maneira significativa.

Figura 4.6.6: Cálculo das lâminas escoadas das diferentes sub-bacias com as UMP dos mapas da EMBRAPA.



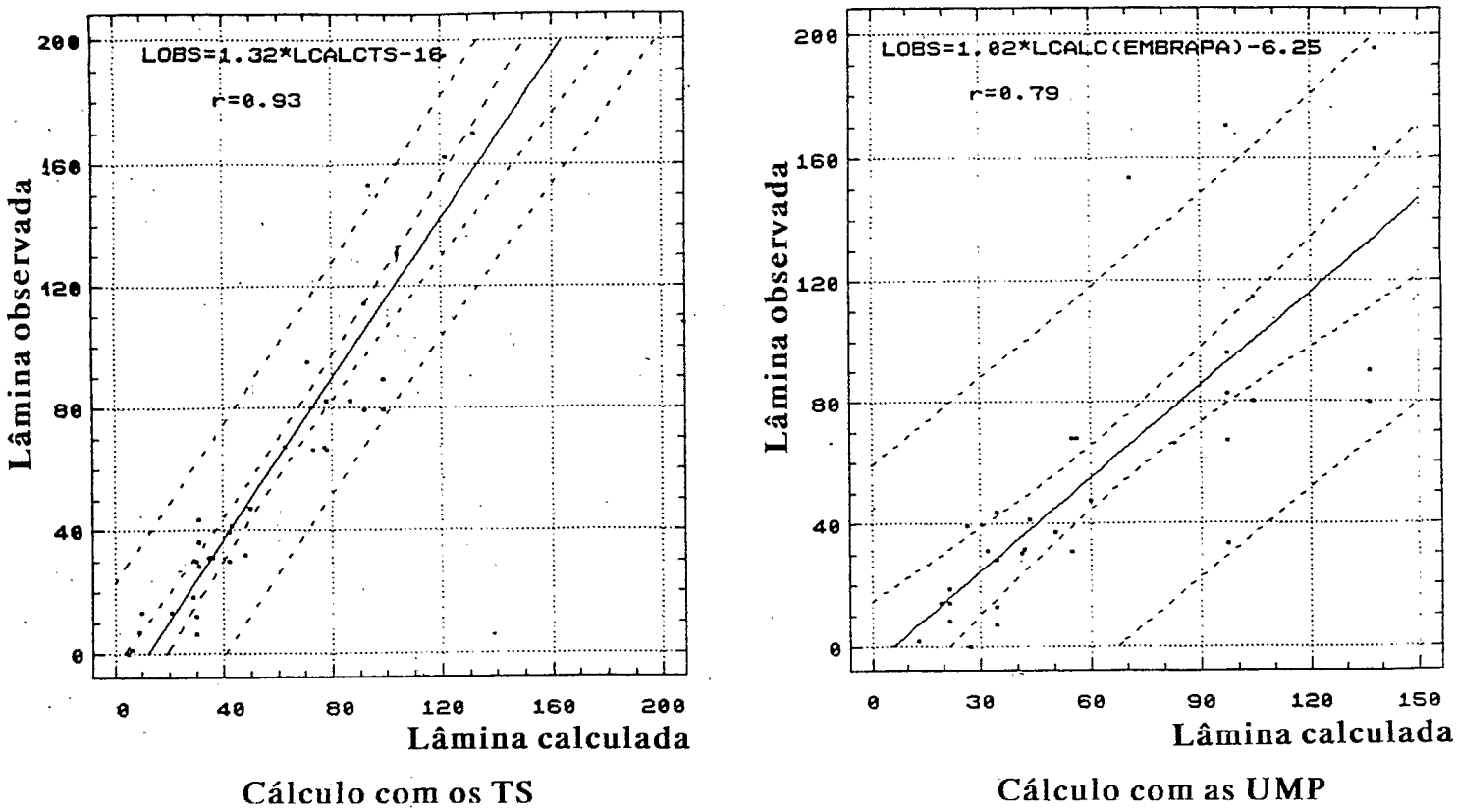


Figura 4.6.7: Validação do método : comparação entre as lâminas calculadas e as observadas

4.6.6.2 Comparação da fórmula SUDENE/ORSTOM com a fórmula de AGUIAR

Comparemos, agora, as fórmula que propomos às que F.C.AGUIAR (1940) estabeleceu e que são muito utilizadas no Nordeste para as grandes e pequenas bacias.

F. C. AGUIAR propôs para o cálculo das lâminas escoadas a fórmula seguinte:

$$L(P) \text{ ou } L(H) = U(28{,}53\,H - 112{,}95\,H^2 + 351{,}91\,H^3 - 118{,}74\,H^4)$$

onde H é a altura da chuva anual média expressa em metros e U um coeficiente de correção definido pelo quadro a seguir:

Tabela 4.6.12: Coeficiente de correção U da fórmula de AGUIAR

Tipo	Bacia Hidrográfica	U
1	Pequena íngreme e rochosa	1,3 a 1,4
2	Bem acidentada sem depressões evaporativas	1,2
3	Média	1,0
4	Ligeiramente acidentada	0,8
5	Idem, com depressões evaporativas	0,7
6	Quase plana, terreno argiloso	0,65
7	Idem, terreno variável	0,6
9	Idem, terreno arenoso	0,5

Podemos calcular os valores de L(P), por diversos métodos conforme discriminado na Tabela 4.6.13, ressaltando que para a fórmula de AGUIAR foi usado o valor U = 1 correspondente a uma bacia média padrão.

Tabela 4.6.13 : Comparação do cálculo do escoamento anual médio por diversas fórmulas.

P anual médio (mm)	500	600	700	800	900	1000
Fórmula de AGUIAR: L(p) AGUIAR (com U = 1)	23	37	57	82	113	149
Fórmula SUDENE/ORSTOM (*) (com L_{600} = 37)	26,7	37	51,4	72	100	139
Fórmula SUDENE/ORSTOM (*) (com L_{600} = 42,7)	30,7	42,7	59	83	115	159
Ábaco do GEVJ Zonas cristalinas		62	79	110	160	270
Ábaco do GEVJ Zonas sedimentares			28	60	85	140

(*) $L(P) = L_{600} \cdot e^{0,0033(P-600)}$

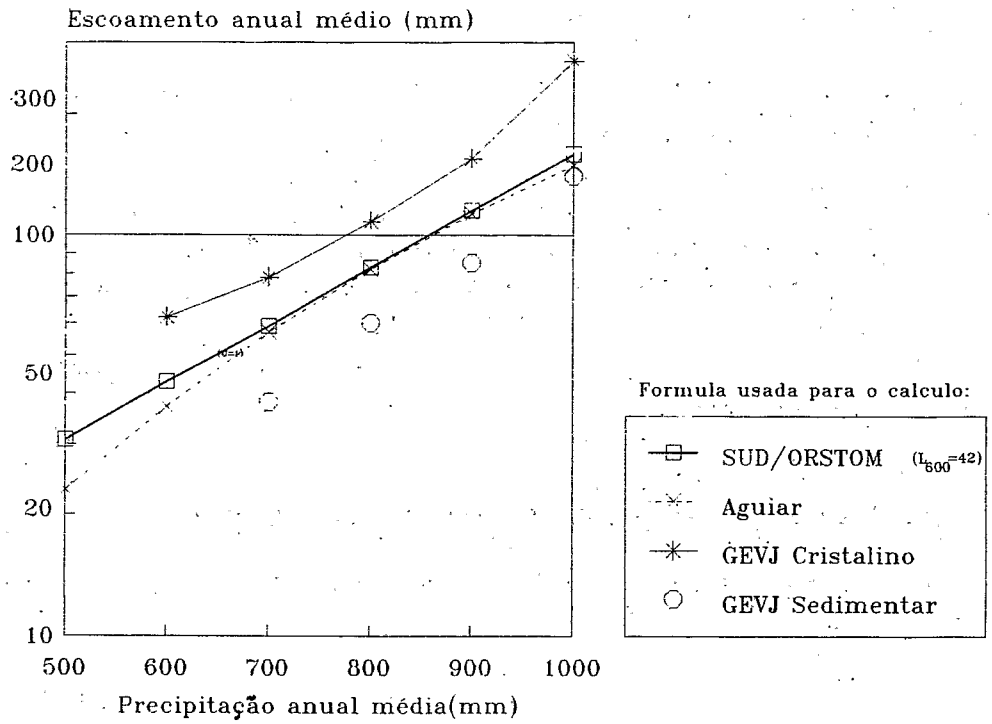


Figura 4.6.8: Comparação da fórmula SUDENE/ORSTOM com a fórmula de AGUIAR

Comparamos estas duas fórmulas (SUDENE/ORSTOM e AGUIAR) com os ábacos propostos para as bacias cristalinas e sedimentares pelo GEVJ (DUBREUIL, 1968).

Constatamos que:

1) O valor médio de L_{600}, proposto por AGUIAR para as pequenas bacias do tipo "médio" (U = 1), que é de 37 mm, corresponde exatamente ao valor de L_{600} do grupo de solo 3 da classificação SUDENE/ORSTOM. Este grupo 3 corresponde à classe de solo mais freqüente no cristalino.

2) As diferenças entre as duas fórmulas (AGUIAR e SUDENE/ORSTOM), quando a pluviometria varia entre 500 e 1.000 mm, não são muito grandes. Essas diferenças são ainda mais fracas se se considera, para L_{600}, o valor médio calculado sobre todas as 15 bacias estudadas da rede geral, que é de 42,7 mm.

3) As faixas de variação do coeficiente U de AGUIAR são bem mais estreitas que as da L_{600} da SUDENE. Isto significa que a fórmula de AGUIAR atenuará os escoamentos das bacias muito impermeáveis ou aumentará os escoamentos das bacias que escoam menos. Isto é normal visto

que, nas grandes bacias, para as quais foi concebida a fórmula de AGUIAR, as irregularidades se compensam muitas vezes entre si.

4) As fórmulas do GEVJ parecem compatíveis com os nossos resultados.

Para concluir, podemos dizer que as três fórmulas (AGUIAR, GEVJ e SUDENE/ORSTOM) fornecerão resultados **globalmente compatíveis**. No entanto, a fórmula da SUDENE/ORSTOM está mais adaptada ao caso específico das pequenas bacias, onde as variações dos comportamentos são maiores. Além disso, a fórmula SUDENE/ORSTOM pode, também, ser utilizada para grandes bacias, com a condição de que a pluviometria não ultrapasse 1.000 mm/ano.
A fórmula SUDENE/ORSTOM utiliza **Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP)** e/ou **Tipos de Solo (TS)**, que são critérios mais objetivos e mais fáceis de empregar por não-especialistas. Além do mais, o método SUDENE/ORSTOM permite o cálculo das lâminas anuais e de secas plurianuais (anos secos consecutivos) de diversas freqüências.

4.6.7 Conclusões sobre a utilização dos dados da rede geral

A primeira conclusão é **que o número de bacias da rede geral utilizadas para os cálculos de otimização é realmente insuficiente**.

Uma vez conscientes deste fato, estabelecemos, graças à informação fornecida pela rede geral, as bases do método de transposição procurado. Com efeito, tivemos êxito ao determinar, de maneira bastante segura, as médias regionais[10] das L_{600} de um certo número de grupos de solos. É o caso dos solos do **grupo 3**, isto é, a maior parte dos solos que produzem escoamentos suficientes para encher as barragens. Para estes solos, a L_{600} média é de 37 mm.

A incerteza das L_{600} das zonas que possuem **afloramentos rochosos** é muito mais elevada. Isso diminuirá, infelizmente, a precisão dos cálculos de dimensionamento nas regiões montanhosas e acidentadas que são zonas de predileção para a construção de açudes.

Os valores elevados propostos para os **Solonetz**, ou aqueles, mais fracos, propostos para os **Vertissolos**, parecem, também, regionalmente comprovados.

Os valores dos outros sub-grupos representam apenas, simples ordens de grandeza, que têm por base tanto nossa experiência como o resultado dos cálculos de otimização.

Enfim, verificamos que o método que propomos não apresenta incoerência ou incompatibilidade grave com os métodos hidrológicos utilizados e admitidos hoje no Nordeste, como o método de AGUIAR ou do GEVJ. Nosso método apresenta a vantagem de permitir uma estimativa mais apurada e objetiva dos escoamentos das pequenas bacias, para as quais ele foi especificamente concebido.

[10] Os valores de L_{600} propostos representam, repitamó-lo, uma média regional de cada subgrupo de solo. Eles constituem a estimativa que recomendamos, quando não existe outra informação. As L_{600} reais das pequenas bacias podem ser diferentes desses valores regionais; os fatores corretivos foram introduzidos para atenuar uma parte dessas diferenças.

QUINTA PARTE

TRANSPOSIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CHEIAS

QUINTA PARTE

5. TRANSPOSIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CHEIAS

A água, fonte de bem-estar, pode, também, provocar devastação, quando não se sabe controlar seus efeitos destruidores.

AS CHEIAS



5.1 COMPILAÇÃO BIBLIOGRÁFICA CORRESPONDENTE ÀS CHEIAS

■ Aspectos teóricos

Foi SHERMAN (1932), o primeiro a formular a teoria do hidrograma unitário, sendo seguido por numerosos autores que comunicaram suas experiências e/ou descobertas sobre as relações entre volumes, formas e coeficientes de escoamento das cheias, tentando conceber ou adaptar diversas teorias sobre sua gênese e sua propagação. Vários autores se esforçaram, algumas vezes de maneira polêmica, para aperfeiçoar a **formulação teórica desse fenômeno.**
Após SHERMAN já citado, HORTON (1933) propôs uma equação simples de divisão entre a parte das precipitações que se infiltra e a que escoa. M. ROCHE (1963, 1967 e 1972) trouxe várias contribuições à formulação matemática desse fenômeno. Mais recentemente IBIZA (1984-85) e MOREL-SEYTOUX (1973 a e b, 1974 e 75) apresentaram novas formulações teóricas da infiltração.
A abordagem hortoniana começou a ser reconsiderada por HEWLET e HIBERT (1967), DUNNE (1978) e MEROT (1988) que introduziram a noção de superfície de **contribuição variável**, mais adaptada aos mecanismos hidrológicos dominantes nas zonas úmidas. FRITSCH (1990) efetuou uma excelente análise histórica do antagonismo e da complementariedade dessas diferentes teorias.

■ As precipitações

Vários autores aprofundaram-se na **análise das precipitações** que provocam fortes cheias.

ROCHE (1963) fixou as bases matemáticas do problema de redução das chuvas. VUILLAUME (1974) efetuou um estudo geral de **redução das precipitações** na África tropical, propondo fórmulas de cálculo do coeficiente de redução em função do tamanho da bacia, do período de retorno da chuva e da zona pluviométrica. Um estudo análogo, porém, mais limitado, foi realizado no Nordeste brasileiro, por NOUVELOT *et al* (1979). Para as bacias situadas na França, MICHEL (1990) aborda esse problema introduzindo o conceito de "coeficiente de epicentragem".

"CHEVALLIER e LAPETITE (1986) evidenciaram as enormes diferenças existentes, no Sahel Africano, entre as quantidades de chuva recolhidas em pluviômetros situados a mais de um metro do solo, do tipo "*Association*", e **pluviômetros situados no solo**, equipados com dispositivos de proteção para atenuar os efeitos da turbulência suscetível de modificar o volume da chuva captada. Esta diferença pode atingir 60% e varia, de um aguaceiro para outro, num mesmo lugar. Não é de nosso conhecimento qualquer estudo semelhante realizado para testar os pluviômetros do tipo "*Ville de Paris*", nas condições aerológicas do Nordeste.

BRUNET-MORET (CIEH, 1985) executou um estudo sintético das precipitações em 24h para toda a África ocidental e central, documento de base indispensável aos estudos de cheias. Tivemos que realizar um trabalho análogo no NORDESTE (CADIER *et al*, 1981).

CHEVALLIER (1983) e depois SEGUIS (1986, 87) esforçaram-se para avaliar a influência do índice das precipitações anteriores (IPA), análogo ao índice IK que utilizamos. CHEVALLIER recomenda, para pequenas parcelas, um coeficiente K de 0,5 em sua fórmula do tipo

$IPA(d) = (IPA(d-1) + P(d-1)e^{-K}$. Este coeficiente K de 0,5 corresponderia a um coeficiente CI de 0,60 no modelo SUDENE/ORSTOM que utiliza uma formulação ligeiramente diferente. É normal que o coeficiente proposto por CHEVALLIER para pequenas parcelas, nas quais a água só pode ser estocada no perfil pedológico e onde os "efeitos de superfície" predominam, seja inferior ao que utilizamos e cujo valor deve integrar as outras possibilidades de estocagem hídrica existentes em bacias maiores, pequenas poças d'água, charcos, aquíferos de todo tamanho, etc. Por outro lado, SEGUIS considera que um coeficiente CI de 0,9 se adapta melhor às bacias que tenham "reações sazonais". SEGUIS recomenda ainda, na Bacia de BOULSA, utilizar o somatório de dois índices calculados com valores de CI totalmente diferentes.

LAFFORGUE e CASENAVE (1980) publicaram os primeiros resultados relativos às medições sob chuvas simuladas, pesquisas que conduziram à realização, dez anos mais tarde, de um trabalho de referência, chamado **Catálogo dos estados de superfície dos solos** (CASENAVE e VALENTIN, 1989).

■ Resultados obtidos na África tropical: a obra de J. RODIER

É preciso reservar um lugar especial nessa revista bibliográfica para J. RODIER que desde 1960 promove e realiza, ou participa, das principais publicações que se referem aos estudos das cheias e dos escoamentos das pequenas bacias das zonas tropicais africanas, dos quais ele foi muitas vezes o criador e o incentivador. Devemos, primeiramente, assinalar o conhecido estudo efetuado por **RODIER e AUVRAY (1965)** que fornece **um método de avaliação das descargas da cheia decenal** das pequenas bacias e que nos serviu de referência, esse trabalho só foi completado 20 anos depois por PUECH e CHABI-N'GOUI (1984), e por HASNAOUI (1985).

Após ter publicado, em 1967, um inventário de cheias de fraca freqüência, observadas no mundo, J. RODIER aborda, em 1982, os problemas que se referem à transposição dos resultados. RODIER, (1984-85), avalia as características das cheias das bacias das zonas saelianas e sintetiza, em 1989, os conhecimentos sobre as bacias permeáveis que apresentam numerosas analogias com os comportamentos hidrológicos do Nordeste.
Enfim, RIBSTEIN e RODIER (1989), RIBSTEIN (1990) e RIBSTEIN *in* BERTON (1988) efetuaram uma análise da forma e da modelização das cheias das pequenas bacias de menos de 10 km^2, no Sahel, trabalho que, na realidade, representa a síntese dos resultados de várias décadas de pesquisa de uma numerosa equipe. A síntese relativa às cheias das bacias de superfície entre 10 e 2.500 km^2 foi concluída ultimamente.

■ Resultados e sínteses na França

Várias outras equipes abordaram, igualmente, na França, o problema do estudo das cheias. Citemos, primeiramente, o recente e excelente trabalho do CEMAGREF (MICHEL, 1990), que apresenta um método prático, utilizável em toda a França. Simplifica os conceitos usuais, fornecendo resultados de maneira prática. A fórmula da cheia bienal $Qx = K * S^{0,8}$, proposta pelo autor, é semelhante àquela que propomos para o Nordeste.

OBERLIN (1980), SAKOUT e GUILBOT (1988) e MALLEMI-POUR e MICHEL (1989) propõem vários métodos de estimativa regional das descargas máximas e DUBREUIL (DHI, 1974) publica uma síntese dos resultados obtidos nas bacias representativas francesas.

■ Outros resultados

Enfim, citamos vários trabalhos mais específicos, que apresentam, por exemplo, valores relativos a uma só bacia ou a pequenas zonas. Servir-nos-ão de referência ou de limite quando tentarmos extrapolar nossas fórmulas:

- MOLINIER (1980) assinala coeficientes de escoamento de cheia de aproximadamente 100 % na bacia do Comba, no CONGO.
- ALBERGEL (1987) propõe para uma parcela de solo nu recoberta de uma película (bacia de Gagara), uma equação de lâmina escoada Lr = 0,96 * P - 2,6 mm que conduz, igualmente, a coeficientes de escoamento próximos de 100%. Este autor evidencia, também, um aumento, nos últimos anos, do escoamento no Sahel devido à degradação da vegetação propícia à aparição de efeitos chamados de "superfície".
- THEBE e PONTANIER (1989) efetuam, numa bacia do Norte dos CAMARÕES, uma tentativa de correção dos resultados, em função do tamanho da bacia.
- Enfim, mencionamos a excelente e apurada análise dos mecanismos hidrológicos da bacia da savana tropical de BORO-BOROTOU, efetuada por CHEVALLIER (1988) e, no Nordeste, o estudo dos mecanismos e transportes de água e de matéria, efetuado por MOLINIER *et al* (1989 a e b) na bacia experimental de SUMÉ, que mostram toda a complexidade dos mecanismos hidrológicos, propondo, também, algumas equações práticas.

■ Métodos de cálculo de cheias utilizados no Nordeste brasileiro

São raros os **estudos hidrológicos específicos do Nordeste** que permitem o cálculo das cheias de pequenas bacias. Os hidrólogos utilizam, para esse fim, o método proposto por AGUIAR (1940), algumas vezes, fora de seu domínio de especificidade, sobretudo quando se trata das pequenas bacias. Voltam-se, geralmente, a fim de confirmar seus cálculos, para métodos de origem americana, tal como o método racional Q = C.I.A.[1] ou, algumas vezes, para as equações propostas por BENSON (1960), CRAGER, FANNING, SCIMENI, ISZANSKI, TETTIS, FULLER ou HORTON.

Citamos, enfim, o estudo comparativo de modelos de previsão de cheia elaborado por ALVES J.A.S. (1988).

A realização de um estudo específico das características das cheias das pequenas bacias hidrográficas do Nordeste parece urgente e preencherá uma lacuna evidente nos conhecimentos dos recursos hídricos regionais.

[1] Que supõe o pico de cheia proporcional à intensidade I da chuva e à superfície A da bacia.

5.2 MÉTODO, OBJETIVO E ESTRATÉGIA

O método e os modelos empregados para o cálculo das lâminas anuais de diversas frequências não são utilizáveis para a determinação dos parâmetros das cheias. O intervalo diário do modelo de simulação SUDENE/ORSTOM não permite reconstituir, corretamente, as variações rápidas das descargas das cheias. O método que empregamos posteriormente (no capítulo 4.6), para quantificar as lâminas anuais, utilizando as bacias da rede geral parece ainda mais inadequado.

É necessário, portanto, imaginar um método específico que deverá explorar, ao máximo, os resultados obtidos nas pequenas bacias hidrográficas representativas do Nordeste brasileiro. Os dados coletados nessas bacias constitui, a essência da informação disponível a respeito das cheias dos pequenos rios dessa região.

Os resultados que forneceremos deverão ser diretamente utilizados para a elaboração do "*Manual do pequeno açude*". Não se pode propor um método que não trate de todos os casos possíveis. O usuário do manual sentir-se-ia frustrado e construiria sua barragem de qualqer maneira utilizando um outro método de dimensionamento ou mesmo não utilizando nenhum, como acontece freqüentemente! É para apresentar soluções para esse tipo de problema que usamos, por falta de outra alternativa, certos procedimentos empíricos e, algumas vezes, não válidos para o Nordeste. Referimo-nos, por exemplo, às fórmulas relativas às bacias de menos de 5 km^2, àquelas propostas para as zonas sedimentares ou aos fatores corretivos de cheias.

■ Objetivo: Quais são os parâmetros que devem ser escolhidos?

Aos usuários interessam, em primeiro lugar, duas características das cheias:

- A vazão de pico da cheia (Qx).
- A lâminas (Le) ou o volume (Ve) escoado.

Para isso, tentaremos avaliar as duas características seguintes das cheias :

- A lâmina escoada (Le).
- O coeficiente (Kx) que vamos definir.

Estas duas características permitem, como veremos, estimar, de maneira simples[2], o pico e o volume das cheias.

[2] A precisão que esperamos atingir será, certamente, limitada. Nossos resultados deverão ser considerados como um esboço do estudo completo que deveria ser realizado.

■ O Coeficiente Kx

A descarga Qx e o volume Ve não são independentes; estão ligados pela função de repartição, no tempo, das descargas da cheia. Esta função depende do tempo durante o qual o volume da cheia escoa e da lei de distribuição das descargas em função desse tempo.

Representamos essa função por um coeficiente global chamado Kx definido, para uma determinada cheia, como sendo **a descarga de pico de cheia que corresponde a uma lâmina escoada de 1 mm.** Kx se exprime em $m^3/s/mm$.

Por sua definição, este coeficiente Kx permite unir Qx a Le pela fórmula[3]: $\mathbf{Qx_{(m^3/s)} = Kx * Le_{(mm)}}$.

Esta fórmula, muito simples, constitui uma das bases de nosso método. Ela pode, ainda, ser escrita:

$$\mathbf{Qx(m^3/s) = Kx * Ve(m^3) / (1000 * S(km^2))}$$

Este coeficiente Kx tem as dimensões de uma superfície dividida por um tempo e está ligado ao tempo característico H definido por IBIZA (1987) pela fórmula Kx = 1.000 * S/H.

Kx pode ainda ser calculado por $Kx = S * \alpha / (3{,}6 * Tb)$, ou ainda, $Kx = 1.000 * S * Qx/Ve$, onde:

- S a superfície da bacia, em km2
- Qx o pico de cheia, em m3/s
- α o coeficiente de forma da cheia, definido por (α = Qx/Qm), sendo Qm a descarga escoada média do hidrograma durante o tempo de base Tb, expresso em horas.

Essa última fórmula mostra que Kx pode ser calculado, unicamente, a partir de Qx e de Ve, ou seja, sem utilizar o tempo de base Tb e o coeficiente α cuja determinação é delicada e subjetiva. Isto é muito importante, pois mostra que Kx é uma das maneiras mais simples de expressar o tempo de escoamento das cheias, só exigindo um número mínimo de hipóteses sobre sua forma: o volume e a vazão de pico de cheia. Assim mesmo, é preciso delimitar o início e o fim da cheia depois subtrair, eventualmente, a descarga de base, para calcular esse volume. Essas são as únicas operações do processo que requerem algum tipo de interpretação e que são, portanto, um pouco arbitrárias. Além disso, Kx está ligado diretamente às duas características das cheias que interessam aos usuários, o que é uma razão a mais para a sua escolha.

■ A superfície da bacia, principal fator explicativo das descargas de cheia

A superfície da bacia é, provavelmente, o principal fator explicativo dos tempos característicos das cheias e, portanto, dos coeficientes Kx.

A fim de obter a fórmula final mais simples possível, procuraremos expressar as variações dos outros parâmetros das cheias e, em particular, as das lâminas escoadas em função da superfície. A superfície da bacia terá, assim, o papel de denominador comum entre os diversos fenômenos de naturezas física, hidráulica ou geomorfológica que regem a gênese das cheias.

[3] Nesta fase, não fizemos nenhuma hipótese sobre a forma da cheia. Esta fórmula se aplica, portanto, a cheias que apresentam qualquer tipo de forma, unitária ou não-unitária.

5.3 INFORMAÇÃO DISPONÍVEL

5.3.1 Resumo das características das cheias das pequenas bacias do Nordeste:

Apresentamos na tabela 5.1, as principais características das cheias observadas em 19 pequenas bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro. Essa amostra é composta de 17 das 42 bacias utilizadas para o estudo dos escoamentos anuais[4] e de mais duas suplementares, utilizando os parâmetros das cheias contidas nos relatórios publicados pelo G.E.V.J: a bacia do rio GRANJEIRO e a de BATATEIRAS, no CRATO (CE).

Determinamos, para cada bacia, dois conjuntos de valores característicos das cheias:

- o primeiro, relativo à média das 10 cheias mais fortes observadas em cada bacia, está simbolizado pelo sufixo "med" nas tabelas e figuras deste capítulo;

- o segundo, concernente às características do hidrograma unitário, simbolizado pelo sufixo "unit".

Indicamos nessa tabela:

- o valor indicativo da lâmina decenal X_{10} calculado com o modelo SUDENE/ORSTOM;
- os tempos de base Tb e de subida Ts;
- os coeficientes $Kx = S * \alpha / (3{,}6 * Tb)$ e α o qual é o coeficiente de forma do hidrograma definido no parágrafo precedente;
- lembramos que Kx corresponde à descarga máxima de um hidrograma de 1 mm de lâmina escoada;
- a descarga Q_{10} da cheia decenal estimada, já apresentada no relatório final de cada bacia, correspondendo aos valores que publicamos no capítulo 3;
- a relação: Qprojeto / $(2 * Q_{10})$, que permite verificar a fórmula de transposição que vamos propor; Qprojeto sendo calculada pelas fórmulas de transposição indicadas nos parágrafos **5.4.1 e 5.4.2.**

[4] As características das cheias das 25 outras bacias não puderam ser estudadas, seja porque o dispositivo de medição ficou reduzido a uma bateria de réguas limnimétricas num açude, desprovido de limnígrafo e, portanto, incapaz de registrar a forma das cheias, ou porque se tratava de microbacias cujas durações de escoamento dependiam essencialmente da intensidade da chuva e não correspondiam, pois, a nossa abordagem do problema.

Tabela 5.1 Características das cheias das bacias hidrográficas representativas do Nordeste

Nome	Superfície (km2)	Lâmina decen. (mm)	Kx méd.	T.base méd. (h)	a méd.	T.subida méd. (h)	Kx unit	T.base unit (h)	a unit	T.subida unit (h)	Q_{10}	$\frac{Qprojeto}{2*Q_{10}}$
PGI	194.0	26.0	3.44	49.98	2.77	14.76	6.67	20.00	2.66	4.00	90	2.97
MNO	19.0	56.0	1.27	13.10	2.98	2.87	1.84	6.00	2.10	2.00	71	0.97
CAL	0.77	37.0	0.20	3.98	3.09	1.37	0.30	2.00	2.78	0.65	7.4	0.93
GAN	137.0	19.0	6.37	16.24	2.52	3.63	15.00	8.00	3.00	2.50	121	1.79
JAT	26.8	26.0	2.22	10.78	3.02	2.27	3.00	5.50	2.60	1.60	58	1.45
UMB	10.7	32.0	0.81	9.77	2.34	2.96	1.60	5.00	2.60	1.10	26	1.90
MAT	468.0	12.0	19.69	21.05	2.99	4.55	26.70	13.00	2.65	4.00	236	1.87
OSB	45.2	25.0	3.55	13.40	3.62	2.39	5.50	9.00	3.90	1,00	89	1.28
SAL	15.6	27.0	1.47	14.64	3.70	2.36	2.55	6.25	3.60	0.75	40	1.54
JUA	19.2	33.0	1.88	9.78	3.06	3.87	2.18	6.00	2.45	1.00	62	1.12
LGR*	321.0	1.0	7.15	33.00	2.41	12.36	10.40	20.00	2.33	7.00	7	50.77
LBA*	19.1	2.0	4.42	3.01	2.43	1.06	12.00	1.00	2.26	0.33	9	7.69
FZI*	46.8	12.0	4.62	10.25	2.80	3.91	11.70	3.33	3.00	0.67	55	1.40
FZP*	14.8	15.0	3.20	5.35	3.12	2.09	5.90	2.17	3.11	0.50	48	1.24
BPC*	198.0	13.0	2.68	64.75	2.81	12.29	3.33	40.00	2.42	3.50	35	7.67
MVE*	266.0	4.0	11.48	17.21	3.21	5.75	14.29	15.00	2.33	4.50	57	3.70
QUI*	83.0	20.0	7.10	9.64	2.92	0.92	10.90	5.00	2.36	1.00	142	1.14
GRA*	18.0	-	5.00	2.82	3.01	1.10	5.48	2.75	2.75	1.00	-	-
BCR*	29.5	-	6.75	3.37	2.67	0.70	12.00	1.67	2.44	0.50	-	-

** bacia situada na zona sedimentar.*

Todas essas bacias têm uma superfície compreendida entre 10 e 500 km^2, com exceção da bacia de CALDEIRÃO.

5.3.2 Variação do tempo de concentração em função da superfície

A teoria do hidrograma unitário, na qual se apoia nosso raciocínio, introduz, para uma determinada bacia, um valor limite da duração da chuva, abaixo do qual a duração do escoamento superficial não mais varia. Todos os hidrogramas apresentam, então, formas "proporcionais" e, portanto, tempos de subida e de base idênticos. Diz-se, então, que as chuvas e as cheias são unitárias. Essa duração-limite da chuva, acima da qual as cheias não são mais unitárias, está ligada ao **tempo de concentração** da bacia. O tempo de concentração é o tempo gasto pelo escoamento superficial, proveniente da parte mais distante da bacia, para alcançar o exutório da mesma.

O tempo de concentração pode ser calculado, por exemplo, pela fórmula proposta pela California Highways and Public Works:

$$Tc = 57(L^3/H)^{0,385}$$

onde L, em km, é o comprimento do talvegue mais extenso;
H, em m, é o desnivel da bacia;
Tc, em minutos, é o tempo de concentração.

Para estimar a superfície da bacia abaixo da qual a teoria do hidrograma unitário não é mais aplicável, calculamos, na tabela a seguir, os tempos de concentração correspondentes a várias hipóteses:

Tabela 5.2 Valores do tempo de concentração, em minutos, de acordo com diversos tipos de morfologia da bacia

Superfície da bacia	10 km^2	5 km^2	1 km^2	0,1 km^2
Relevo forte/Bacia compacta	41 min	31	14	6,4
Relevo forte/Bacia alongada	92	69	32	14,3
Relevo médio/Bacia compacta	86	62	27	9,2
Relevo médio/Bacia alongada	191	137	59	20,4

Esta tabela foi estabelecida com as hipóteses a seguir, efetuadas para representarem as situações mais freqüentes no Nordeste.

Hipóteses sobre a forma da bacia:

Bacia compacta : $L = 1{,}4 * S^{0,5}$
Bacia alongada : $L = 2{,}8 * S^{0,5}$

Hipóteses sobre os valores do desnivel H (m).

SUPERFÍCIE	10 km^2	5 km^2	1 km^2	0,1 km^2
H relevo forte	200 m	150 m	100	25
H relevo médio	30 m	25	20	10

Analisando-se as alturas e as intensidades das fortes chuvas apresentadas no parágrafo 1.1.2, observa-se que 56% do total das chuvas fortes precipitaram em menos de uma hora e 75% em menos de duas horas. Isso nos leva a pensar que a teoria do hidrograma unitário não pode mais ser aplicada a bacias cujo tempo de concentração é inferior a uma ou duas horas. A tabela 5.2 permite situar esse limite em torno de 5 ou 10 km^2.

Adotaremos 5 km^2 como limite da superfície da bacia, abaixo do qual os hidrogramas das cheias provocadas pelas chuvas mais fortes não serão, certamente, unitários, no sentido de SHERMAN.

5.4 FÓRMULAS PROPOSTAS PARA A TRANSPOSIÇÃO DAS CHEIAS NAS ZONAS CRISTALINAS.

5.4.1 Superfícies de bacias compreendidas entre 5 e 500 km^2.

Neste intervalo de superfície, a teoria do hidrograma unitário é, em princípio, aplicável. Buscaremos, primeiramente, estabelecer uma fórmula de transposição para as bacias do cristalino que são mais "*perigosas*" e cujos parâmetros (descarga, coeficiente Kx, superfícies, etc.) estão ligados por relações relativamente coerentes e fáceis de interpretar.

5.4.1.1 Variações de Kx em função da superfície

A figura 5.1 mostra a relação entre Kx e a superfície S da bacia para zona cristalina.

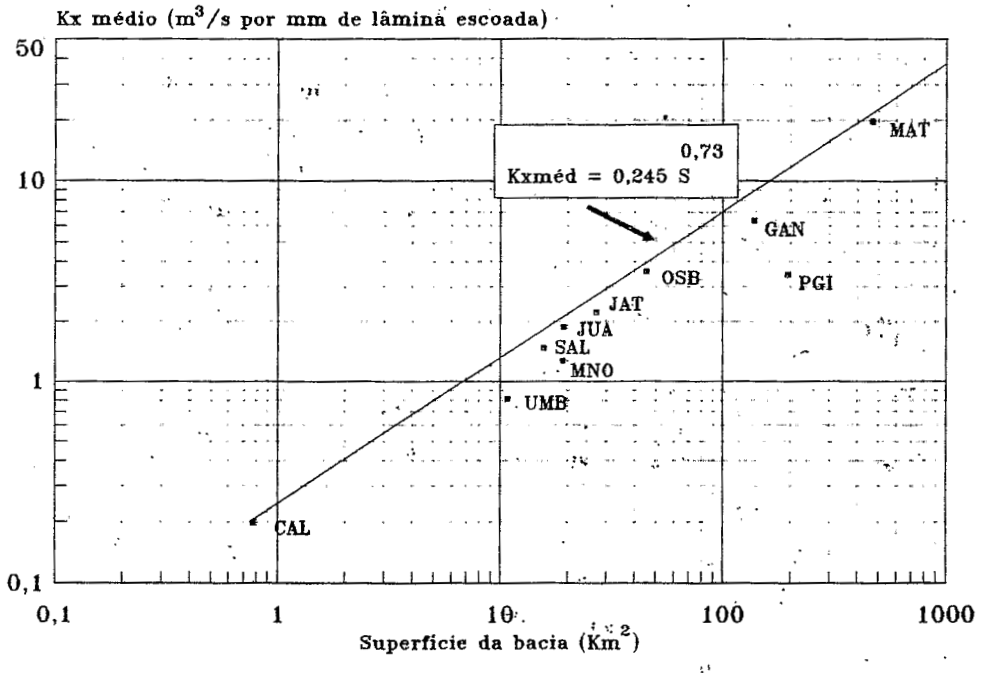


Figura 5.1 Relação entre Kx e a superfície S da bacia de zona cristalina.

Para bacias cristalinas, **o limite superior da relação Kx = f(S)** é definido pela relação:

$$Kx_{med} = 0{,}245\, S^{0{,}73} \quad (1)$$

5.4.1.2 Variações da lâmina escoada da cheia decenal em função da superfície

A relação seguinte entre a lâmina e a superfície de bacias das zonas cristalinas pode ser ajustada, com a ajuda de figura 5.2

$$Le = 51\,S^{-0,15} \quad (2)$$

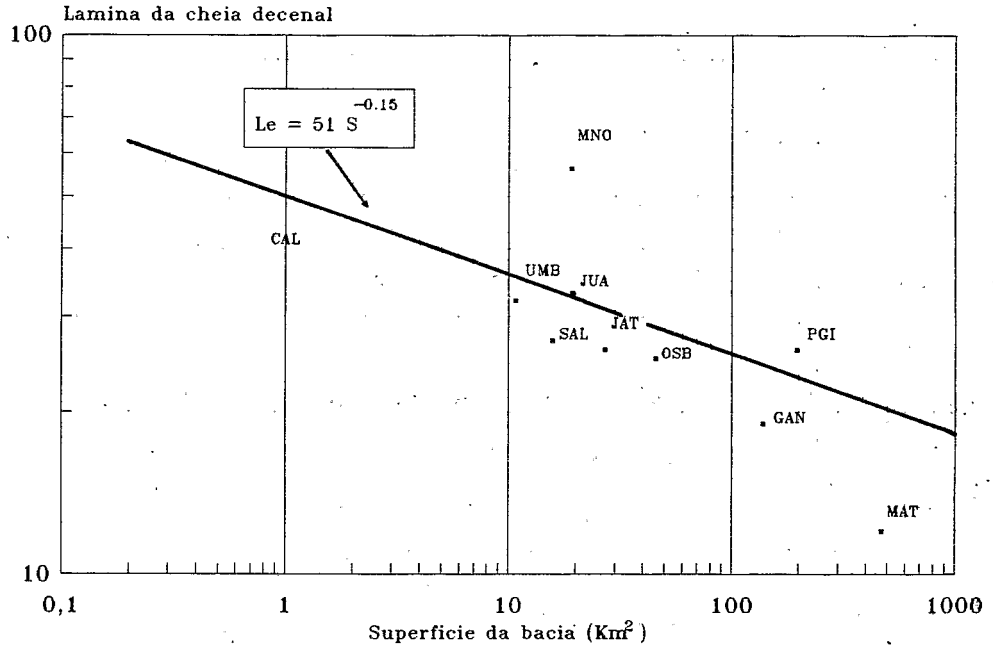


Figura 5.2 Relação entre a lâmina da cheia decenal e a superfície S da bacia

Nesta figura 5.2, a lâmina escoada decenal média das pequenas bacias mais "perigosas", de 5 km^2, pode ser estimada em 40 mm. Para 500 km^2 essa avaliação não é mais do que 20 mm.

Os valores apresentados, de 40 e 20 mm, podem ser confirmados pelos seguintes elementos[5]:

[5] Os argumentos e justificativas que apresentamos podem parecer discutíveis. Estamos bem conscientes e lamentamos. Infelizmente não possuimos nada de mais conseqüente a propor. Procuramos detalhar ao máximo nossa ação, para melhor situar e explicar os raciocínios e as hipóteses empíricas que tivemos que adotar.

▪ Confirmação da lâmina de 40 mm para as bacias de 5 km^2:

* As variações da chuva em 24 h, de frequência decenal na grande zona climática Sertão são fracas; ela é da ordem de 105 mm. Esta "quase-constância" da chuva decenal tem uma grande importância. Com efeito, por ela que nos permitiu propor uma só fórmula para toda a zona Sertão.

* A lâmina decenal de 40 mm que propomos para as bacias de 5 km^2 é compatível com os maiores valores da tabela 5.1 e com o cálculo que se poderia efetuar com as hipérboles dos modelos das bacias estimadas mais perigosas. Uma lâmina escoada de 40 mm corresponderia, por exemplo, ao escoamento provocado por uma chuva decenal de 105 mm calculada, com uma hipérbole do modelo SUDENE/ORSTOM, de declividade D=0,40 e X=5 mm, ou ainda, de declividade D=0,45 e X0=16 mm.

* O limite superior dos Kxmed das bacias cristalinas que definimos já foi calculado com uma margem de segurança de 30% em relação à média das bacias que têm os tempos de base mais curtos e que são as mais perigosas. Essa margem parece-nos suficiente, e, seria exagero, tomar uma segunda margem na estimativa das lâminas escoadas.

▪ Confirmação da lâmina de 20 mm para as bacias de 500 km^2. Por que passar de 40 para 20 mm?

* O coeficiente de redução diminui as chuvas de 25 a 35 % segundo os autores. Isso provoca, como vimos, uma diminuição de 12 a 14 mm nos escoamentos.

* Uma grande bacia será, muito provavelmente, composta de algumas partes, como, por exemplo, as zonas aluviais que escoarão menos e que permitirão diminuir a margem de segurança que tivemos que adotar para as de 5 km^2. Essa diminuição suplementar pode ser estimada, arbitrariamente, entre 5 e 10 mm.

* Devemos esforçar-nos para que a fórmula proposta forneça valores de pico de cheia compatíveis com aquela estabelecida por AGUIAR para as bacias de tamanho superior a 500 km^2.

5.4.1.3 Fórmula de cálculo da descarga da cheia de projeto

A combinação das equações (1) e (2) permite estabelecer a equação que propomos para calcular a descarga da cheia de projeto (Qproj).

Definiremos, de acordo com RIBSTEIN (1990), a descarga de cheia de projeto, como sendo o dobro da descarga decenal, o que corresponde, segundo as nossas estimativas, a um período de retorno da ordem de 100 a 200 anos.

$Q_{proj} = Kx_{méd} * \text{Lâmina cheia projeto} = 2*Kx_{méd} * \text{Lâmina cheia decenal}$ ou seja:

$Q_{proj} = 2 * (0{,}245 * S^{0,73} * 51 * S^{-0,15}) = 25 * S^{0,58}$

O que resulta em:

$$Q_{proj} = 25 * S^{0,58} \quad (3)$$

Para o cálculo da descarga decenal, utilizamos o valor Kxméd no lugar de Kx unit, visto que a descarga máxima calculada com a lâmina do período de retorno de 1/10 teria, evidentemente, um período de retorno muito superior a 10 anos, se os cálculos fossem efetuados com um hidrograma de forma unitária!

5.4.2 Superfícies de bacias compreendidas entre 0,1 e 5 km^2

Abaixo de determinada superfície, a teoria do hidrograma unitário (que foi utilizada para estabelecer a fórmula para intervalos de superfícies intermediárias entre 5 e 500 km^2), não é mais aplicável, visto que a duração da chuva é superior ao tempo de concentração da bacia, significando que as chuvas fortes continuarão a cair durante a cheia.

Não dispomos de qualquer tipo de informação direta para essa gama de superfície, salvo a bacia de CALDEIRÃO. Tentamos ajustar uma fórmula do tipo $Qx = K*S^a$, servindo-nos da fórmula clássica chamada racional: Q=CIA que deve ser escrita Q=CIS, visto que utilizamos o símbolo S, e não A, para representar a superfície da bacia. Levando-se em conta as unidades de medidas empregadas, esta fórmula é escrita:

$Qproj = C*I*S/3{,}6$

C é um coeficiente arbitrário que admitimos igual a 0,6 para 0,1 km^2 e a 0,5 para 5 km^2. A escolha desses valores para C leva a supor que as descargas centenares no exutório representarão, respectivamente, 50 e 60% das intensidades de mesma freqüência.

I é a intensidade da precipitação de frequência centenares cuja duração corresponde ao tempo de concentração Tc apresentada na tabela 5.2. Retomamos às freqüências centenares de intensidades indicadas no parágrafo 1.1.3.

Calculamos a descarga da cheia de projeto para duas superfícies de 0,1 e de 5 km^2.

SUPERFÍCIE	0,1 km^2	5 km^2
Tc médio	10 min	45 min
Chuva durante Tc	27 mm	65 mm
I	162 mm/h	87 mm/h
C	0,6	0,5
Q	2,7 m^3/s	60 m^3/s.

Ajustando-se a função de potência que passa por esses dois pontos, obtém-se, finalmente, a fórmula a seguir que corresponde às pequenas bacias mais "perigosas".

$$Qproj = 17 * S^{0,8} \qquad (4)$$

Notamos que, no caso das bacias de superfície inferior a 5 km^2, a descarga da cheia de projeto que propomos não é mais igual ao dobro da descarga decenal. Isso tem origem no modo de cálculo diferente que supõe, nesse caso, que as descargas são proporcionais às intensidades da chuva de mesmo período de retorno. Ora, as intensidades centenares são inferiores ao dobro de suas homólogas decenais, o que explica essa constatação.

5.4.3 Superfícies superiores a 500 km2

Para superfícies superiores a 500 km^2 aconselhamos utilizar a fórmula estabelecida por F.G. AGUIAR, pois, estamos no domínio de validade desta fórmula. Lembramos sua formulação e seu modo de utilização:

$$Q_{projet} = \frac{1.150 * S}{(LC)^{0,5} * (120 + KLC)} \quad (\text{en } m^3/s)$$

onde S = superfície da bacia hidrográfica, em km^2;
L = comprimento do rio mais longo, em km;
K, C = coeficientes que dependem do tipo de bacia definidos no quadro a seguir.

TABELA 5.3 Coeficientes K e C da fórmula de AGUIAR para o cálculo das cheias

MORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA	TIPO	COEFICIENTES K	C
Pequena bacia ingreme e rochosa	1	0,10	0,85
Bacia bem acidentada, sem depressão evaporativa	2	0,15	0,95
Média	3	0,20	1,00
Ligeiramente acidentada	4	0,30	1,05
Ligeiramente acidentada, apresentando depressão evaporativa	5	0,40	1,15
Quase plana, terreno argiloso	6	0,65	1,30
Quase plana, terreno variavel ou ordinario	7	1,00	1,45
Quase plana, terreno arenoso	8	2,50	1,60

Não podemos mais utilizar a fórmula proposta $Q=25*S^{0,58}$, pois, o raciocínio e as hipóteses com os quais efetuamos os cálculos não são válidos acima de 500 km^2; exemplificando:

a) Acima de 500 km^2 os tempos de base das cheias são geralmente superiores a 24 h. Por essa razão, as cheias fortes serão, freqüentemente, provocadas por episódios chuvosos complexos, compostos de várias chuvas convectivas que acontecem em dias diferentes. Isso entra em contradição com as hipóteses adotadas para utilizar Kx e com os valores da precipitação centenar utilizados para o cálculo das lâminas de cheia. Assim, o valor de 105 mm que utilizamos, provém de ajustamentos estatísticos com séries de chuvas em 24 h. Portanto, esse valor não é mais utilizável para calcular a lâmina escoada, visto que precisaria analisar as chuvas de duração superior a 24 h.

b) Acima de 500 km^2, a homogeneidade espacial das chuvas convectivas, diminui consideravelmente. A probabilidade de ver as diferentes partes de uma bacia atingidas, no mesmo dia, por mais de um sistema nebuloso convectivo (ou cúmulos-nimbos) aumenta muito.

5.4.4 Relação entre os tempos característicos dos hidrogramas

A figura 5.3 e a tabela a seguir mostram a variação do tempo de base (Tmed) das cheias fortes em função da superfície. Observar os valores elevados dos **Tempos de base** em relação aos **Tempos de concentração** da tabela 5.2, que foram calculados com fórmulas "importadas" que previam uma importante margem de segurança.

Tempo de base médio das cheias em função da superfície

Superfície(km^2)	5	10	20	50	100	200	500	1000
Tempo de base médio(h)	7	8,5	10	13,5	16	18	22	25

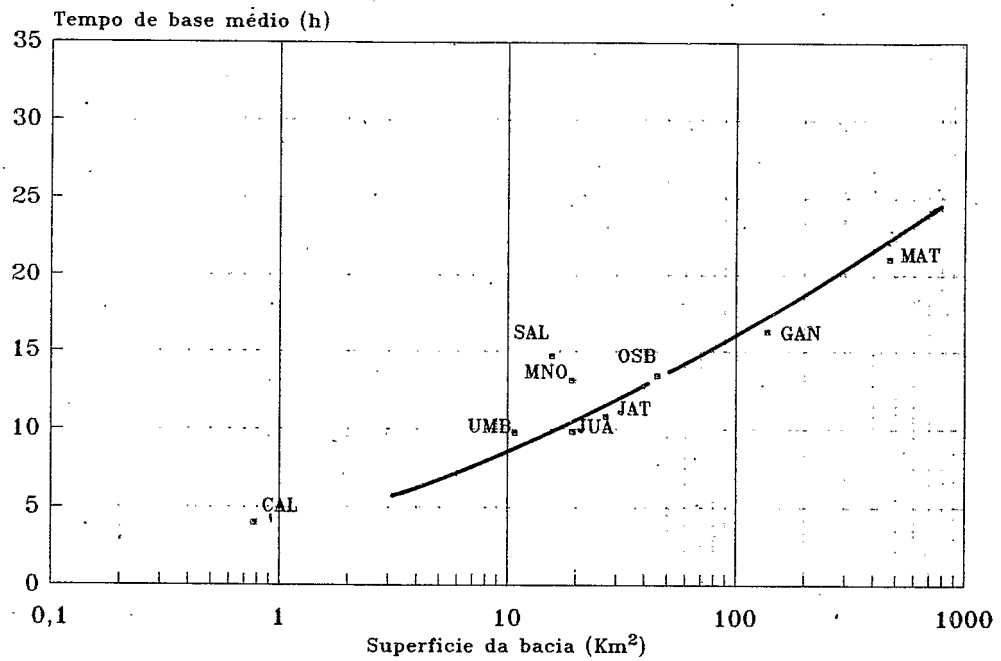


Figura 5.3 : Tempos de base médios em função da superfície para bacias das zonas cristalinas

Os gráficos a seguir e à tabela 5.1 permitiram estabelecer as seguintes relações:

Kx (sedimentar) = 1,6 Kx (cristalino)
Kx (unitário) = 1,6 Kx (médio)
Tb (médio) = 1,8 Tb (unitário)
Ts (médio) varia, em geral entre 1,3 Ts(unitário) e 2,5 Ts(unitário)
Ts (médio) varia, geralmente, entre 0,17 Tb(médio) e 0,36 Tb(médio)

(Tb e Ts são os tempos de base e de subida do hidrograma das cheias).

Estas relações permitirão comparar os tempos característicos das cheias obtidas a partir das BHR do Nordeste com aqueles estabelecidos por outros autores para outras regiões do mundo. Elas serão, também, necessárias para certos cálculos, como o do amortecimento das cheias nas represas, que utilizam os tempos de subida e de base do hidrograma.

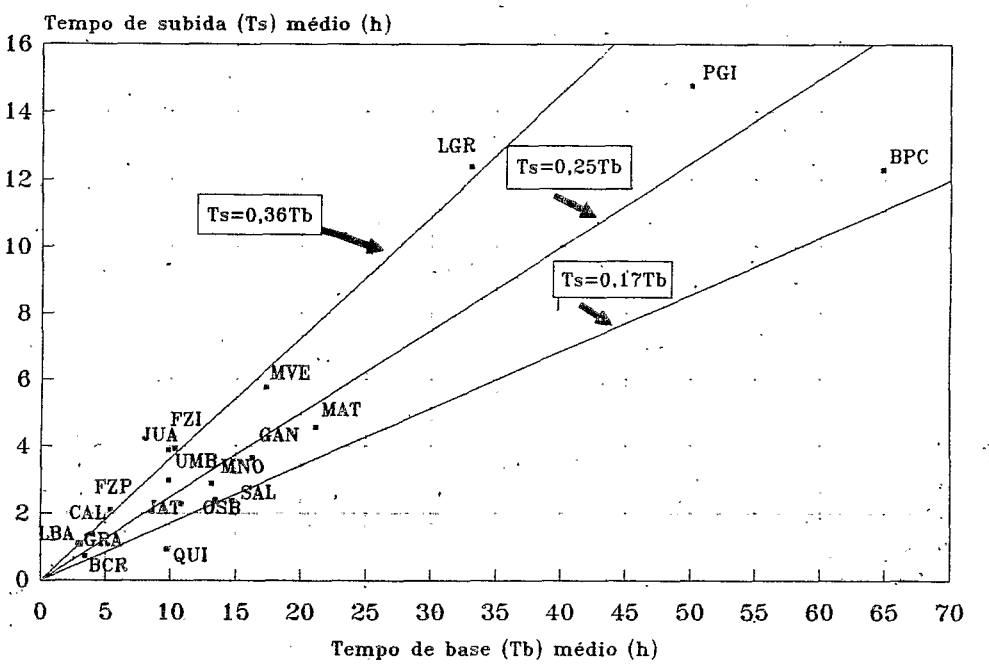


Figura 5.4 : Tempo de subida médio em função do tempo de base médio para todas as zonas.

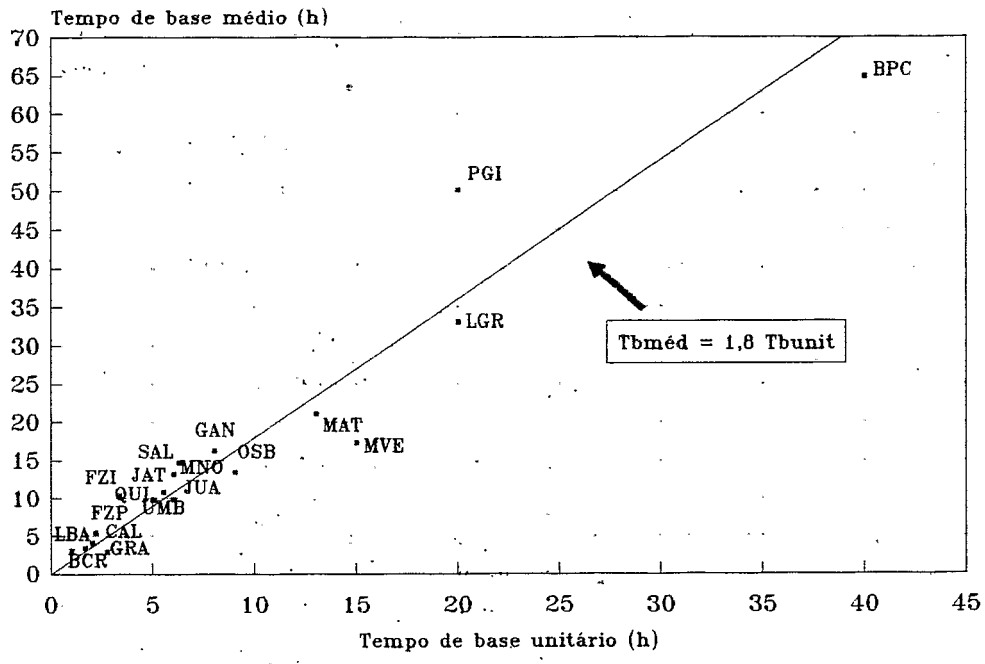


Figura 5.5 : Tempo de base médio em função do tempo de base unitário para todas as zonas.

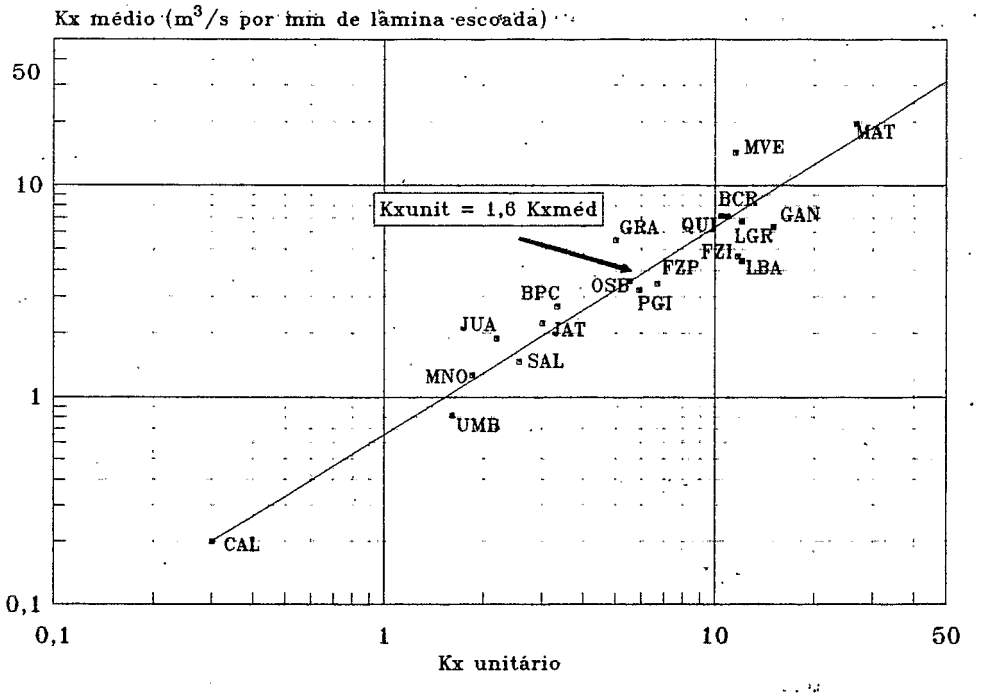


Figura 5.6 : Kx médio em função de Kx unitário para todas as zonas.

5.5 DISCUSSÃO: OS FATORES CORRETIVOS DAS CHEIAS

Estabelecemos as fórmulas de cálculo da cheia de projeto tendo por base a média das bacias situadas sobre embasamento cristalino, as quais geram as cheias mais perigosas.

5.5.1 Correção a efetuar quando a bacia é sedimentar

A relação entre Kx e a superfície S mostrada na figura 5.7 é menos coerente para as bacias sedimentares, primeiramente, porque a amostra de bacias é muito heterogênea e também porque uma parte desses coeficientes foram estabelecidos em 1964, utilizando-se técnicas e normas de cálculo sensivelmente diferentes das que utilizamos, principalmente no que diz respeito à separação dos escoamentos ou à avaliação dos tempos de base. Por outro lado, os dados originais desapareceram, o que nos impediu de efetuar qualquer novo cálculo. Constatamos nesta figura 5.7, que o Kx "sedimentar" parece ser superior em 40 a 60% ao Kx "cristalino". No entanto, isso é largamente compensado pelo fato de que as lâminas escoadas das cheias, dessas mesmas bacias sedimentares, são 3 ou 4 vezes mais fracas[6].
Ao final, o balanço dessas duas correções contraditórias provocará uma diminuição de mais ou menos 50% da descarga de pico.

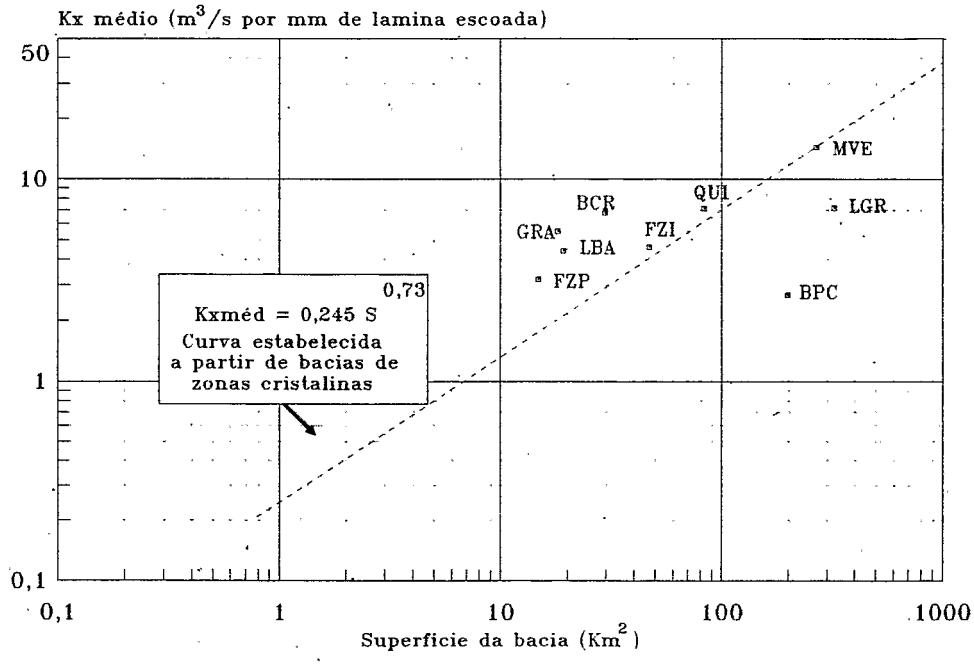


Figura 5.7 : Kx médio em função da superfície para bacias das zonas sedimentares

[6] RODIER (1989) chegou a conclusões semelhantes em seu estudo sobre bacias permeáveis. Ele admite a hipótese de que, neste tipo de bacia, somente uma parte contribui efetivamente para as cheias, o que provoca uma diminuição das lâminas e dos tempos de escoamento.

Por motivo da dispersão e do pequeno tamanho da amostra de bacias sedimentares e por medida de prudência, proporemos, apenas, uma diminuição de 33% da descarga de pico da cheia de projeto. Levando-se em conta o expoente da fórmula utilizada, essa diminuição de 33% da descarga equivale a aplicar a fórmula estabelecida para o cristalino, considerando-se, apenas, a metade da superfície da bacia sedimentar:

$$Q = 25 * Sc^{0,58}, \qquad \text{com } Sc = S/2$$

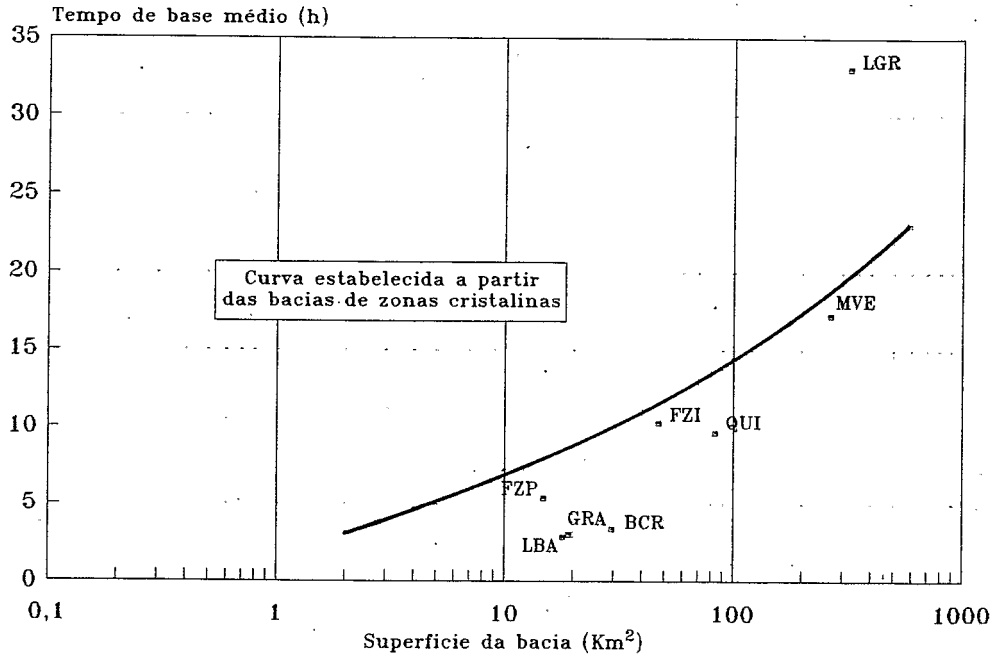


Figura 5.8 : Tempo de base médio, em função da superfície para bacias das zonas sedimentares

5.5.2 Os outros fatores corretivos

O bom senso conduz, como o fizeram certos autores, a buscar a influência sobre as descargas de cheia, de fatores tais como a forma ou o relevo da bacia, a presença de zonas particularmente impermeáveis ou, ao contrário, suscetíveis de reter a água ou, enfim, à existência de condições climáticas locais excepcionais. Infelizmente, o pequeno tamanho e a grande dispersão da amostra de bacias de que dispomos elimina toda esperança de efetuar um estudo direto e específico da influência desses fatores, no Nordeste. Reportamo-nos aos trabalhos de outros autores e tentaremos adaptar as soluções propostas às condições que lhes sejam comparáveis.

Inspiramo-nos, principalmente, nos seguintes autores:

- F.G. de AGUIAR, autor muito conhecido no Nordeste, onde seu método é bastante usado.
- Trabalhos de síntese realizados na África, dentro de situações climáticas semelhantes, pelos órgãos e autores seguintes, já citados: ORSTOM, CIEH, GRET (BERTON), J. RODIER, P. RIBSTEIN, C. PUECH, P. DUBREUIL e G. GIRARD.
- Trabalhos e sínteses realizados pela SUDENE e pelo ORSTOM, quando da elaboração da Monografia Hidrológica do Vale do Jaguaribe (GEVJ).
- Trabalhos e fórmulas utilizados pelo Bureau of Reclamation (BUREC) e pela Soil and Conservation Service, dos Estados Unidos.
- Trabalhos do programa de Bacias Hidrográficas Representativas e Experimentais da SUDENE.

■ Determinação do fator de correção de forma da bacia (Cform)

É evidente que a forma da bacia influenciará o tempo de base das cheias. Para representá-la, escolhemos **o comprimento do rio mais longo (L)**, que é determinado tradicionalmente pelos hidrólogos do Nordeste, pois, intervém na fórmula de AGUIAR.

Simplificando muito a realidade e considerando-se a teoria das linhas isocrônicas, a superfície da faixa elementar que produz o pico de cheia é proporcional à "superfície" da maior isocrona. Esta superfície, numa primeira aproximação, é proporcional a S/L^2. A relação S/L^2 ou L^2/S representa a compacidade da bacia, de uma maneira mais familiar que o coeficiente de GRAVELIUS, segundo os hidrólogos do Nordeste do Brasil.

Valores do fator C_{form}

L^2/S	1	2	3	4	5	6	7
Coeficiente de Gravelius	1,12	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
C_{form}	1	1	0,85	0,75	0,70	0,65	0,63

Os valores do quadro de correção proposto foram obtidos a partir dos seguintes elementos:

a) **A fórmula de AGUIAR**. Nessa fórmula, quando a compacidade da bacia varia entre dois valores extremos: compacta ($L^2/S=2$) e muito alongada ($L^2/S=8$), as descargas de pico de cheia diminuem de 30 a 50%, de acordo com tamanho da bacia.

b) **As soluções propostas por RIBSTEIN** *in* BERTON (1988). Este autor recomenda também para bacias de superfície inferior a 10 km^2, uma redução do Qmax, quando os valores dos coeficientes de Gravelius C são superiores a 1,30.

Para um coeficiente de Gravelius C de 1,42, RIBSTEIN propôs uma correção equivalente a C_{form} = 0,72, que diminui para 0,64, quando C = 1,54.

Calcula-se o coeficiente C de Gravelius pela fórmula:

$$C = \frac{L + l}{(3{,}14 \times L)^{0{,}5} \times l}$$

L e l sendo, respectivamente, o comprimento e a largura do retângulo equivalente da bacia.

■ Determinação do fator de correção de forma da rede hidrográfica de drenagem C_{dren}

Os valores do quadro de correção, a seguir, foram obtidos tomando por base o que propôs RIBSTEIN no mesmo trabalho. Ele recomenda uma majoração ou minoração máxima de 30% para as descargas de pico, em função das anomalias de forma da rede de drenagem. Adotamos fatores de correção ligeiramente inferiores aos propostos por RIBSTEIN.

Atenção, é preciso ter sempre em mente que as correções C_{form} e C_{dren} apresentam uma certa redundância e que se deve evitar, para certas bacias, corrigir duas vezes a mesma coisa. Pode ser o caso, por exemplo, de uma bacia que seja muito alongada e ao mesmo tempo possua uma rede hidrográfica em forma de espinha de peixe.

Valores do fator C_{dren}

Aspectos da Rede de drenagem	Valores do fator C_{dren}
Normal	1
Espinha de peixe	0,75 a 1
Radial	1 a 1,5

■ Determinação do coeficiente de correção pelo relevo C_{rel}

Os números do quadro de correção propostos foram obtidos a partir dos seguintes elementos:

a) AGUIAR propõe uma classificação das bacias em 8 classes, segundo o relevo, a presença eventual de depressões e a natureza do solo. Resumimos os critérios de classificação propostos por AGUIAR, no parágrafo 5.4.3. Aplicando a fórmula para S = 500 km^2, constata-se que as descargas de pico correspondendo aos dois tipos de relevo extremos variam numa relação de 1 para 3.

b) As Bacias Hidrográficas Representativas (BHR) operadas pela SUDENE, com as quais determinamos as equações que permitem o cálculo da descarga de pico, podem ser classificadas nos tipos 2 ou 3 definidos por AGUIAR, como sendo: "bacia bem acidentada, sem depressão evaporativa" ou "bacia média". A descarga de pico desse tipo de bacia, segundo AGUIAR, sempre será inferior em 10 a 15% à descarga das bacias mais perigosas que são as bacias do tipo 1.

Valores do fator C_{rel}

RELEVO	Montanhoso e Escarpado	Forte Ondulado	Ondulado	Suave Ondulado	Plano
DECLIVIDADE	> 25%	15 a 25%	15 a 8%	3 - 8%	0 a 3%
Crel	1,1 a 1,2	1	1	0,8	0,6

A definição dos relevos provém dos mapas de solos da EMBRAPA.

■ Determinação dos fatores de correção de dregradação da superfície do solo, de solo compactado ou com os horizontes superiores truncados ou erodidos C_{degr} e F_{acr}

Dispomos, apenas, de três bacias representativas cujos solos são compactos, erodidos ou truncados. Observa-se, nessas bacias, uma degradação da superfície do solo (compactação e entupimento dos micro-poros) ou "*efeito de superfície*": as microbacias 3 e 4 de Sumé e a do açude Luzimar. Nestas pequenas bacias, constatamos um aumento do escoamento anual da ordem de 200 a 300%, em relação à mesma bacia depois do desmatamento, porém antes do aparecimento do "efeito de superfície". A variação da lâmina de cheia decenal é, mais fraca, aproximadamente 30 a 40%. Parece evidente que os valores das lâminas decenais de 40 e 20 mm, já citados, são subestimados para esse tipo de bacia.

Propomos multiplicar a descarga de pico por $C_{dren} = (1+F_{acr} * S_{degr})$

* S_{degr} é a proporção da bacia efetivamente degradada.

* O fator F_{acr} vale 0,5 ou 1,0:
  - O valor de 0,50 que propomos para os solos cuja L_{600} é superior 30 mm foi determinado tendo por base o aumento dos escoamentos nas três bacias citadas.
  - Para os solos cuja L_{600} é inferior a 30 mm, podemos temer um aumento acelerado do risco e sugeriríamos um fator de F_{acr} de 100%, visto que o contraste entre as zonas degradadas e as zonas intactas pode aumentar muito, sobretudo quando se está em presença de efeitos chamados de "superfície".

Os valores de F_{acr} propostos no quadro de correção a seguir são muito imperfeitos e indicam somente a ordem de grandeza de um fenômeno muito complexo e que seria ilusório querermos aprofundar aqui.

Valores do fator F_{acr}

Valor de L_{600}	Valor de F_{acr}	
Inferior a 30mm	1,0	Aplicar depois a fórmula
Superior a 30mm	0,5	$C_{degr} = 1 + F_{acr} * S_{degr}$

▪ Determinação do fator de correção climática C_{clim}

A tabela 4.5.3 indica uma redução de 45% da lâmina da cheia decenal na zona de Transição, para uma pluviometria anual de 600 mm. Esta redução diminui para 30%, para uma pluviometria anual de 800 mm.

A comparação da distribuição estatística dos totais em 24 h e das intensidades das chuvas dessas duas zonas mostra, igualmente, uma redução de 20% nos valores decenais. Propomos, para a zona de transição, uma redução de 25% da descarga da cheia decenal, que corresponde a um fator C_{clim} de 0,75. Evidentemente, será necessário confirmar este valor através de estudos específicos posteriores.

Valores do fator C_{clim}

Zona Sertão	$C_{clim} = 1$
Zona Transição	$C_{clim} = 0,75$

■ Limitações impostas à correção global

Os fatores corretivos propostos só devem ser utilizados quando a bacia apresentar características muito diferentes da média. O fator de correção global é obtido pela fórmula

$$Fc = C_{form} * C_{dren} * C_{rel} * C_{degr} * C_{clim}$$

A multiplicação de todos estes fatores, só tem sentido se a correção final não se afastar demais da unidade. Portanto, limitamos, arbitrariamente, as variações do fator global entre 0,5 C_{clim} e 1,5 C_{clim}. Certamente que essa maneira de proceder é um pouco rudimentar mas, poderá evitar uma utilização do método fora de seu domínio de validade e limitará os erros involuntários de usuários excessivamente prudentes que poderiam fazer correções exageradas.
Entretanto, um fator de correção Fc superior a $1,2 * C_{clim}$ deve ser reservado para os casos excepcionais.

5.5.3 Validação

A penúltima coluna da tabela 5.1 indica o valor Q_{10} da descarga de pico da cheia decenal, valor que foi estimado diretamente com a ajuda de métodos hidrológicos clássicos, no momento da elaboração do relatório final de cada bacia. A última coluna do mesmo quadro indica a relação $Q_{projeto}/(2*Q_{10})$, a qual deve ser, sempre, superior à unidade. Se isso não ocorrer, ficará provada uma subestimação da cheia decenal calculada pela fórmula de transposição que propomos, o que representaria, evidentemente, um risco inaceitável para a segurança dos aproveitamentos hidráulicos e implicaria na retomada de todas as nossas estimativas.

Para 5 bacias entre as 17, essa relação difere da unidade em menos de 20% , significando que a fórmula que propomos fornece uma estimação correta da descarga da cheia de projeto para essas cinco bacias que apresentam as cheias mais perigosas.

TABELA 5.4 Validação da descarga da cheia de projeto das cinco bacias mais perigosas

Bacia	$\frac{Qproj}{2 * Q_{10}}$	Observações
Faz.Passagem FZP	0.80	Bacia sobre embasamento sedimentar apresentando coeficientes de escoamento muito elevados para seu tipo
Caldeirão CAL	0,93	Bacia de pequena superfície cuja cheia de projeto é inferior a $2 * Q_{10}$. (ver explicação no fim do parágrafo 5.4.2)
Mundo Novo MNO	0,97	Bacia apresentando uma parte importante de Solonetz que pode ser considerado como solo degradado.
Quixabinha QUI	1,03	Forte relevo.
Juatama JUA	1,05	Forte relevo.

Para todas as outras bacias, essa relação é muito maior do que 1, o que comprova que a descarga da cheia de projeto das mesmas é superestimada. Isso anda no sentido da segurança. Dedutivamente, nenhuma das bacias teve suas descargas gravemente subestimadas pela fórmula que propusemos.

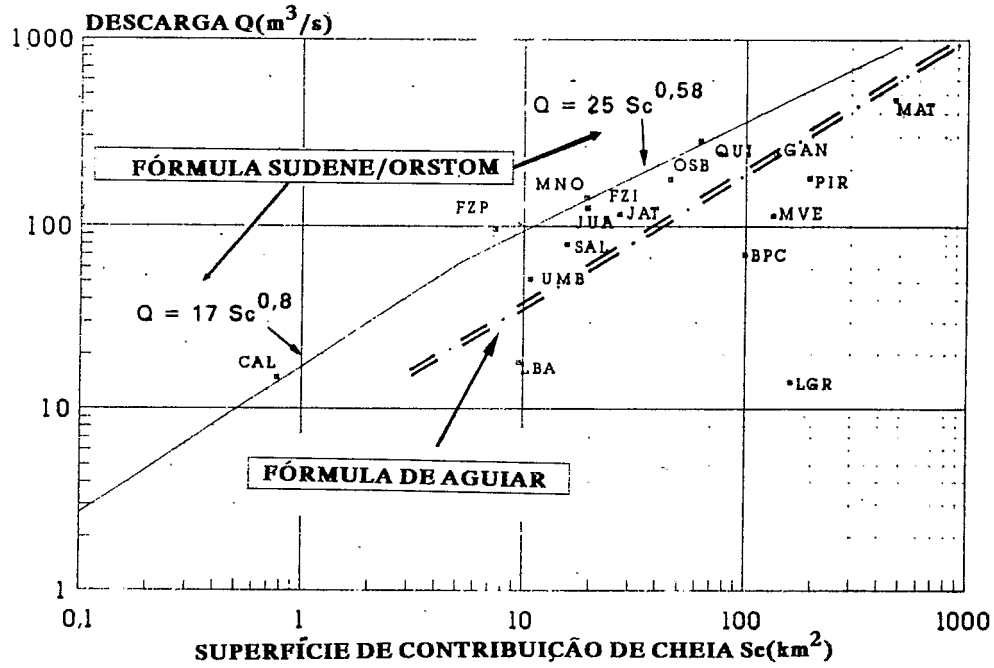


Figura 5.9 : Comparação do dobro da cheia decenal estimada com a cheia de projeto calculada pela fórmula SUDENE/ORSTOM

Comparação entre as fórmula da SUDENE/ORSTOM e a de AGUIAR

Comparemos a fórmula que acabamos de estabelecer e a proposta por F.C. AGUIAR (1940) que é, como já vimos, a fórmula mais utilizada no Nordeste e que já foi apresentada no parágrafo 5.4.3.

Fazendo variar a superfície da bacia entre 10 e 5.000 km^2, calculamos as descargas de pico com a fórmula de AGUIAR, para 3 tipos de bacia:

K = 0,1 - a mais perigosa "Pequena, íngreme e rochosa"
K = 0,35 - intermediária
K = 2,5 - a menos perigosa "Quase horizontal, terreno arenoso"

e para duas compacidades:

Compacta : $L = 1,4(S)^{0,5}$
Alongada : $L = 2,8(S)^{0,5}$

Os mesmos cálculos foram efetuados utilizando-se a fórmula que propomos e que denominamos "Fórmula SUDENE/ORSTOM" : $\mathbf{Qx = 25 * (Sc)^{0,58} * Fc}$, para três valores de Fc:

Fc = 1,2 - As mais perigosas
Fc = 1 - Bacia normal, sem correção
Fc = 0,5 - Bacia menos perigosa.

TABELA 5.5 Comparação entre as descargas de cheias calculadas com as fórmulas de AGUIAR e da SUDENE/ORSTOM (em m^3/s)

FÓRMULA	FORMA	SUPERFÍCIE(km^2)	5000	1000	500	100	10
AGUIAR	Compacta	K = 0,1	4853	1506	904	274	49m^3/s
		K = 0,35	3459	1195	738	232	43
		K = 2,5	874	455	327	137	31
	Alongada	K = 0,1	3219	1033	626	191	35
		K = 0,35	1968	750	478	158	30
		K = 2,5	349	201	153	73	20
SUDENE	CORREÇÃO						
	1,2		4193	1650	1103	434	114
	1		3495	1373	919	361	95
	0,5		1747	687	460	181	48

A comparação das duas fórmulas mostra que:

a) **Para as superfícies inferiores a 100 km e, sobretudo, menores que 10 km^2**, os valores calculados por AGUIAR são bem inferiores aos propostos pela SUDENE/ORSTOM. Para essas pequenas bacias **deve-se utilizar a fórmula SUDENE/ORSTOM.** Essa subestimação das descargas de cheia das pequenas bacias, pela fórmula de AGUIAR (que não tinha, aliás, sido concebida para as mesmas), **é grave.** Ela pode explicar uma parte das numerosas ruturas de pequenas barragens, constatadas nos últimos anos.

b) Para superfícies entre 500 e 1.000 km^2, as duas fórmulas fornecem resultados compatíveis.

c) Notamos que os menores valores da fórmula da SUDENE/ORSTOM são bem superiores aos menores valores de AGUIAR. Isso é normal, porque a superfície Sc considerada na fórmula da SUDENE/ORSTOM pode ser inferior à superfície real da bacia. É o caso, por exemplo, de uma bacia sedimentar ou de bacias arenosas que correspondem a K = 2,5 na fórmula de AGUIAR.

Concluindo:

Abaixo de 500 km^2 : utilizar para as cheias a fórmula SUDENE/ORSTOM : $Qx = 25 * (Sc)^{0,58} * Fc$ ou $17 * Sc^{0.8} * Fc$.

Entre 500 e 1.000 km^2: as duas fórmulas são utilizáveis.

Acima de 1.000 km^2 : utilizar a fórmula de AGUIAR.

SEXTA PARTE

CONCLUSÃO GERAL

SEXTA PARTE

6. CONCLUSÃO GERAL

Tentamos condensar, reunir e efetuar a síntese dos conhecimentos atuais sobre os regimes hidrológicos das pequenas bacias de uma região tropical semi-árida do Brasil, cobrindo, aproximadamente, uns 800.000 km^2. Essa síntese deve, também, permitir a elaboração de um método simples de avaliação dos recursos em água e das descargas das cheias. **Trata-se de um vasto programa com objetivos ambiciosos!** Atingi-mo-los porém de maneira bastante imperfeita. A cada passo, encontramos interrogações, hipóteses, dados ou cálculos a verificar. Tivemos que tomar decisões apoindo-nos sobre hipóteses ditadas pelo bom senso, intuição, experiência e/ou dedução. Algumas, dentre elas, só foram enunciadas e utilizadas para poder sair de um impasse e cumprir uma etapa suplementar visando os objetivos finais. Elas foram, muitas vezes, justificadas (ou não foram contestadas) bastante tempo depois, pela coerência global dos resultados finais.

Este trabalho é, primeiramente, um trabalho coletivo. Representa o resultado de quinze anos de esforços de uma equipe franco-brasileira. Sua origem e desenvolvimento são conseqüências de frutuosos intercâmbios entre hidrólogos e pedólogos. Os primeiros, trazendo os valores numéricos das chuvas, escoamentos, sua distribuição no espaço e no tempo, como também as técnicas de otimização e modelização. Os segundos, cooperando com seus conhecimentos sobre os comportamentos hidrodinâmicos dos solos, das interações entre os diferentes solos existentes ao longo dos declives. Os pedólogos tiveram um papel decisivo nos reagrupamentos de solos que permitiram a determinação dos coeficientes L_{600}.

6.1 NOSSAS OPÇÕES, PRIORIDADES E AÇÕES

■ Prioridade na valorização dos dados existentes

Esforçamo-nos para utilizar e valorizar a considerável massa de dados recolhidos durante os últimos decênios. 4.000 estações-anos de medições foram realizadas em diferentes tipos de instrumentos: na rede de bacias representativas da SUDENE, nas 72 parcelas de erosão monitoradas pelas *instituições de pesquisa agronômica*, dados coletados na rede geral, etc.

Só pudemos conceber e organizar uma pequena parte das medições que teriam sido necessárias para confirmar, validar ou completar esta síntese. Por exemplo, determinada bacia precisava de medições de campo complementares, através de parcelas ou simulador, uma outra necessitou de uma avaliação mais apurada de seu divisor de água, da conservação de sua cobertura vegetal ou do cadastramento de seus açudes. Teria sido muito proveitosa, a utilização dos recursos oferecidos pelo sensoriamento

remoto ou pela cobertura cartográfica elaborada por radar. Para isso, no entanto, seria imprescindível que os órgãos brasileiros envolvidos colocassem à disposição os meios que são necessários.
Limitou-se o nosso trabalho a tentar realizar ações complementares, julgadas, ao mesmo tempo, prioritárias e ao nosso alcance.

▪ Estudos de campo: diretrizes.

* *Estudo dos solos e da cobertura vegetal*

Primeiramente, graças à colaboração de pedólogos (LEPRUN *et al*, 1983; ASSUNÇÃO *et al*, 1984), que garantiram a essência deste trabalho, pôde ser executada uma cartografia pedológica de todas as bacias representativas. Essa cartografia, orientada para a compreensão dos mecanismos hídricos estava acompanhada de medições de infiltração pelo método de MUNTZ, realizadas em 52 unidades de solo julgadas estratégicas. Esse trabalho foi uma preliminar indispensável para a compreensão do papel dos solos, para o estabelecimento da tipologia e dos reagrupamentos de bacias e, finalmente, para a proposição dos valores de L_{600} dos diferentes tipos de solos.

* *Estudo de bacias menores e mais homogêneas*

As dificuldades encontradas no momento da elaboração do primeiro relatório de síntese final de uma bacia hidrográfica, a do RIACHO DO NAVIO, convenceu-nos da necessidade de estudar bacias menores e mais homogêneas. Esta é uma condição necessária, para esclarecer uma parte do labirinto dos fatores condicionantes dos regimes. Poderíamos enunciar este princípio da seguinte maneira: "Se se quer evidenciar e quantificar a influência de um fator é preciso, imperativamente, estudar duas ou várias bacias que sejam o mais semelhantes possível, exceto quanto às variações do fator estudado. Pode-se exprimir isto, mais prosaicamente, assim: "*só se pode estudar corretamente um problema de cada vez*".

Os estudos implantados após 1980 foram concebidos em função desse princípio:

- Estudo de bacias menores e multiplicação do número de pequenas bacias. Para poder executá-lo a um custo razoável, organizamos a medição sistemática dos volumes de água captados por todos os pequenos açudes, desde que isto fosse possível.

- Monitoramento de parcelas de 100 m^2 e de microbacias de 1 ha, nas bacias experimentais de SUMÉ e TAUÁ, para evidenciar a influência das variações da vegetação e/ou do solo.

6.2 FUNCIONAMENTO DAS BACIAS REPRESENTATIVAS

■ Contribuição das diferentes bacias

Cada bacia representativa contribuiu, a sua maneira, para o aumento dos conhecimentos atuais em hidrologia, no Nordeste:

* **TAUÁ** foi a bacia que concorreu com o maior número de informações inéditas:

  - O grande número de pequenas bacias estudadas permitiu esboçar uma **tipologia regional** de bacias, em função dos solos e da vegetação.

  - Uma série de **bacias encaixadas** cujas superfícies variam entre 1 hectare e 5.000 km^2, mostra-nos que não existe, aparentemente, redução das lâminas escoadas anuais, em função da superfície da bacia nesta região, com a condição que ela não contenha nenhum baixio aluvial, nenhum leito maior considerável e nenhum açude importante, e que, ao mesmo tempo, as declividades sejam relativamente fortes. Esse resultado que toca um dos pontos polêmicos da pesquisa atual, "*o efeito de escala*", não era evidente, *a priori*. É uma pesquisa que deverá prosseguir.

  - Pôde-se fornecer uma estimativa grosseira e indireta da **redução do escoamento provocado pelos açudes**.

  - As observações realizadas em uma bacia bem pequena, coberta inteiramente de **Vertissolos**, permitiu propor um valor para os escoamentos relativos a esse tipo de solo, o que representa uma informação inédita.

* **SUMÉ** contribuiu com informações fundamentais sobre a influência das variações da **cobertura vegetal e da conservação da superfície do solo** de pequenas bacias situadas sobre solos Brunos não Cálcicos Vérticos.

  - O escoamento é multiplicado **por um fator 20** entre as duas situações extremas. O aumento de escoamento provém, sobretudo, do acréscimo do escoamento superficial das pequenas e das médias chuvas, provocado pela supressão da vegetação e da degradação da superfície do solo.

  - Os estudos efetuados pela **ATP PIREN ORSTOM-CNRS-INRA** mostraram toda a complexidade dos fenômenos de circulação hídrica na escala do perfil pedológico e da vertente.

* A informação hidrológica obtida na bacia do **RIACHO DO NAVIO** é menos rica, porque o número de bacias é muito pequeno e seu tamanho (e portanto sua complexidade) é muito grande. A fraqueza relativa de seus escoamentos é vinculada à importância da superfície ocupada pelos Regossolos. Esta bacia foi objeto, em 1979, do primeiro relatório de síntese

final. Ele contém algumas análises e estudos originais que não foram repetidos nos relatórios seguintes. Trata-se do estudo da intensidade e dos coeficientes de redução das chuvas, de uma tentativa de ajustamento de um modelo hidrológico mensal, de um estudo do balanção hídrico de um açude e de uma estimativa da evaporação da represa.

* **JUATAMA** contribuiu com informações sobre o comportamento de **regiões rochosas** cujo potencial hídrico é elevado. Infelizmente, essas regiões são heterogêneas e a segurança estatística que se pode obter com uma **só bacia é**, evidentemente, pequena.

* **IBIPEBA** e as outras bacias "não cristalinas" do **Vale do Jaguaribe** forneceram alguns elementos sobre as **zonas sedimentares** onde se constata escoamentos mais fracos que nas regiões sobre embasamento cristalino [1]. As grandes e as pequenas bacias dessas zonas, cuja hidrologia é complexa, são pouco conhecidas; os dados fornecidos por essas bacias representativas poderão ser o ponto de partida para um estudo hidrológico de base o qual deverá, imperativamente, ser completado com estudo hidrogeológico.

■ Se tivéssemos que recomeçar, o que recomendaríamos?

*** Utilização dos dados da rede geral**

Constatamos, primeiramente, que a informação disponível **das estações da rede geral** e dos **grandes açudes da região** foi muito pouco utilizada. Ora, as grandes bacias integram os escoamentos das pequenas bacias. É útil, portanto, conhecer o comportamento pluviométrico dessas grandes bacias, durante o período de observação das bacias representativas. Permitem uma verificação global da coerência dos dados, a detecção de erros e facilitam a estimativa regional dos parâmetros hidrológicos. TAUÁ possui, por exemplo, os dados do grande açude chamado Várzea do Boi e SUMÉ os do açude Sumé, os quais podem preencher o papel de estações hidrométricas de referência.

*** Um estudo de bacia hidrográfica deve evoluir em função dos resultados obtidos.**

Um estudo de pequenas bacias deve ser um processo que evolui em função dos resultados. Isto implica em um tratamento e uma interpretação rápida dos dados. Temos acesso, atualmente, às facilidades trazidas pelas novas técnicas de tratamento automático e de sensores digitais. Isto deveria permitir definir e organizar, durante o estudo, medições complementares para, por exemplo, validar uma hipótese ou melhorar a estimativa de determinado valor numérico de um parâmetro.

O exemplo das bacias estudadas, mostra bem que, apesar da qualidade e da duração de seus dados, não obstante o nosso conhecimento do campo e dos solos, estamos, ainda, longe de dispor de todos os elementos necessários para explicar, corretamente, as variações que constatamos.

[1] A degradação hidrográfica observada na bacia de IBIPEBA é muito importante. Porém, como transpô-la para outras bacias?

* Tomemos o caso da SUMÉ: os escoamentos são multiplicados por 6, depois novamente por 3, em conseqüência da supressão da vegetação. Qual é a parte desse aumento que se pode atribuir ao desaparecimento da camada interceptadora da vegetação e das folhas mortas ou, ao fato de que o solo, não perturbado pelas raízes e animais, é mais compacto e menos permeável, ou ainda, aos efeitos da degradação de sua superfície? Em que medida se pode utilizar esses resultados para outro tipo de solo? etc.

* No caso da bacia de JUATAMA, na qual identificamos duas zonas que provocam escoamento. Qual é a parte dos escoamentos que provém dos afloramentos de rocha? dos Solonetz? Como extrapolar os resultados para outras bacias?

6.3 ESTIMATIVA DOS ESCOAMENTOS ANUAIS

Para permitir uma utilização dos resultados obtidos nessas bacias foi preciso, primeiramente, elaborar um método de transposição dos escoamentos anuais.

Cada uma das etapas deste trabalho revelou-se rica em armadilhas e problemas, mas, também, em inovações.

■ Zonas climáticas

Como se poderia prever a grande homogeneidade dos regimes pluviométricos no interior das zonas que denominamos "**grandes zonas climáticas**", entre o extremo Norte e o Sul do Sertão, se as perturbações que geram as precipitações são de origens diferentes: frente intertropical no Norte e incursões da frente polar no Sul, enquanto que as datas e mesmo, o número dos períodos chuvosos, são diferentes? **Poder-se-ia predizer a amplitude das diferenças constatadas entre as zonas Sertão e Transição**? Assim, para uma pluviometria anual igual e para um mesmo tipo de bacia, os modelos utilizados indicam um escoamento duas vezes mais forte no Sertão! É preciso realizar, com urgência, a verificação, no campo, dessas variações. É interessante notar que o regime da zona da África tropical compreendida entre as isoietas 400 e 800 mm está muito próximo, segundo nossos critérios climáticos, do da grande zona climática "Sertão". Quantas questões a serem apresentadas aos climatólogos!

■ Modelos e tipologia das bacias

O ajustamento sistemático de modelos de simulação às séries de chuva e de descarga de todas as bacias e a utilização desses modelos, tomando como entrada todos os pluviômetros de qualidade aceitável, permitiram corrigir as anomalias climáticas do período de observação próprio a cada bacia. Propomos, também, uma relação de forma exponencial entre as médias anuais da lâmina escoada obtida por simulação (L) e da pluviometria (P) : $\mathbf{L(P) = L_{600}\, e^{A(P-600)}}$.

Esta relação é válida para valores de P compreendidos entre 400 e 1.000 mm, o que corresponde a toda a zona semi-árida.

L_{600} e A são dois parâmetros que caracterizam globalmente o escoamento calculado pelo modelo e, portanto, a bacia. Estes parâmetros serão a base de nossa tipologia.

Os reagrupamentos de bacias, segundo L_{600} e A, efetuam-se de maneira lógica em relação aos solos e à vegetação dessas bacias : solos pouco espessos e uma vegetação degradada definem um dos polos do reagrupamento; uma forte proteção da cobertura vegetal e/ou uma capacidade de estocagem elevada, caracterizam as bacias do tipo oposto. O grupo de bacias com subsolo sedimentar, destaca-se nitidamente. Pôde-se, então, estabelecer uma tipologia das bacias. A evolução das microbacias de SUMÉ, entre os diferentes grupos, no decorrer da sua degradação e da erosão de seus solos, é muito significativa.

■ Método de transposição

Essa tipologia, apesar da sua coerência, não permite uma quantificação direta dos recursos em água. Conseguimos apoio, para isto, na informação adquirida da rede geral de medição hidrométrica do Nordeste, que aliada à utilização dos mapas de solo da EMBRAPA, permitiu-nos **elaborar um método de avaliação dos recursos em água** de utilização relativamente simples.

O método de transposição que propomos repousa sobre vários postulados:

a) **Validade e limites da modelização e da tipologia das bacias:**
Supõe-se que as reações dos modelos representam corretamente os comportamentos reais das bacias e que as variações do escoamento, calculadas por esses modelos para as diferentes zonas climáticas, refletem a realidade.

b) **Escala dos mapas pedológicos da EMBRAPA e dos mapas detalhados das BHR:**
Supõe-se que a tipologia dos solos elaborada a partir de pequenas bacias, para as quais uma cartografia pedológica detalhada e específica foi realizada dentro de uma ótica hidrológica, pode ser aplicada com a legenda de mapas de reconhecimento realizados em outra escala e dentro de outra ótica.

c) **A degradação hidrográfica:**
Supõe-se que o método proposto de classificação dos solos, integra a degradação hidrográfica que se constata, algumas vezes, quando se considera bacias de superfícies cada vez maiores. Isto por duas razões:

- O Nordeste do Brasil tem uma orogênese ativa. Não existe, nas pequenas e médias bacias, grandes zonas endoréicas.

- Quanto maiores forem as bacias mais os baixios permeáveis e de fraco relevo são importantes[2]; isto explica a redução das lâminas escoadas em função da superfície. Pela sua própria concepção, o sistema de classificação proposto calculará automaticamente essa redução do escoamento. Porém, não existiriam outros fatores?

Agora esse método faz parte de um manual prático, o *"Manual do Pequeno Açude"* (MOLLE e CADIER, 1992), destinado aos programas de extensão rural. Seu emprego requer os valores da superfície da bacia hidrográfica, do total anual das precipitações, da classificação dos solos da bacia, de uma apreciação do estado da cobertura vegetal, da importância dos açudes presentes na bacia e da existência de zonas de retenção de água. Para bacias hidrográficas de superfície superior a 50 km^2, os mapas de solos da EMBRAPA podem ser utilizados, diretamente, para classificar os seus solos. Abaixo deste valor, é preciso efetuar uma verificação ou um reconhecimento cartográfico pedológico sumário.

6.4 ESTIMATIVA DAS CHEIAS

As fórmulas que propomos para o cálculo das descargas de pico *das cheias* têm uma forma muito simples. Elas são, unicamente, função da superfície da bacia e de um fator de correção.

Essas fórmulas correspondem, na realidade, ao "**limite superior**" das vazões mais perigosas. Sua simplicidade se explica da seguinte maneira:

- Fraca variação nas diversas regiões do sertão dos valores das chuvas de período de retorno elevado ou da "**chuva de projeto**".

- A amostragem de bacias, ao nosso dispor, é de tamanho e de variabilidade insuficientes para que se possa estimar diretamente e com uma boa precisão a influência dos fatores clássicos condicionantes das cheias (relevo, forma da bacia e da rede de drenagem, etc.). Levando-se em consideração a ausência de dados consistentes, preferimos incluir a influência desses fatores em um coeficiente corretivo global chamado Fc, de utilização mais simples.

  Um aperfeiçoamento dessas fórmulas exige um estudo da influência dos fatores que condicionam a forma, o volume e a descarga das cheias, papel ainda pouco conhecido no Nordeste.

[2] Em regra geral, os vales do Nordeste do Brasil têm formas menos abertas e as zonas de baixios têm menos importância do que no Sahel africano.

6.5 PERSPECTIVAS E PRIORIDADES PARA A PESQUISA HIDROLÓGICA

Identificamos vários temas de pesquisa que poderiam preencher lacunas nos conhecimentos fundamentais e/ou responder a questões dos usuários.

■ Como organizar as medições?

Em todos os casos, é necessário verificar se já não existem dados que permitam responder à questão. A definição, o roteiro e a duração dos estudos dependerão do objetivo visado. Por exemplo:

* Para entender alguns mecanismos hidrológicos, será necessário efetuar campanhas de medições intensivas, porém, de curta duração, em pontos estratégicamente definidos ao longo do percurso da água na vertente. Ter-se-á todo interesse em escolher locais para os quais já se disponha de informação, por exemplo, uma das antigas BHR.

* Organizar o monitoramento hidrológico de um número importante de pequenos açudes, escolhidos para evidenciar as diferenças de comportamento entre eles.

* Organizar um estudo *clássico de Bacia Hidrográfica Representativa.*

* Utilizar a informação fornecida pelas estações da rede geral e pelos grandes açudes, cujas bacias integram os escoamentos de toda uma região.

■ Como aperfeiçoar a estimativa dos escoamentos anuais?

Mostramos que cinco fatores principais influenciam o escoamento anual de uma pequena bacia:

. Os solos: o estado de conservação de sua superfície e as características das suas camadas mais profundas.
. O estado da vegetação.
. O gradiente de permeabilidade de montante para jusante; as zonas de retenção de água.
. O número e o tamanho dos açudes.
. A pluviometria anual e a zona climática.

As pesquisas destinadas ao aperfeiçoamento da estimativa dos escoamentos anuais deverão ser, naturalmente, concebidas para melhorar o conhecimento do papel desses fatores. Eis alguns exemplos:

■ O estudo dos fatores solo e vegetação:

É preciso, primeiramente, definir claramente o objetivo da pesquisa, por exemplo:

* Pode-se querer conhecer melhor, por exemplo, o comportamento de um tipo de solo e de suas variantes. Tomemos o caso dos **Planossolos**; eles cobrem 8% do Nordeste. Será que todos eles têm efetivamente uma L_{600} próxima dos 70 mm, como indicado no método? Se não for o caso, quais são os critérios de discriminação? Pode-se reconhecer suas características sobre imagens de satélite? Quais são os valores de L_{600} que se pode esperar das diferentes variantes? De que forma os Planossolos do Estado da Bahia são semelhantes aos do Ceará, cartografados em uma outra época, com técnicas diferentes?

* Pode-se tentar responder a questões análogas para os solos **Brunos não Cálcicos** ou **Litólicos**, que representam uma grande parte dos solos das regiões onde se constrói açudes? É urgente que se conheça melhor os solos com **afloramentos** e os solos **Podzólicos**, cujos escoamentos variam muito.

* É importante uma melhor compreensão dos mecanismos de retenção da água ao longo das vertentes, identificar situações típicas e estudar as condições de extrapolação dos resultados.

* A influência da **vegetação** deve ser considerada sob vários aspectos:

  - O que acontece quando ela é suprimida ou quando uma vegetação volta a brotar?

  - Quais são os efeitos dos diversos tipos de cultivo e de práticas conservacionistas?

▪ As zonas climáticas

É preciso efetuar, com urgência, medições visando a comparação dos comportamentos de bacias semelhantes situadas em zonas climáticas diferentes.

▪ O papel dos açudes na hidrologia

O número atual de açudes, no Nordeste, é tão grande que se pode considerar como fazendo parte da "*atual paisagem natural*". Sua construção é efetuada de maneira descontrolada e em ritmo acelerado. É, portanto, imprescindível melhor compreender, integrar e monitorar regionalmente essas represas. Para isto, é preciso estudar vários aspectos de sua influência:

* Conhecer seu número, sua densidade, a lei de distribuição de seu volume, etc. Utilizar-se-á, vantajosamente, as facilidades oferecidas pelo sensoriamento remoto. Assim, por exemplo, uma imagem obtida depois de uma estação de chuvas muito fortes, permitirá conhecer os tamanhos máximos dos espelhos de água de todos os açudes que transbordam. Uma imagem obtida após um período de vários meses de estiagem, e cuja evaporação é conhecida, fornecerá uma primeira estimativa dos coeficientes de abertura definidos por MOLLE (1991) e, portanto, o volume estocado.

* Uma modelização de funcionamento de grandes bacias hidrográficas permitirá determinar as densidades regionais de açudes que não deverão ser ultrapassadas. Essas densidades máximas variam de acordo com a definição do manejo global dos Recursos Hídricos das grandes bacias.

* Enfim, é necessário aprimorar as normas de dimensionamento dos açudes.

▪ A estimativa das descargas de pico das cheias

A fórmula de descarga de cheia que propomos é um limite superior bastante grosseiro das descargas de pico. Como aperfeiçoar essa fórmula? A descarga de pico é função dos dois coeficientes **Kx e Le**.

- O coeficiente **Kx** é, provavelmente, aquele cuja precisão pode ser melhorada da maneira mais fácil e rápida; ele é função do tempo de base. Para tentar encontrar fatores explicativos do tempo de base (forma da bacia, relevo, rugosidade do leito, etc.), pode-se registrar a forma dos limnigramas do maior número possível de rios e determinar, diretamente, seus tempos de base, sem ter que calibrar as estações, que é a operação mais dispendiosa.

- Infelizmente, acontece que uma estação de chuva muito forte acarreta, muitas vezes, o rompimento de numerosos açudes em uma região. O estudo das causas do rompimento, e a estimativa da frequência das cheias e das descargas máximas podem, também, ajudar no aperfeiçoamento das fórmulas.

- Observa-se, muito freqüentemente, rompimentos "*em cascata*" de açudes. Seria conveniente adotar e simplificar os métodos teóricos de cálculo **de propagação de cheias brutais**, para melhor controlar este tipo de fenômeno. Isso deveria ser feito simultaneamente a um estudo de amortecimento das cheias nessas represas.

▪ Transporte de materiais

Existem poucos dados sobre as variações das concentrações de **sais** e **materiais dissolvidos**.

- Uma análise sistemática de amostragens das águas das represas pode permitir uma comparação da qualidade da água com o tipo de bacia. Utilizar-se-á, com vantagem, medições realizadas logo após uma estação de chuva abundante que tenha "*lavado*" os sais contidos nessas barragens. Nesse caso, a salinidade não deverá ser muito diferente de sua média anual.

- Um monitoramento das variações da carga química das águas, durante o ano, é necessário para a modelização da qualidade da água das represas.

No que se refere ao transporte de materiais sólidos, as medições em parcelas de erosão e em estações da rede geral são, certamente, necessárias. Poder-se-á, com vantagem, efetuar a cubagem dos sedimentos depositados nos açudes (assoreamento), estudando aqueles cuja data de construção e características fisiográficas da bacia de alimentação são conhecidas. Aconselhamos estudar açudes superdimensionados.

▪ Técnicas de modelização

Em hidrologia, os modelos constituem um instrumento que, bem utilizado, propiciam a valorização, ao máximo, dos dados recolhidos. Tais modelos permitem, em particular, corrigir as anomalias climáticas do período de observação que é, geralmente, curto demais. Proporcionam, igualmente, simular condições extremas (cheias, secas).

As medições de campo devem ser concebidas para responder às questões dos modelizadores ou para validar seus modelos. Pode se tratar, por exemplo, de medições hidrodinâmicas na escala do perfil pedológico, ou de medição em grande bacia ou, ainda, de ajustamento da informação contida nas imagens de satélite com a realidade do campo.

Deve-se, igualmente, aperfeiçoar as técnicas de concepção e de ajustamento dos modelos.
Os modelos que utilizam o conceito de discretização espacial das grandes bacias, poderão utilizar, com vantagem, os resultados obtidos nas bacias representativas.

▪ Extensão da pesquisa para regiões fora do semi-árido e para bacias de maior tamanho.

É necessário realizar os estudos que permitam estender o método de transposição proposto para as regiões mais chuvosas do Nordeste, bem como, para as bacias de maior superfície.

▪ Organização da pesquisa

Indicamos alguns exemplos de pesquisas que se referem, especificamente, à hidrologia das pequenas bacias. Outras pesquisas, também urgentes, podem permitir aperfeiçoar o conhecimento e o manejo dos recursos em água da Região Nordeste, freqüentemente castigada por **secas ou inundações catastróficas.**

É imprescindível, primeiramente, conhecer esses recursos. É urgente reabilitar a **rede geral de medições hidroclimatológicas do Nordeste** que é, atualmente, apenas uma sombra de si mesma. É imperioso, igualmente, utilizar as técnicas de **sensoriamento remoto** e as perspectivas oferecidas pela **previsão climática** em todas as escalas do tempo.

Para tornar essas pesquisas operacionais é indispensável estabelecer, claramente, prioridades a médio e a longo prazos. São necessários, também, **mecanismos institucionais que garantam** todos os recursos humanos e materiais necessários à plena execução dos programas escolhidos.

POSFÁCIO DE JEAN RODIER

Jean Rodier foi o fundador do Serviço Hidrológico do ORSTOM, que ele próprio dirigiu entre 1947 e 1975.
Foi presidente e secretário da A.I.H.S. (Associação Internacional de Ciências Hidrológicas) e responsável por grupos de trabalho do SHF (Société Hydrotechnique de France).
Foi ele, também, quem impulsionou a implantação de 250 Bacias Hidrográficas Representativas na África.

Um feliz acaso permitiu-nos, recentemente, estudar detalhadamente três sínteses regionais sobre as cheias e/ou o escoamento anual, enquanto concluíamos a preparação de uma quarta síntese nesse gênero. Todas objetivavam a utilização de uma informação de qualidade muito variável para elaborar metodologias destinadas a promover o desenvolvimento de países tropicais. Elas tinham como finalidade chegar a formulações simples destinadas a usuários que jamais seriam os hidrólogos profissionais .

Neste contexto, encontramo-nos em boas condições para entregar-nos a algumas reflexões sobre as técnicas utilizadas por Eric Cadier em seu excelente trabalho e sobre suas motivações. Isso levou-nos, no presente posfácio, a insistir sobre alguns pontos dos quais muitos hidrólogos interessados poderão tirar proveito.

■ Técnicas utilizadas

Para elaborar metodologias simples, a partir de dados incompletos e geralmente em quantidade insuficiente, existem, ao menos, duas maneiras de ter êxito. Comecemos pela menos **recomendável**: proceder a um rápido e incompleto exame da informação disponível e propor fórmulas muito simples estabelecidas a partir de pouquíssimos elementos.
A **recomendável**: adotada pelo autor, consiste em proceder a uma análise tão apurada e rigorosa quanto possível dos fenômenos do escoamento, utilizando a fundo, como disse Pierre DUBREUIL, suas faculdades de historiador, enciclopedista e analista; depois, sobre essas bases sólidas, estabelecer fórmulas de fácil utilização, desprezando, de início, os fatores considerados secundários; é um problema delicado, porém, nosso autor mostrou-se hábil. A seguir, ele indica como utilizá-los. O contraste é tão surpreendente entre a complexidade da análise e o caráter simples, diríamos mesmo, algumas vezes sumário, da metodologia proposta, que um exame rápido não permite, absolutamente, avaliar a amplitude do trabalho científico que a fundamenta e que lhe fornece muito mais segurança do que parece à primeira vista.

A abordagem científica para a elaboração dessas sínteses depende:

- do caráter dos fenômenos a estudar,
- da natureza da informação disponível,
- do que é necessário para satisfazer às exigências de seu desenvolvimento.

A melhor maneira de evidenciar a abordagem científica escolhida pelo autor seria compará-la àquelas que foram adotadas em algumas sínteses sobre o Sahel africano. Existe certo número de características comuns entre o Nordeste brasileiro e o Sahel no campo da hidrologia, da informação disponível e das necessidades de novos conhecimentos hidrológicos pelos usuários. Além disso, como Eric Cadier não pôde comparar, como desejaria, as pesquisas feitas nas duas regiões, esperamos com este posfácio fornecer alguns complementos.

O NORDESTE E O SAHEL : SEMELHANÇAS E DIFERENÇAS

Retomando os três conjuntos de condições que regem a abordagem científica, e que foram apresentadas anteriormente, compararemos rapidamente os regimes das precipitações e do escoamento, a natureza e o volume dos dados requeridos pelos usuários da informação hidrológica, insistindo nas diferenças que impõem variações nas soluções escolhidas.

■ Pluviometria : regimes comparáveis

Para a região saheliana, acima da isoieta anual de 400 mm, a distribuição das chuvas e sua natureza são mais ou menos as mesmas, aliás em seu anexo 4, o autor encontrou aproximadamente os mesmos escoamentos, no Nordeste e no Sahel, com o modelo SUDENE-ORSTOM; convém, ainda, notar que ao se eliminar os pluviômetros africanos ao Sul do limite do Sahel (existem sete, dos 17 utilizados), os escoamentos são, sensivelmente, os mesmos.
No entanto, os critérios adotados para os anos secos e sobretudo para as lâminas escoadas decenais para 3 anos consecutivos secos mostram que os períodos de chuva deficitários são, realmente, mais fracos no Nordeste do que no Sahel. A natureza dos períodos secos impõe, então, para os estudos, séries de observações muito mais longas para o Nordeste do que para o Sahel.

■ Relevo e solo: as declividades são mais fortes no Nordeste

As diferenças essenciais estão no relevo e no solo. No Sahel existem poucos verdadeiros maciços montanhosos (o deserto está excluído). Desde que as bacias atinjam 40 km^2, e às vezes menos, as declividades médias são muito moderadas e, algumas vezes, muito fracas, o que aliás conduz à degradação hidrográfica que começa, em certos casos, para bacias menores que 5 km^2. Ora, a influência da declividade sobre a lâmina escoada e sobre o tempo de base é sensível, sobretudo, quando as declividades são inferiores a 1,5-2% (Ig = 15-20 m/km).

Acima disso, o aumento dessas duas características é muito mais fraco. Quando a declividade passa de 3 a 4%, por exemplo, (Ig de 30 a 40), o aumento relativo da lâmina escoada é fraco: bem menos de 10%. Enquanto que, no Nordeste, as declividades são bem mais fortes para bacias de igual superfície. Isto explica que se tenha levado em conta o fator declividade no Sahel, enquanto se pôde desprezá-lo no Nordeste. As fracas declividades do Sahel fazem com que os locais a jusante sejam, muitas vezes, cobertos de materiais muito finos, portanto, impermeáveis, enquanto no Nordeste manifesta-se mais como aluviões permeáveis na parte inferior das toposeqüências e no leito maior dos rios. Além disso, a degradação hidrográfica é quase desprezível.

■ Solos : no Nordeste os solos truncados e as películas de superfícies impermeáveis são mais raras

No Sahel, os solos truncados são freqüentes, os Regossolos e os Vertissolos igualmente, e é muito raro que suas fendas de retração não tenham tempo de se fechar durante a estação das chuvas; além disso, a maior parte dos solos estão cobertos de uma película impermeável, desde o início da estação das chuvas (Valentin).

Apesar da presença bastante freqüente de areias eólicas permeáveis, pode-se dizer que os solos são, geralmente, pouco permeáveis. Isso tende a impor, como ponto de partida, para a função de produção, as propriedades dos "*estados de superfície*" do solo, e não as dos solos. Ficamos no domínio de utilização da metodologia do hidrograma unitário ,uma vez que o escoamento superficial é muito freqüente.

No Nordeste, existem, também, solos truncados, Solonetz e outros solos pouco permeáveis, porém, em geral, mesmo considerando-se o substrato cristalino, as associações de solos não são muito impermeáveis. Como se viu anteriormente, a parte inferior dos interflúvios e os leitos maiores dos rios são, muitas vezes, permeáveis. Em média, as bacias cristalinas são realmente mais permeáveis. Para as bacias sedimentares a infiltração é, ainda maior. Isso conduz a considerar de maneira um pouco diferente a influência dos solos.

■ Vegetação : a caatinga assegura uma proteção importante aos solos

A vegetação natural, pelo menos a cobertura arbustiva já está em grande parte desaparecida no Sahel. Parece certo que a caatinga natural do Sertão protege, muito mais, os solos, da chuva, do que a vegetação rala africana ou mesmo as culturas no início da estação das chuvas. Eis porque, no Sahel, embora não se despreze a vegetação, não se dá muita importância a sua influência.

Enfim, à primeira vista, não existem diversidades regionais no Sahel, exceto a diminuição sistemática das precipitações anuais do Sul ao Norte.

■ Quantidade e qualidade da informação : pluviométrica e hidrológica

A informação pluviométrica e hidrológica era muito mais importante no Nordeste do que no Sahel no que diz respeito aos dados das redes. Resulta daí que o desenvolvimento das bacias representativas se impõe menos nesta última região. Mas, a qualidade da informação, muito variável, impôs um processamento muito rigoroso dos dados, o que exigiu numerosos anos e o autor do presente trabalho procedeu a uma análise detalhada e a uma seleção draconiana.

No entanto, essa informação oriunda da rede pôde ser utilizada, apesar de tudo, para elaborar a metodologia de cálculo do escoamento anual, no lugar da informação procedente das bacias representativas do Nordeste, apesar da contribuição relevante dos açudes.

Para as cheias, os dados da rede geral do Nordeste eram menos confiáveis do que os das numerosas bacias representativas do Sahel, o que não permitiu uma análise mais apurada, no Brasil.

■ Quantidade e qualidade das informações pedológica e geológica

No que se refere à **informação pedológica**: no início não existia nenhuma cobertura cartográfica pedológica ou geológica geral. Isto explica porque Dubreuil, no Nordeste, da mesma forma que Dubreuil e Vuillaume, no Sahel, apoiaram-se, para calcular o escoamento anual, sobre o substrato geológico, com a secreta esperança de que a cada substrato corresponderia uma associação de solos bem determinada. Isso é exato, numa certa medida, porém, um subsolo cristalino do Sahel pode conduzir tanto a um solo de erosão muito impermeável como a montões de blocos muito permeáveis.

Muitos anos após, dispõe-se de mapas pedológicos e, enfim, passou-se a ter interesse pelos estados de superfície dos solos para os quais não existem, ainda, mapas gerais (pois, haveria um problema de escala). Porém, após os inúmeros estudos e pesquisas realizados por Valentin e os experimentos extensivos, muito numerosos, de Casenave e Valentin com o minissimulador de chuva, dispõe-se agora, na África, de um excelente catálogo dos estados de superfície com um conjunto de fichas que indicam as características hidrodinâmicas dos mesmos. No Nordeste, dispõe-se agora dos mapas pedológicos, detalhados, para as bacias representativas e dos mapas gerais da EMBRAPA que permitem determinar as **Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP)** (conjunto de solos), ou mesmo, **Tipos de Solos (TS)**, bem como dos arquivos correspondentes. Esses mapas têm por objetivo o mapeamento do valor agronômico dos solos mas, geralmente, pode-se tirar proveito desses mapas, exceto para bacias muito pequenas. Nada existe para os estados de superfície, mas isto tem menos importância para o Nordeste do que para o Sahel.

Para as pequenas bacias não monitoradas, a qualidade da informação pedológica não está em melhores condições do que no Sahel, no entanto, é possível que no Nordeste não se encontre essa infinidade de pequenas parcelas de solos truncados e/ou erodidos que tornam a cartografia tão difícil.

A metodologia elaborada por Eric Cadier está, com toda certeza, estreitamente ligada à natureza da informação disponível.

■ Divergência entre os objetivos dos estudos hidrológicos nas duas regiões

As necessidades dos usuários podem ser resumidas como segue: no Nordeste, é preciso encher os açudes e que, na medida do possível, eles possam fornecer água no período seco.
No Sahel, no início, os primeiros trabalhos dos hidrólogos foram realizados depois de anos de fortes cheias que aconteceram após o período de seca 1940-45 e ao mesmo tempo que a expansão da rede rodoviária. A destruição de numerosas barragens e pontes tinha sensibilizado os técnicos e os estudo das cheias era totalmente prioritário sem que a necessidade de encher as barragens fosse perdida de vista. A premência de estudar períodos secos de vários anos, só surgiu com a seca de 1970-86.

■ Quais foram as sínteses que puderam, finalmente, ser realizadas?

Levando-se em conta o que precede, quais são os estudos de síntese que foram realizados nas duas regiões concernentes aos dois elementos essenciais na prática: o escoamento anual e as cheias?

Para o escoamento anual:

No Nordeste, os trabalhos de síntese visaram o valor médio, porém, mais particularmente a distribuição freqüencial das lâminas escoadas anuais e os anos secos consecutivos. No Sahel, foram realizados diversos estudos sobre o escoamento anual médio e, algumas vezes, sobre o escoamento decenal seco. Um rápido estudo geral do escoamento médio anual foi efetuado por DUBREUIL e VUILLAUME (1975), com uma fórmula interessante mas que não pode ser desenvolvida aqui. A seca que começava no início dos anos de 1970 impôs um estudo mais completo (J. Rodier, 1975) relativo não somente à média da lâmina escoada como, também, a sua distribuição freqüencial, com um pequeno complemento considerando a não independência das lâminas escoadas anuais e, conseqüentemente, séries de anos secos.

Para as cheias:

No Nordeste, elas não foram negligenciadas, no entanto, seu estudo não teve prioridade absoluta. No Sahel, desde 1965, efetuou-se a primeira síntese para o estudo das cheias decenais (RODIER-AUVREY, 1965). Uma verdadeira síntese foi retomada por RODIER-RIBSTEIN (1986-88), com muito mais informações. Ela acaba de ser concluída para as bacias de 10 a 2.500 km ^{2} (RODIER,1993); trata-se, no entanto, de uma análise dos parâmetros das cheias. Vários elementos de metodologia e os principais métodos de cálculos permaneceram os mesmos de 1965. Um manual e um arquivo estão em elaboração pelo CIEH. Um trabalho muito importante foi, portanto, efetuado a respeito das cheias decenais e, aliás, sobre todas as bacias representativas, cujo equipamento e organização de trabalho tinham sido concebidos para obter dados necessários ao estudo das cheias.

■ Crítica e análise dos dados hidropluviométricos

Quanto à análise dos dados nas duas regiões, tanto por parte de toda a equipe franco-brasileira quanto, na África, por Y. Brunet-Moret e seus sucessores, foi enfatizada a grande importância dos dados pluviométricos e foram envidados muito esforços. No Nordeste, havia, além do mais, um grande volume de dados hidrométricos analisados. Tudo isto representou um enorme trabalho. Para o presente estudo, Eric Cadier baseou-se nessas informações; ele procedeu a uma seleção muito rigorosa, escolhendo apenas 156 estações pluviométricas de boa ou excelente qualidade, dentre um total de 2.200, e 15 estações de medições de descarga dentre um total de 35, entretanto, o autor demonstrou que fazia o impossível para não perder informações e, não hesitou em preencher as lacunas, quando podia fazê-lo com segurança. Porém, esse trabalho de análise e de controle de dados é a base de toda pesquisa séria e o autor insiste, com razão, na extrema importância do prosseguimento das observações nas redes hidropluviométricas.
No Sahel, o volume de dados a manipular era menor, porém, os dados pluviométricos da maior parte da África Ocidental e de uma parte da África Central, foram processados ao mesmo tempo. Os dados hidrométricos das redes foram de difícil recuperação e constituiram pequeno volume de trabalho.

■ Zoneamento climático

Um zoneamento climático tornou-se necessário, para efetuar o estudo do escoamento e das cheias, particularmente no Nordeste onde, a priori, poder-se-ia esperar um número elevado de zonas com regimes diferentes, devido à influência do relevo. No final, o autor só encontrou duas grandes zonas climáticas diferentes, cada uma correspondendo a alturas de precipitações anuais variáveis.
No Sahel, desde o início, considerou-se que aquela região correspondia a um conjunto homogêneo. No entanto, no decorrer dos estudos, duas zonas puderam ser diferenciadas no conjunto: o litoral, com chuvas de tipos diferentes, e o delta central do Niger onde as precipitações, em ano seco, são muito mais fortes. Se os estudos tivessem sido retomados no Sudão, certamente ter-se-ia encontrado uma terceira zona, devido à influência da altitude.

TRANSPOSIÇÃO DOS ESCOAMENTOS ANUAIS: COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS

■ Princípio da transposição dos escoamentos anuais no Sertão

O estudo do escoamento anual deve permitir o desenvolvimento de um método de transposição. Para isso, o autor cumpriu duas etapas.

Na **primeira etapa**, ele concebeu e ajustou um modelo para as bacias representativas e alguns açudes, calculando a lâmina escoada diária Le em função da altura da precipitação diária e do índice de umidade IK, no qual a obtenção de Le era definida por três hipérboles para três valores de IK. Os parâmetros dessas hipérboles deviam ser transportados para bacias não observadas.
Numa **segunda etapa**, o estudo utiliza as estações da rede geral para deduzir os valores da lâmina escoada anual a serem atribuidos a cada tipo de solo, a partir das lâminas observadas e dos solos

existentes em cada bacia da rede. Essa modificação da abordagem é justificada, em grande parte, para poder colocar à disposição dos usuários, uma metodologia de aplicação mais fácil baseada nos **mapas pedológicos existentes**. Essa preocupação é bastante rara entre os pesquisadores. Os resultados oriundos desta segunda etapa são válidados, posteriormente, com os resultados obtidos nas bacias representativas.

■ Princípios da transposição dos escoamentos anuais no Sahel

No Sahel, a situação era mais simples, não se podia recorrer aos dados da rede hidrométrica visto que esta não existia, praticamente, antes de 1955 e, mesmo em 1975, a utilização dessa rede para as bacias de 500 a 1.000 km^2, só trazia uma ajuda preciosa, mas complementar.
Usou-se, exclusivamente, bacias representativas, porém,não se estava muito mais avançado do que Eric Cadier no fim da primeira parte de seu estudo, porque no Sahel não existe nenhum mapa geral dos estados de superfície, como também, no Nordeste, não existe nenhum mapa pedológico detalhado.

■ Comparação de técnicas utilizadas

Abordemos um pouco mais detalhadamente nossa comparação.

Modelização.

Nos dois casos, elimina-se o fator chuva anual, reduzindo, todas as características do escoamento, a uma pluviometria anual Panual = 600 mm, no Nordeste, e para um Panual = 400 mm, no estudo saheliano dos módulos em 1975. Isso foi realizado de forma mais rigorosa no caso nordestino que estabeleceu uma fórmula original $L(P) = K\, e^{AP}$ para representar a lâmina escoada anual em função das precipitações, enquanto que, no Sahel, teve-se que utilizar o acervo de curvas estabelecidas para precipitações anuais, variando entre 300 e 750 mm, por incremento de 50 mm, para uma bacia permeável de 25 km^2 e para uma bacia impermeável, igualmente, de 25 km^2. Em seguida, pede-se ao usuário para fazer o possível para interpolar entre esses acervos de curvas (existe, também, dois outros acervos para 5 km^2).
A análise da função de produção para as chuvas diárias, que deve anteceder a operação precedente, repousa, nos dois casos, sobre modelos simples (chuva-deflúvio), sendo a do Nordeste mais recente e inspirada na primeira.
No Sahel, utiliza-se o modelo chamado "simplificado" de Girard, que emprega a precipitação diária e um índice de precipitações anteriores. Esse modelo apresenta uma precisão regular a nível diário, porém o total anual é suficientemente preciso: ele foi utilizado para o caso de uma bacia impermeável e para uma bacia permeável. Interpolamos entre essas duas situações (e, algumas vezes, extrapolamos para as bacias muito impermeáveis ou muito permeáveis) para estimar, em diversos tipos de bacias, as distribuições dos escoamentos anuais, levando em conta os escoamentos verificados nessas bacias onde, felizmente, foram observados, com freqüência, anos muito secos ou muito úmidos.
No Sertão, foi utilizado o modelo SUDENE-ORSTOM, forma aperfeiçoada do modelo precedente; como o primeiro, ele emprega (**Le**), a precipitação diária (**Pm**) e um índice (**IK**) como foi exposto anteriormente. Ajustam-se os parâmetros das três hipérboles, base deste modelo, às 42 bacias representativas e aos açudes. Teoricamente, esse problema de ajustamento é insolúvel, em razão do

número elevado de parâmetros e da quantidade insuficiente da amostragem de escoamentos diários, para um bom número de bacias. Porém, e é aí que o autor mostra toda a sua habilidade, ele não modifica, ou, apenas muito pouco, o traçado das curvas iniciais obtidas graficamente e faz intervir noções adquiridas no momento da interpretação direta dos dados, podendo, assim, reduzir, consideravelmente, o número de parâmetros. Aliás, ele controla, efetivamente, o ajustamento através de dois programas que, empregados sem precauções, conduziriam, muitas vezes, a resultados absurdos no plano físico. É o caso, infelizmente, pouco freqüente, em que o hidrólogo controla o que faz seu computador, em vez de ser estritamente guiado, ou mesmo, algumas vezes, dominado por ele. Aqui, um pouco como no Sahel, parte-se de um pequeno número de hipérboles muito seguras e tenta-se fazer o possível apoiando-se nessas curvas bem estabelecidas; mas, que diferença de rigor entre essa abordagem e a nossa no Sahel! É verdade que mais de 15 anos separam as duas!
Definiu-se, assim, no Nordeste, certo número de pontos da curva de distribuição dos escoamentos para cada bacia, com as precipitações anuais corrigidas para o padrão de 600mm. Proporcionou-se, além disso, a obtenção da lâmina escoada acumulada em três anos secos consecutivos enquanto que, no Sahel, não se calculou essa última característica, tão útil no Sertão.

Pesquisa dos fatores condicionantes

Resta explicar esses resultados e compará-los com as características físicas das bacias.
No que concerne à influência da **superfície**,no Nordeste, ela é bastante fraca, sendo, muitas vezes, mascarada por outros fatores mais importantes. Não existe ou existe muito pouca degradação hidrográfica, em conseqüência de um relevo mais acentuado. No caso em que o leito maior tem um papel mais marcante, deve ser aplicado um coeficiente de correção.

No Sahel, ao contrário, **a superfície tem um papel importante**. Em 1975, fomos obrigados a definir uma classificação por categorias de superfície e representamos a categoria 2 a 40 km^2 através de duas superfícies-padrão com 5 km^2 e 25 km^2; esta categoria utiliza, exclusivamente, dados de bacias representativas. Cabe ao usuário interpolar entre os diagramas de distribuição do escoamento dessas duas séries, bacias de superfície-padrão.
Para a categoria seguinte: 40 a 300-350 km^2, são apresentados, apenas, alguns exemplos.

Quanto à **influência da declividade** ou do relevo, ela é admitida no Sahel, porém se dá um só exemplo de pequena bacia permeável com fraca declividade, caso onde a influência da declividade é preponderante.
Tanto a declividade como a cobertura vegetal só são consideradas nas correções e de maneira qualitativa, quando apresentam valores extremos. No Nordeste, a declividade não tem um papel importante, visto que, como foi explicado anteriormente, um aumento de declividade, para um relevo bastante marcado só conduz a um pequeno aumento do escoamento, ao contrário do que ocorre, em geral, no Sahel que é muito mais plano.

A cobertura vegetal tem um papel mais importante no Nordeste do que no Sahel, provavelmente, porque ela é mais densa naquela região brasileira. Na primeira etapa dos estudos de transposição, ela intervém com um coeficiente CVEG na fórmula geral de cálculo da lâmina escoada L_{600}. No Sahel, ela só intervém nos casos extremos, de uma maneira qualitativa.

Os solos: fator condicionante essencial

Os solos nas duas regiões desempenham um papel essencial. No Sahel, em 1975, quando apenas suspeitávamos da influência dos estados de sua superfície, utilizávamos os solos de uma maneira imperfeita, visto que as bacias eram pouco homogêneas e faltavam, também, mapas pedológicos regionais com uma classificação de solos efetuada em função de suas características hidrodinâmicas. Resultou, pois, ter-se escolhido uma solução global que se revelou pouco satisfatória. As curvas de distribuição do escoamento eram propostas para bacias-tipo ou bacias-padrão correspondentes a uma paisagem definida por um conjunto de solos ou de associação de solos e um conjunto de declividades. Essa paisagem corresponde um pouco às Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP) dos mapas da EMBRAPA, mas com uma definição menos restritiva. Assim, uma bacia-tipo pode compreender várias UMP. Essas bacias-tipos estão mais ou menos ligadas ao substrato pedológico, porém, para um determinado substrato, pode haver várias bacias-tipos de natureza totalmente diferente. Tudo isso é um pouco primitivo, comparado ao trabalho efetuado no Nordeste.

Na primeira etapa dos estudos dessa última região, os solos foram considerados através de uma classificação empírica, baseada nas suas características hidrodinâmicas e isso se traduz por uma fórmula que dá L_{600} em função dos coeficientes CSOL e CVEG ligados quantitativamente às classes de solos e de vegetação. O grande inconveniente dessa classificação é que para estabelecer CSOL é preciso uma cartografia pedológica detalhada, que só existe, na realidade, nas bacias representativas. Seria, portanto, bastante ariscado para os usuários empregar a fórmula L_{600} para bacias não observadas, a menos que se dispusesse de um pedólogo experiente.

Isso conduziu nosso autor a abordar **uma segunda fase**, tendo como ponto de partida a possibilidade de utilizar mapas pedológicos existentes na EMBRAPA (isso, porém, não pode resolver o caso das bacias muito pequenas). É necessário, então, ter como base essa segunda análise sobre bacias da rede hidrométrica.

Depois da seleção de 15 bacias da rede geral, da extensão dos períodos de observação por uma relação Lr = f (P) e da homogeneização dos dados, determina-se diretamente o escoamento médio Loh de cada bacia, a partir da série completa de escoamento restabelecida e homogeneizada. Depois, tenta-se reconstituir o mesmo valor de Loh médio, a partir dos escoamentos de cada Tipo de Solo (TS) ou da Unidade de Mapeamento Pedológico (UMP). Com efeito, são os escoamentos características de cada TS ou UMP que se procura determinar, conhecendo as L_{600} das bacias que correspondem ao somatório das L_{600} de cada UMP ou TS, ponderada pela superfície relativa que eles ocupam em cada bacia. Passa-se de L_{600} para qualquer altura de precipitação média, pela mesma fórmula elaborada desde o início do estudo e vice-versa.

O ajustamento é feito com o mesmo domínio e o mesmo espírito prático que para as bacias representativas. No início, o autor utiliza as ordens de grandeza de valores de L_{600} para as UMP e TS, dos quais ele pôde ter uma idéia por ocasião de estudos anteriores.

Com os valores de L_{600} correspondendo às UMP e aos TS, é fácil calcular L_{600} para a bacia, depois de calcular a L(P)_comparável a Loh; encontram-se valores muito próximos. Finalmente, obtém-se uma fórmula que apresenta L_{600} da bacia, em função das L_{600}, das UMP ou dos TS.

Essa operação não foi possível no Sahel, pois a fraca densidade das estações pluviométricas e o número muito pequeno de estações hidrométricas, além da brevidade de seus períodos de observação,

interditaram qualquer trabalho sistemático análogo. No entanto, o fato de que, durante o período de observação, se constatou tanto anos muito secos como muito úmidos, propiciou efetuar, com alguma temeridade, uma estimativa da distribuição freqüencial dos escoamentos, que permitiu o traçado, para superfícies superiores a 40 km^2, de certo número de curvas de distribuição de rios considerados padrões, repartindo-os entre duas categorias: bacias sobre granito e granito-gnaisses e bacias sobre solos diversos, geralmente sedimentares, os quais, contrariamente aos do Nordeste, não são os mais permeáveis.

Utilizava-se uma mistura de bacias representativas e de estações da rede para a categoria de 200 a 500 km^2 e, quase unicamente, postos da rede geral para bacias de 1.000 a 10.000 km^2. Propunha-se exemplos, porém, não se ditava regras para a transposição; é preciso dizer que não existia o equivalente aos mapas e arquivos da EMBRAPA.

O trabalho de Eric Cadier marca um progresso enorme, em relação ao que foi feito no Sahel em 1975, sobretudo para as bacias de superfície superior a 40 km^2.

■ Método de transposição proposto ao usuário

Exporemos aqui apenas os princípios da metodologia: na prática, é um pouco mais complicada. A lâmina escoada no Sertão é calculada, em primeiro lugar, a partir da altura da precipitação anual e dos tipos de solos ou de unidades de mapeamento pedológico, e isso se traduz por uma fórmula estabelecida de maneira rigorosa. Complementa-a uma série de correções que fazem intervir a cobertura vegetal, a presença de açudes e de solos arenosos no leito maior dos rios (no Sahel, isto seria: a degradação hidrográfica).

Encontra-se aqui uma prática que é usual de maneira mais ou menos nítida em certos autores e que concilia o caráter rigoroso da hidrologia moderna com o saber-fazer e, algumas vezes, até a intuição de certos hidrólogos antigos. Em sua forma mais elaborada, a parte rigorosa da metodologia é um conjunto de fórmulas estabelecidas, por exemplo, a partir de regressões e com um número muito pequeno, até demasiado pequeno, de parâmetros. Essas fórmulas são válidas para condições médias e, dão resultados regulares ou mesmo ruins, quando as condições se afastam do normal. Ajunta-se a esse cálculo objetivo, uma série de correções que pode se apoiar, algumas vezes, em um questionário (Check List), para considerar fatores que não intervieram na primeira parte da metodologia.

Esa segunda parte é, algumas vezes, relativamente subjetiva. Eric Cadier não o esconde, mas ela pode evitar erros de 100% e, algumas vezes, mais. Essa prática parece-nos bastante recomendável.

O ESTUDO DAS CHEIAS

Para o estudo das cheias, ao contrário do escoamento anual, a situação é melhor no Sahel, e issto por duas razões.

Por um lado, foi possível implantar, em pouco mais de 30 anos, cerca de 130 bacias representativas, todas elas equipadas e exploradas de maneira a permitir o estudo das cheias, mesmo que não fosse esse o objetivo prioritário. Por outro lado, uma série de pesquisas detalhadas complementadas por pesquisas extensivas, permitiu adquirir um bom conhecimento dos estados de superfície e da sua influência sobre o escoamento superficial.

Como foi exposto anteriormente, as superfícies impermeáveis são muito mais freqüentes no Sahel. Por exemplo, para uma precipitação próxima de 100 mm, para um valor de Ig=25m/km, para uma superfície de 5 km^2 e para estados de superfície que embora não sejam excepcionais são perigosos, encontra-se uma lâmina escoada decenal de 64 mm no Sahel ao invés de 40 mm como no Sertão. Trata-se, ainda, unicamente, do escoamento superficial. Seria preciso aumentar em pouco mais de 10% esses 64 mm, para obter o escoamento conforme a definição do Nordeste.

Lembramos que no Sahel o escoamento superficial é predominante, apesar das fracas declividades e que a metodologia do hidrograma unitário se impõe, ao menos, na fase de análise.

▪ Transposição das cheias decenais no Sahel

Resume-se, a seguir, o modo de cálculo definido em suas grandes linhas em 1965 e aperfeiçoado em 1986-1988 e em 1992, para as bacias de 10 a 2.000 km^2, pelo menos, aquilo que se inspira na teoria do hidrograma unitário.

A **função de produção** é definida em função da superfície por duas redes de curvas que dão os coeficientes de escoamento superficial Kr70 e Kr100 que correspondem, respectivamente, a chuvas-diárias-padrão de 70 mm e 100 mm, o mais semelhante possível às mais fortes chuvas observadas (variações de intensidade no corpo da chuva, fim da chuva, etc...). O fato de que o total da chuva decenal varia nitidamente de uma bacia para outra, nessa região, elimina, como ponto de partida, a sua lâmina decenal e impõe o coeficiente Kr que é um coeficiente de **escoamento superficial** e obriga a escolher entre as duas chuvas-padrão enquadrando as chuvas diárias decenais mais freqüentes. Para uma chuva-padrão determinada, cada curva corresponde, por uma lado, a um índice de permeabilidade global ("Impermeável" ou "Muito permeável", por exemplo); esse índice corresponderá, para uma superfície determinada, a uma lâmina de escoamento superficial compreendida num intervalo definido e, por outro lado, a um valor do índice global de declividade Ig. O solo e a declividade desempenham um papel importante e devem ser levados em conta na rede de curvas, porém, é preciso salientar que quando a superfície ultrapassa 10 km^2, o estabelecimento das variações das curvas para declividades inferiores a 15 m/km torna-se muito impreciso. Essa categoria de declividade é freqüente para bacias de 100 km^2. Porém, não se poderia mais fazê-lo para Ig = 30 m/km, o que corresponde ao caso do Nordeste. Isso explica a pouca influência do fator relevo, constatada no Nordeste.

Essas curvas podem ser assimiladas a hipérboles cujas assimptotas são paralelas aos dois eixos de coordenadas. As suas equações são propostas aos usuários.

O ponto delicado, como sempre, é a determinação do índice que representa **os solos ou, nesse caso, os estados de superfície.**

À primeira vista, parece que não estamos mais adiantados do que Eric Cadier no fim de sua primeira fase de transposição para o escoamento. Não existe, na África, qualquer mapa geral dos estados de superfície. É preciso estabelecer um mapa por bacia ou determinar, no mínimo, as superfícies relativas ocupadas pelos diferentes estados de superfície. No entanto, CASENAVE e VALENTIN (1989) realizaram um excelente **catálogo dos estados de superfície do Sahel**. Este catálogo indica todas as propriedades de infiltrabilidade da cada um desses estados de superfície em determinadas condições de precipitação-padrão. Pode-se calcular as Lâminas escoadas para uma bacia, com as mesmas precipitações-padrões, com a condição de conhecer a superfície ocupada por cada estado de superfície e quando as permeabilidades decrescem de montante para jusante das toposequências o que é, geralmente, o caso no Sahel.

Opera-se com os estados de superfície, como Eric Cadier com as UMP e os TS, para a transposição dos escoamentos.

Utilizando-se os dados das bacias representativas cujos estados de superfície foram estudados com minissimulador de chuva, RODIER (1992) determinou as lâminas de água para as chuvas -padrão de 70 mm já descritas, o que permitiu, após mais de 25 anos, o cálculo de uma lâmina escoada estimada de maneira quantitativa em lugar dos velhos índices de permeabilidade de 1965 e isso para três superfícies 1 km^2, 5 km^2 e 20 km^2. O catálogo de CASENAVE e VALENTIN permite identificar os estados de superfície sem que se seja pedólogo experiente ou, até mesmo, sem ser pedólogo. Um mínimo de capacidade de observação é, no entanto, necessário.

Para a **função de transferência** deve-se utilizar, em princípio, a metodologia do hidrograma unitário. Em 1992, foram estabelecidas curvas que davam os tempos de subida e os tempos de base, em função da superfície e do índice global de declividade. Essas curvas foram representadas por uma função $Tb = a\,S^{0,35} + b$, a e b variando com Ig. O coeficiente de forma do hidrograma, (**Qmax/Qmédio escoado**) pode ser fixado para o valor de 2,5 a 2,6 para condições médias. Constatou-se que o hidrograma unitário podia ser aplicado para a cheia decenal bem acima do antigo limite 100-200 km^2. O tempo de base característico (Tc = V escoado/Qmax) foi, também, estudado.

Suas variações em função de S e Ig podem ser definidas por uma fórmula do mesmo tipo que para o tempo de base. Tc está estreitamente ligado ao coeficiente Kx, utilizado no Nordeste, o que permite dispensar o uso do hidrograma unitário.

Essa metodologia considera a superfície, a infiltrabilidade dos solos e o índice global de declividade, mas não leva em conta, pelo menos em uma primeira fase, a cobertura vegetal nem a estrutura da rede hidrográfica. No entanto, ela é aplicada, em geral, no início da estação chuvosa, quando a cobertura vegetal é muito pouco densa. Só se deve refazer os cálculos no fim da estação das chuvas, quando o crescimento de Tb, devido à vegetação, é compensado pela saturação dos solos com forte retenção (quando existem), ou pelo enchimento da rede hidrográfica (fracas declividades).

Como no Sertão, o emprego das fórmulas é complementado por uma série de correções deduzidas de um questionário. Considera-se, assim, o comprimento da bacia, as anomalias da estrutura da rede hidrográfica ("muito radial" ou em "espinha de peixe desviada", etc.), da degradação hidrográfica, da cobertura vegetal no leito, etc.

Para as maiores ou menores bacias, a metodologia foi sensivelmente modificada, mas não é possível detalhar essas modificações neste posfácio.

Outras metodologias são empregadas no Sahel. Em 1983, PUECH e CHABI GONNI estabeleceram regressões para o cálculo da cheia decenal com um número reduzido de parâmetros, análogo ao que foi realizado no Nordeste. Esta metodologia está sendo revisada atualmente, porém, nesse caso, a utilização de um questionário e de coeficientes de correção se imporá ainda mais do que para o método do hidrograma unitário.

■ Transposição das cheias no Nordeste

No Nordeste, o autor só dispunha de 21 bacias representativas com superfícies variando de 0,77 a 468 km^2, a maior parte situada em zona cristalina. Isso inviabiliza qualquer estudo apurado. Para muitas dentre elas, a aplicação da metodologia do hidrograma unitário não era evidente mesmo quando tinha sido possível utilizar hidrogramas observados, o que não foi geralmente o caso.
Para a **função de produção**, o autor pôde partir da lâmina escoada decenal e não de Kr, pois a chuva decenal é sensivelmente a mesma para toda a zona estudada. Nessa bacia que apresentam declividades realmente muito mais fortes do que no Sahel, a influência bastante fraca da declividade sobre a lâmina escoada nessas fortes declividades é mascarada, pelas variações da infiltrabilidade dos solos. Essa situação é comparável à que foi observada no Sahel em certas zonas cristalinas do Tchad (Wadai, por exemplo). Nessas condições, o fator declividade foi eliminado tanto da função produção como da função transferência.
A infiltrabilidade do solo, desempenhando um papel muito importante, não foi possível ser eliminada, como também não foi possível integrá-la a um índice de permeabilidade global. O autor, portanto, empregou o artifício seguinte, que é eficaz : reuniu todas as lâminas escoadas Le das bacias cristalinas em um só conjunto, plotando-o num diagrama representando Le em função de S e adotou, para a transposição, a reta de regressão deste conjunto. Assim, uma única variável permaneceu : **a superfície**.

As bacias sedimentares têm, no Nordeste, uma permeabilidade muito maior, mas sua quantidade é pequena demais para que se possa tirar conclusões. O autor inclui, portanto, essas bacias com fraca permeabilidade na categoria **Bacias com correções** e recomenda dividir a superfície por dois na fórmula que dá Le em função de S.

Os solos erodidos ou truncados são mais impermeáveis que aqueles correspondentes à curva superior das bacias cristalinas. Um coeficiente de correção foi proposto para esse caso.

Para a **função de transferência**, sendo impossível a utilização de Tb, o autor definiu um coeficiente Kx que dá, diretamente, a descarga de pico decenal, em função da lâmina escoada. Kx é vinculado com o tempo característico Tc definido por IBIZA (1988) pela fórmula $\mathbf{Kx = 1.000\ S(km^2)/Tc(s)}$. A regressão determinando Kx utiliza, unicamente, a superfície da bacia.
Eric Cadier escolheu a curva limite superior dos valores de Kx o que proporcionou uma boa margem de segurança.
Pudemos verificar que as ordens de grandeza de Kx calculadas com a fórmula do Nordeste estão compatíveis com as que encontramos para Tc na África em condições semelhantes.
Evidentemente, a fórmula definitiva que dá a descarga da cheia decenal é uma função de apenas S.

Não insistiremos sobre o modo de cálculo das cheias **para bacias de 0,1 a 5 km^2** onde o autor teve que se basear sobre as intensidades de precipitações e não mais sobre a altura total da chuva decenal. Encontra-se alguma coisa parecida no Sahel, para as pequenas bacias com forte declividade e com hidrogramas muito breves, onde foram utilizadas pequenas partes do hietograma de frequência decenal. Cadier propõe, finalmente, uma fórmula do mesmo tipo, unicamente função de S.

A cheia decenal é multiplicada depois por dois para chegar à cheia de projeto $Qproj = 25\,S^{0,58}$, válida entre 5 e 500 km^2; ela corresponde às bacias mais perigosas sobre embasamento cristalino.

De maneira análoga ao cálculo dos escoamentos anuais, efetua-se uma série de correções para levar em conta fatores que não foram utilizados na fórmula, multiplicando Qproj por um coeficiente Fc que é o produto dos coeficientes de correção seguintes :

- **Cdegr** : presença de solos truncados ou outros solos particularmente impermeáveis.
- **Cdren** : anomalias eventuais na estrutura da rede de drenagem.
- **Crel** : existência de zona de relevo excepcionalmente forte ou fraco.
- **Cform** : forma ou compacidade da bacia.
- **Cclim** : diferenças devidas às duas zonas climáticas encontradas no início desse estudo.

Tem-se que destacar, nessa parte do estudo, a dupla preocupação do autor em ter margens de segurança que levem em consideração o caráter sumário desse estudo de cheias, sem que isso conduza a um acúmulo exagerado, como já aconteceu no Sahel. Por exemplo, quando ele toma a curva limite superior para Kx, considera ao mesmo tempo a curva média para Le em função de S. Ele impõe, também, um limite para FC evitando que o usuário escolha, sistematicamente, todos os maiores valores dos coeficientes de correção com o objetivo de garantir uma segurança absoluta.
Como tudo o que precede, isso mostra bem que o autor deste trabalho soube conciliar de maneira inteligente, os imperativos de uma pesquisa científica rigorosa e de alto nível, com a informação disponível e com as exigências e o provável comportamento dos usuários, para os quais, não o esqueçamos, foi criado o ORSTOM.

Bretignolles, 2 de abril de 1992.

Jean RODIER

A N E X O S

Anexo 1 : Dimensionamento dos Açudes, proposto no "Manual do Pequeno Açude".

Anexo 2 : Informações existentes a respeito das outras bacias representativas.

Anexo 3 : Funcionamento do modelo SUDENE/ORSTOM com séries pluviométricas da África.

Anexo 4 : Glossário

Bibliografia

Sumário detalhado

Relação das Figuras

Relação das Tabelas

ANEXO 1

DIMENSIONAMENTO DOS AÇUDES

Apresentamos a seguir um extrato do "*Manual do Pequeno Açude*" (MOLLE e CADIER, 1992) referente ao dimensionamento da represa e do seu sangradouro.

O método de dimensionamento proposto é diretamente originado dos estudos hidrológicos apresentados anteriormente.

O grande número de açudes já existentes (estimados em 70.000 para todo o Nordeste), ou em construção, mostra a importância e a atualidade de um tal método de dimensionamento para a região.

A2

Dimensionamento da Barragem



A2

1 Fundamentos do método de dimensionamento

1.1 Necessidade do dimensionamento
1.2 Definições e explicações
1.3 Limites de utilização do método
1.4 Documentos necessários para avaliação dos recursos hídricos
1.5 Informações a serem coletadas no campo

2. Avaliação do volume anual escoado

Etapa 1 Avaliação da superfície da BHD
Etapa 2 Classificação da BHD: Determinação do coeficiente L_{600}
Etapa 3 Correção de L_{600}
Etapa 4 Avaliação da pluviometria
Etapa 5 Cálculo da lâmina escoada L(P)
Etapa 6 Cálculo do volume médio escoado

3. Estimativa das cheias

3.1 Cálculo da vazão de pico da cheia de projeto

- Etapa 1 Determinação da superfície de contribuição de cheia
- Etapa 2 Determinação do fator de correção Fc

3.2 Amortecimento da cheia pela represa e outros espelhos d'água de montante
3.3 Risco de rutura dos açudes situados a montante

4. Dimensionamento do reservatório

4.1 Dimensionamento de um açude destinado ao abastecimento
4.2 Dimensionamento de um pequeno açude utilizado para irrigação

5. Dimensionamento do sangradouro

5.1 Definições e explicações
5.2 Dimensionamento de um sangradouro de secção retangular
5.3 Dimensionamento de um sangradouro de forma não retangular
5.4 O canal extravasor

1. Fundamentos do método de dimensionamento

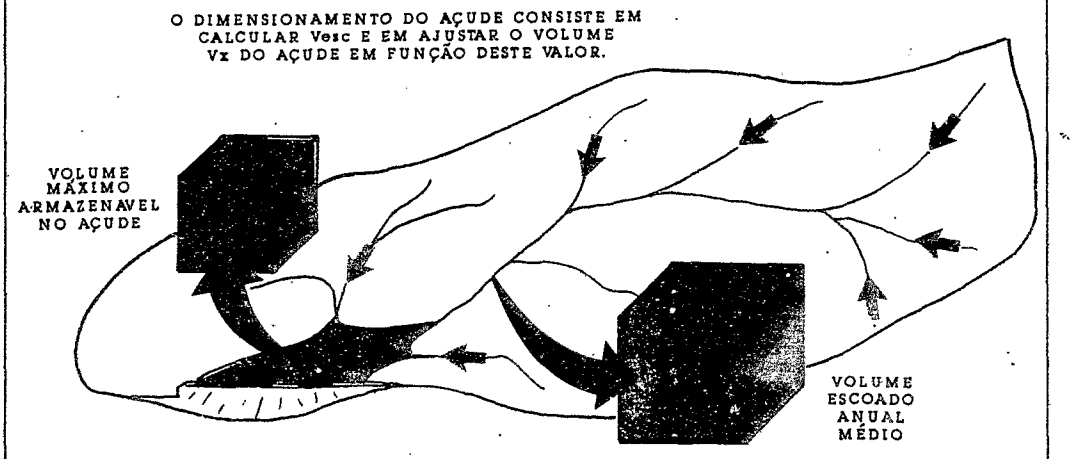
1.1 Necessidades do dimensionamento

O dimensionamento de uma barragem e do seu sangradouro é fundamental para o projeto de construção e de utilização da água do açude.

Um dimensionamento correto permite:

- evitar o arrombamento da barragem;
- evitar prejuízos econômicos;
- aproveitar racionalmente a água disponível;
- diminuir a salinização do açude, do perímetro e dos prejuízos para outros usuários da água situados a jusante.

17 *Adequar o açude a sua bacia hidrográfica*



■ Dimensionamento da barragem

O dimensionamento da barragem consiste em compatibilizar a capacidade do reservatório com o volume escoado no rio.

□ Se o açude for pequeno demais (subdimensionamento):

- não se aproveitará toda a água disponível, perdendo-se a maior parte por sangria;
- passará muita água no sangradouro.
  Neste caso, será necessário construir um sangradouro extenso e caro.

□ Se o açude for grande demais (superdimensionamento):

- o custo da barragem será excessivo;
- grandes áreas serão inundadas pela represa;

- o açude encherá e sangrará raramente. Isto poderá provocar:
  — a salinização da água do açude;
  — prejuízo para as propriedades situadas a jusante, que raramente receberão água do riacho.

■ **Dimensionamento do sangradouro**

Se o sangradouro for subdimensionado, ou seja, insuficiente para suportar a vazão das cheias, haverá grande **risco de arrombamento do açude,** caso a água chegue a passar por cima da parede. Por outra parte, se o sangradouro for grande demais, sem necessidade, isto constituirá um prejuízo econômico por causa do custo adicional dessa obra.

Portanto é necessário:

- estimar a **vazão máxima** das cheias, no local do futuro açude;
- **prever uma margem de segurança**, para se precaver, em particular, contra os **riscos de arrombamento de açudes situados a montante** ou da obstrução acidental do sangradouro.

■ **O dimensionamento é fundamental.** Vejam os exemplos a seguir...

- Uma pesquisa abrangendo 57 pequenos açudes mostrou que 88% do total tinham seus sangradouros sub-dimensionados.
- Na Bacia do rio Piranhas (RN), mais de 275 pequenos açudes arrombaram somente no ano de 1984.
- O preço da construção da barragem e do sangradouro representa, geralmente, mais da metade do custo total de um pequeno perímetro abastecido por açude. Um dimensionamento correto pode trazer uma economia substancial.

1.2 Definições e explicações

As definições e explicações seguintes são necessárias para uma boa compreensão do método.

Uma parte da água das chuvas escoa para o açude. Toda a área que pode contribuir para este escoamento é chamada **Bacia Hidrográfica de Drenagem ou BHD.**

■ **Características da BHD**

- Superfície total **S** (em km^2).
- Relevo e declividade.
- Tipo de solo.
- Estado de conservação da superfície do solo (ou grau de erosão).
- Tipo de vegetação (grau de desmatamento, importância das áreas cultivadas).
- Geologia e escoamentos subterrâneos.
- Densidade de drenagem, expressa em km de riacho por km^2 de BHD.
- Comprimento do riacho principal.

■ **Precipitações**

Exprime-se em mm a **altura da precipitação ou da chuva (P).**

A uma chuva precipitada na superfície S da BHD durante um período qualquer (por exemplo, 1 hora, 1 dia ou 1 ano, etc.), corresponde um **volume precipitado** V_{prec}, calculado pela fórmula:

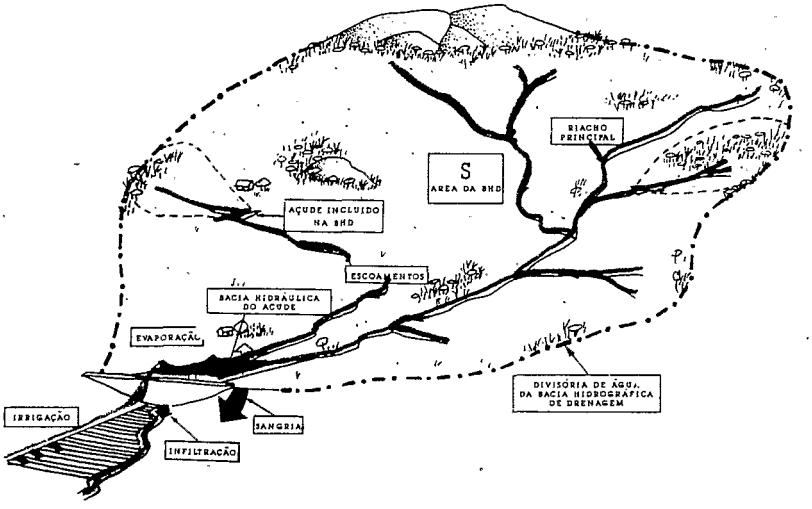
$$V_{prec}\ (m^3) = S(km^2) \times P(mm) \times 1000$$

■ Escoamentos

O **volume escoado** V_{esc} (em m^3) na BHD é o volume de água que vai alimentar o açude. Chama-se de **lâmina escoada** L_{esc} (em mm) à lâmina de água fictícia de altura (ou a uma espessura) L_{esc} que representaria o mesmo volume que V_{esc} se este fosse repartido uniformemente sobre toda a BHD.

$$L_{esc}\ (mm) = V_{esc}\ (m^3)/(S\ (km^2) \times 1000)$$

18 *Bacia hidrográfica de drenagem - BHD*



■ Lâminas escoadas anuais

Chama-se **lâmina escoada anual média L(P)** (em mm) à média de todas as lâminas escoadas durante cada um dos anos de um período maior possível.

O **coeficiente** L_{600} de uma BHD caracteriza **sua capacidade de escoamento.** Corresponde à lâmina anual média que escoaria na BHD, se esta fosse situada num local com precipitação anual média de 600 mm, na zona climática "Sertão".

Ver zonas climáticas. Pág. 40 e 59

■ Cheias

A **vazão de pico** de uma cheia, ou vazão máxima, permite calcular o sangradouro e o canal extravasor. Exprime-se em m^3/s.

Calculou-se, neste Manual, a vazão de pico "da cheia de projeto", de freqüência (ou período de retorno) entre 100 e 200 anos, o que corresponde à freqüência geralmente admitida para o dimensionamento desse tipo de pequenas obras.

O conceito de fator corretivo

Sempre que possível, os resultados e as normas são apresentados da seguinte maneira:

a. indicação do **valor-padrão** de cada resultado ou de cada norma. Este valor-padrão (ou valor-central ou valor-de-referência) corresponde às **condições atuais mais freqüentes no Nordeste Semi-Árido.** Aplica-se, por exemplo, ao escoamento, ao tamanho da barragem ou do perímetro irrigado, etc...

b. indicação de um certo número de **fatores de correção** que permitem corrigir o valor-padrão, em função das características efetivas do local considerado.

Um fator de correção corrige o valor-padrão pela fórmula:

Valor corrigido = Fator de Correção x Valor-padrão

Esta abordagem torna os cálculos simples, na maior parte dos casos, pois o valor mais freqüente dos diversos fatores corretivos é, pela sua própria definição, próximo de 1.

Entretanto, a sua utilização pode se revelar mais delicada em casos extremos, quando as condições locais são muito diferentes das condições-padrão, com vários fatores de correção diferentes de 1. **Isto corresponde a uma minoria de casos.**

Importante: Quando **não se tem de realizar** qualquer tipo de correção, o fator corretivo correspondente é igual a 1.

1.3 Limites de utilização do método

19 *Domínio de utilização do método*



■ Área geográfica de utilização

A parte hidrológica do método foi estabelecida para a zona climática semi-árida do **Sertão Norte**, com precipitação anual média inferior a 800 mm, principalmente para BHD situadas na região de geologia cristalina (figura 19).

O método poderá ser utilizado com menor precisão e segurança nas seguintes zonas:

- todo o Sertão Sul;
- agreste e zona de transição;
- zonas com precipitação anual média entre 800 e 1000 mm;
- zonas de geologia sedimentar.

Quando a vegetação não é mais do tipo xerófilo (vegetação adaptada a clima seco ou semi-árido) e/ou em zonas de precipitação anual média superior a 1000 mm, deve-se recorrer, **imperiosamente**, a um outro método de avaliação dos recursos hídricos.

■ Tamanho da BHD

O método aplica-se a BHD de superfície entre 0.1 e 500 km^2.
Para BHD de superfície entre **10 e 500 km^2**, o cálculo dos recursos hídricos é mais simples, pois esta avaliação requer apenas a identificação das **Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP)** existentes na BHD. Estas UMP estão definidas nos **mapas pedológicos de reconhecimento** elaborados pela EMBRAPA/SUDENE, para cada Estado do Nordeste Brasileiro.
O cálculo torna-se mais delicado quando se trata de BHD menores, de superfície entre **0.10 e 10 km^2**, devendo-se conferir a proporção e os **Tipos de solo (TS)** existentes realmente na BHD, a fim de verificar se estão de acordo com a legenda das UMP definidas no mapa pedológico:

Ver definição da UMP. Pág. 47

■ Tipo de utilização e tamanho do açude

As normas de dimensionamento aqui apresentadas foram estabelecidas para pequenos açudes utilizados, principalmente, para **irrigação** ou abastecimento.
Isto exclui os açudes públicos que alimentam grandes perímetros, como os do DNOCS, e ainda mais as barragens de regularização e perenização de rios. Deve-se recorrer, para isso, aos métodos propostos pelo DNOCS (AGUIAR, 1940).

Método de Aguiar. Ver Anexo 8

1.4 Documentos necessários para avaliação dos recursos hídricos

O dimensionamento efetua-se em três fases sucessivas:

- visita ao campo para escolha dos locais favoráveis à construção do açude, orientando-se com um mapa topográfico e, se possível, um mapa pedológico.
- levantamento topográfico do local do barramento e da bacia hidráulica do futuro açude.
- delimitação e classificação da BHD, cálculo dos escoamentos, projeto do açude e do sangradouro.

Uma volta eventual ao campo para tirar possíveis dúvidas sobre os limites ou as características da BHD pode ser necessária.

Para avaliar os recursos hídricos é necessário conhecer:

- a superfície da BHD;
- a classificação hidrológica da BHD;
- o total anual das precipitações e a zona climática.

Deve-se, para isso, reunir os documentos discriminados a seguir, relativos à Bacia Hidrográfica de Drenagem (BHD) e ao local do barramento:

■ Documentos de base imprescindíveis

— **mapa topográfico**
da BHD, na escala de 1:100.000 ou de maior precisão, se existir;

— **mapa de isoietas**
da região, em 1:1.000.000 ou 1:2.500.000, segundo a zona;

— **mapa pedológico**
da BHD, na escala mais precisa possível. Existem, para todos os Estados do Nordeste, levantamentos pedológicos exploratórios, cujas escalas variam entre 1:400.000 e 1:1.000.000;

— quando a BHD tem uma superfície inferior a 5km^2, deve-se procurar:
fotografias aéreas e/ou imagens de satélites, ou um mapa topográfico mais detalhado da BHD (várias partes do Nordeste foram cartografadas na escala de 1:10.000 ou 1:20.000).
Na ausência destes documentos, procurar especialistas nesta área a fim de que se possa obter estas informações.

■ Documentos de apoio

Estes documentos, quando disponíveis, podem ser consultados para facilitar a classificação hidropedológica das BHD.

— Mapa, na escala de 1:500.000, do inventário hidrogeológico básico do Nordeste;
— Mapas geológicos que foram publicados para cada Estado.
— Todo e qualquer documento, estudo ou mapa, capaz de melhorar o conhecimento da BHD.

Em Resumo

Os* mapas topográficos e pedológicos, *uma* avaliação do total anual das precipitações e um reconhecimento de campo *são indispensáveis para aplicação do presente método, pois poderão evitar ou facilitar levantamentos no campo às vezes difíceis de serem realizados.

1.5 Informações a serem coletadas no campo

O reconhecimento de campo é imprescindível e objetiva reunir vários tipos de informações para iniciar e depois complementar, **confirmar e/ou modificar as conclusões do trabalho realizado no escritório.** Este reconhecimento deve ser associado à visita para escolha, no campo, do local da barragem.

■ Localização da barragem

A plotagem, nos mapas ou nas fotos, do local previsto para a barragem deve ser realizada no campo.

■ Delimitação da BHD

Quando a bacia for muito pequena, a sua delimitação nos mapas e fotos deverá ser confirmada no campo, a fim de reduzir os riscos de erro na determinação da superfície da B.H.D. **Isto é fundamental.**

■ Pedologia, vegetação, relevo, drenagem da BHD

Checagem das informações coletadas no escritório sobre solo, vegetação, drenagem, etc., para aplicação dos eventuais fatores corretivos da classificação. A verificação, no campo, **da coerência do mapa de solo com os solos efetivamente presentes** é de primeiríssima importância, pois os solos da BHD constituem a base da classificação hidrológica proposta.

■ Açudes situados a montante do barramento

Inspeção dos açudes eventuais situados a montante do barramento previsto, avaliação de seus volumes, da vazão admissível nos seus sangradouros e dos riscos de arrombamento.

■ Comportamento dos outros açudes da região

Coletar, na medida do possível, informações sobre o funcionamento **dos açudes vizinhos:** relação entre volume máximo do açude e a superfície de sua BHD, anos nos quais receberam água ou sangraram, ocorrências de arrombamento e suas razões, etc. O **anexo hidrológico** indica como utilizar essa informação e como avaliar a vazão das fortes cheias passadas, conhecendo o nível máximo alcançado pela água.

■ No local do futuro barramento

A visita ao campo deverá, evidentemente, ser aproveitada para reunir as informações necessárias aos outros estudos do projeto como, por exemplo: a localização, a construção da barragem e sua futura utilização.

- Reunir o máximo possível de informações sobre o local do futuro barramento; informar-se sobre o comportamento do riacho e o nível máximo atingido pelas cheias passadas.
- Medir a condutividade da água, recolher amostras de água dos açudes e poços da região e do solo do futuro perímetro irrigado para análises em laboratório, etc.
- Realizar o levantamento topográfico (detalhado ou semi-detalhado) da bacia hidráulica do futuro açude;

2. Avaliação do volume anual escoado

O método de classificação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas permite determinar o volume escoado anual médio, denominado a seguir V_{esc}.
Três elementos fundamentais permitem o seu cálculo:

- a **superfície de drenagem**;
- a **classificação hidrológica** da bacia hidrográfica;
- o total **pluviométrico** anual e a zona climática.

A figura 20 mostra a fórmula que permite o cálculo de V_{esc} e a seqüência das principais etapas do método.

Etapa 1: Avaliação da superfície da BHD

Delimitar a BHD e calcular a sua superfície. Ver no Anexo 8.

Definir o **local da barragem**, determinar a linha de contorno da **Bacia Hidrográfica de Drenagem (BHD)** e calcular **a sua superfície** (S).

- Para áreas com menos de 5 km^2, utilizar fotografias aéreas mais detalhadas e as mais recentes possíveis, mapas precisos (escala 1:50.000 ou 1:25.000 no mínimo) ou uma estimativa topográfica direta no campo;
- entre 5 e 25 km^2, utilizar mapas ou fotografias, de acordo com a nitidez do relevo nos documentos disponíveis;
- para áreas com mais de 25 km^2, pode-se usar mapas topográficos na escala de 1:100.000, cuja precisão é suficiente e que existem para a maior parte do Nordeste.

Se houver vários documentos ou mapas disponíveis de escalas diferentes, se deverá escolher a escala que mais facilite a utilização do planímetro, instrumento que apresenta maior precisão para medir superfícies entre 20 e 100 cm^2.

Importante

Em todos os casos é **muito arriscado** *e ilusório tentar delimitar e avaliar superfícies de bacias inferiores a 1 cm^2, no mapa ou na foto.*
Ver exemplo de delimitação de BHD no Anexo 8.

A avaliação da superfície S é fundamental. Ela permitirá o cálculo dos volumes escoados a partir das lâminas escoadas e a estimativa da vazão de pico da cheia de projeto.

Esquema Geral da Classificação Hidrológica

Para efetuar a classificação hidrológica da BHD, precisa-se reunir informações sobre as suas características físico-climáticas tais como: os solos, a cobertura vegetal, o número de açudes já existentes, etc.

O **coeficiente L_{600}** *caracteriza esta classificação hidrológica; corresponde a uma lâmina anual escoada, como definido na etapa 2*

A determinação de L_{600} divide-se nas duas etapas detalhadas a seguir:

- **Etapa 2:**
  Estimativa de L_{600} padrão, mediante uma classificação hidropedológica da BHD.
- **Etapa 3:**
  Estimativa de L_{600}, aplicando-se os fatores corretivos CV, CA, CL.

Etapa 2:
Classificação hidrológica da BHD: determinação do coeficiente L_{600} padrão

O coeficiente L_{600} padrão é determinado a partir das características dos solos da BHD.

■ Como definir e classificar os solos

Ver exemplo no Anexo 8

Os solos podem ser definidos de duas maneiras diferentes:

- Pelas **Unidades Pedológicas de Mapeamento (UMP)**, definidas nas legendas dos mapas pedológicos de reconhecimento da EMBRAPA.
- Pelos **Tipos de Solos (TS)**, identificados no campo ou a partir de mapas pedológicos mais detalhados.

Dois casos podem existir :

- Quando a **BHD está situada dentro de uma única UMP ou é constituída de apenas um só TS**, o L_{600} será diretamente extraído das tabelas A ou B:
- Quando a **BHD contém mais de uma UMP ou de um TS**, aplicar uma das fórmulas:

$$L_{600}\text{ padrão(BHD)} = L_{600}(UMP1) \times S(UMP1)/S \quad \text{(para a primeira UMP)}$$
$$+ L_{600}(UMP2) \times S(UMP2)/S \quad \text{(para a segunda UMP)}$$
$$+ \text{etc...} \quad \text{(para outras UMP)}$$

ou, no caso dos TS, aplicar uma fórmula do mesmo tipo:

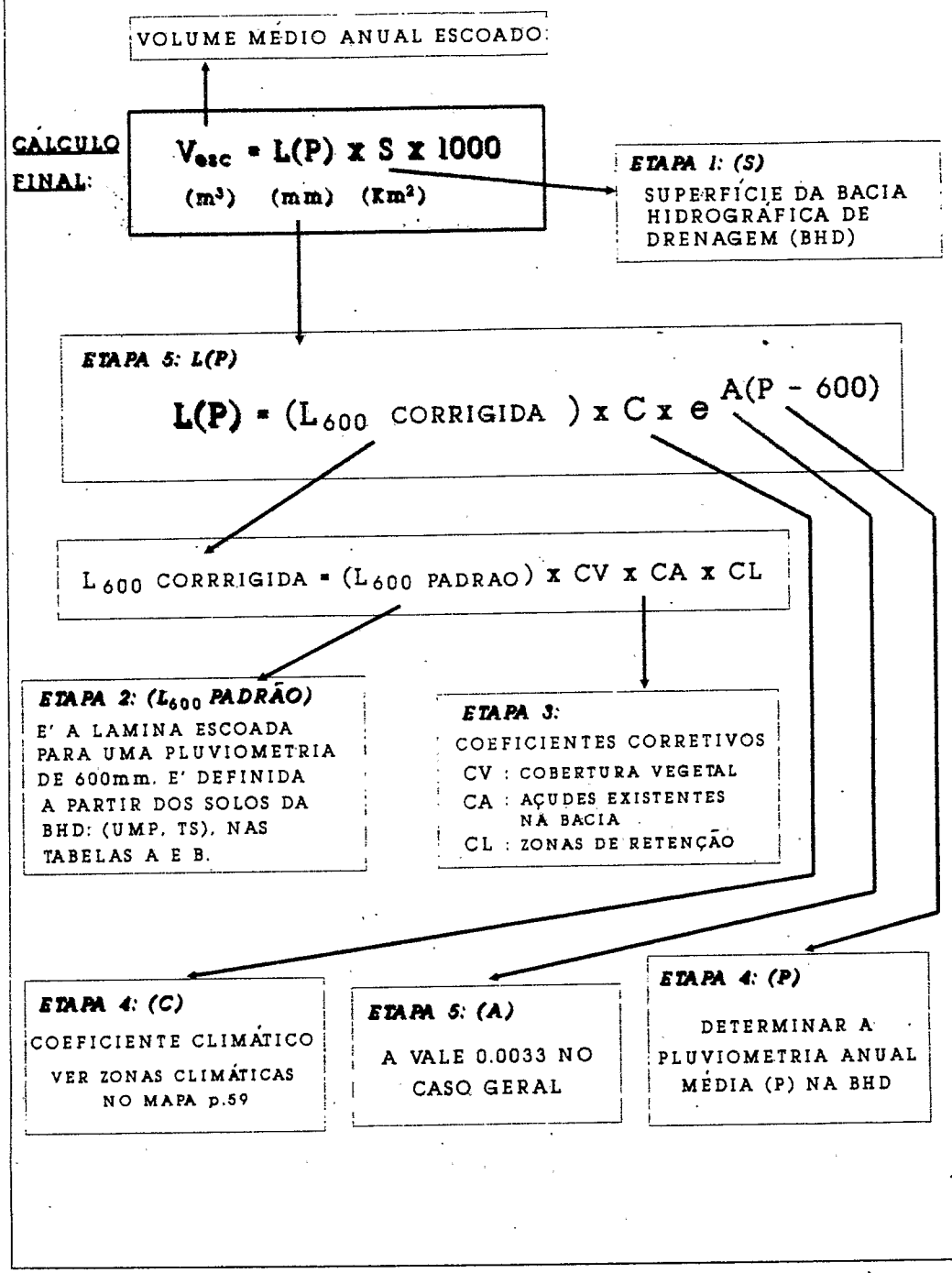
$$L_{600}\text{ padrão(BHD)} = L_{600}(TS1) \times S(TS1)/S + L_{600}(TS2) \times S(TS2)/S + \text{etc...}$$

S(UMP1), S(TS1) etc, são as superfícies das diversas UMP ou TS que estão situadas no interior da BHD do açude. S é a superfície total da BHD.

Utilizar a tabela A para a determinação de L_{600}(TS) ou a tabela B para L_{600}(UMP).

20

ETAPAS DO CALCULO DO VOLUME MÉDIO ANUAL ESCOADO



Qual é a diferença entre UMP e TS? Quando utilizar UMP e TS?

Os mapas de solo de reconhecimento da EMBRAPA: as UMP

Os solos de todo o Nordeste foram levantados pelo Serviço de Levantamento de Solos da **EMBRAPA**, *a qual elaborou mapas pedológicos de reconhecimento para cada Estado do Nordeste. As escalas destes mapas variam entre 1:400.000 e 1:1.000.000.*

Nesses mapas, os solos estão apresentados por Unidades de Mapeamento Pedológico (UMP). As legendas indicam os Tipos de Solo (TS) que compõem essas UMP e a sua proporção média regional dentro de cada UMP.

A precisão desses mapas é limitada devido a sua escala. As proporções reais dos TS na BHD podem ser, às vezes, diferentes daquelas definidas regionalmente para cada UMP.

Atenção

Muitas BHD terão nos mapas pedológicos da EMBRAPA dimensões insuficientes, pois 1 cm nesses mapas corresponde, no campo, a uma distância de 4 a 10 km, de acordo com o Estado.

Que outro tipo de informação pode ser encontrada?

Em várias partes do Nordeste existem levantamentos de solos mais detalhados que os mapas da EMBRAPA. Deve-se sempre procurar a existência desse tipo de documento nos diversos órgãos estaduais e federais. Esses documentos proporcionam uma melhor precisão para a definição dos TS efetivamente existentes na BHD.

Podemos citar, sem que seja uma lista completa:

- *o Serviço de Levantamento de Solo da EMBRAPA;*
- *as Secretarias de agricultura, de irrigação ou de recursos hídricos dos Estados;*
- *os órgãos de desenvolvimento: SUDENE, DNOCS, CODEVASF...;*
- *outros órgãos públicos ou privados que atuaram na região do projeto.*

Quando utilizar as UMP ou TS?

É sempre preferível, na medida do possível,utilizar os TS no lugar das UMP, pois os TS fornecem uma informação mais precisa e específica da BHD.

Importante

Quando a superfície da BHD é inferior a 10 km^2, realizar um reconhecimento dos solos efetivamente presentes, para corrigir, quando for necessário, a proporção dos TS na UMP indicada na legenda do mapa da EMBRAPA.

Este reconhecimento deve ser realizado por um pedólogo ou por uma pessoa com conhecimento sobre os solos da região.

Consultar no Anexo hidrológico exemplos e informações mais detalhadas.

■ Utilização da tabela A

A tabela A permite avaliar o L_{600} padrão dos diferentes Tipos de Solo (TS) que se encontram no Nordeste semi-árido. Nela constam os solos mais comuns do Nordeste. Uma vez identificado o Tipo de Solo, com a ajuda, se possível, de um pedológo ou, pelo menos, de uma pessoa com experiência em pedologia, a tabela A, ou a tabela correspondente (mais completa) do anexo 8, fornecem o valor do L_{600} do tipo de solo.

Um **Tipo de Solo** (TS) é definido pelo nome do solo (por exemplo, Bruno Não Cálcico) e pelas suas características adicionais que indicam as variedades do solo considerado (por exemplo, vértico).

Estas características adicionais podem ser reagrupadas da forma seguinte:

Textura: indica a proporção de argila, areia e silte do solo. São diretamente ligados à permeabilidade e ao escoamento do solo.

Espessura: os solos rasos, erodidos ou truncados escoam mais por terem menos capacidade de retenção de água.

Impedimentos: a existência de camadas impermeáveis e encrostamentos na superfície ou embaixo dela impedem a infiltração e provocam o escoamento. Os fragipans e as camadas plínticas constituem impedimentos.

Salinidade: a salinidade dos solos com características solódicas é sempre um fator que acentua muito o escoamento, pois os sais tendem a impermeabilizar o solo.

Tabela A

Aptidão ao escoamento dos principais tipos de solos do Nordeste Semi-Árido

Tipo de Solo (TS)	Características Adicionais	L_{600} (mm)	% do NE Semi-Árido	
Bruno Não Cálcico	*	*37*	*25.5*	
e Litólico	*vértico*	*25*	*3.2*	
Afloramento de rocha		*90*	*3.3*	
Podzólico	*Textura arenosa a média*	*15*	*5.7*	
	média/argilosa ou médio plíntico	*25*	*3.5*	
	textura argilosa ou solo raso	*37*	*4.2*	
Vertissolo		*25*	*1.3*	
Cambissolo	*Textura média a argilosa*	*15*	*1,8*	
	Textura argilosa ou solo raso	*37*	*2.1*	
Solonetz Solodizado		*125*	*3.5*	*SAL!*
Planossolo Solódico		*70*	*7.9*	*SAL!*
Areia Quartzosa		*0*	*11.1*	
Regossolo	*Com fragipan*	*5*	*2.5*	
Latossolo	*	*5*	*15.1*	
	Textura Média a Argilosa	*10*	*2.8*	
	Textura Argilosa	*15*	*2.3*	

* *Quando o solo não apresenta nenhuma das características adicionais mencionadas.*

A tabela A
permite evidenciar
os fatos seguintes:

Proporção de solos aptos, sem restrição, para captação de água: são os solos com valor de L_{600} igual ou superior a 37 mm, sem serem Solódicos.
Estes solos cobrem 32% da superfície total do Nordeste semi-árido.
Considerando-se apenas a região cristalina, região com maior escassez de recursos hídricos, esta proporção aumenta para 65%.
Trata-se principalmente dos Brunos Não Cálcicos, dos Litólicos e dos Afloramentos de rocha.

15% do Nordeste semi-árido são cobertos de solos que ainda se prestam para captação de água em açudes, apesar de apresentarem escoamentos fracos e irregulares (L_{600} entre 15 e 37 mm).

Uma proporção notável do Nordeste semi-árido (11%) apresenta problemas de salinização (Solonetz ou Planossolo Solódico).

35% do Nordeste semi-árido é coberto de solos impróprios para construção de açudes que apresentam escoamentos irrisórios e muito irregulares.
São as Areias Quartzosas, os Regossolos e a maioria dos Latossolos, os quais ocorrem principalmente nas regiões sedimentares.

Importante

Consultar no Anexo 8 o exemplo completo de utilização destes mapas e tabelas, acompanhado das definições e explicações necessárias para uma melhor compreenção da influência do solo sobre o escoamento.

■ Utilização da tabela B

A tabela B contém uma relação exaustiva dos L_{600} das diversas UMP existentes em todos os mapas de reconhecimento de solos da EMBRAPA, para o Nordeste semi-árido.

TABELA B
Valores em mm dos L_{600} padrão das UMP[1]

UMP	L_{600}	UMP	L_{600}	UMP	L_{600}	UMP	L_{600}	UMP	L_{600}	UMP	L_{600}
ALAGOAS											
Ae2	10	NC2	44	PL2*	52	Re2	40	Re9	63	REe2	32
AQd2	15	NC3	40	PL3	57	Re3	46	Re10	63	REe3	52
Ce*	19	NC4*	42	PL4	77	Re4	47	Re11	63	REe4	34
LEe1*	15	PE3*	39	PL5*	43	Re5	48	REd*	5	REed1	5
LEe2*	15	PE6*	29	PV12*	42	Re6	42	Red1*	37	REed2	9
LVd11*	25	PE7*	39	Rd	64	Re7	37	Red2	26	REed3	24
LVe*	21	PE8*	37	Re1*	37	Re8	32	REe1	5	REed4	31
NC1*	37	PL1*	46								
BAHIA (Margem direita do rio São Francisco)											
Ae*	75	Ce23	5	LVd31	10	PE20	30	PLSe4	60	Rd5	47
Aed1	82	LEd	16	LVd32*	7	PE22	19	PLSe5	54	Rde	40
Aed2	82	LEe1*	23	LVde1*	11	PE23	25	PLSe6	86	Re1	33
AQd3	1	LEe2	11	LVde2	7	PE24	38	PLSe7	52	Re2*	37
AQd4	0	LEe3	19	LVde3	8	PE25	29	PLSe8	44	Re3*	44
AQd5	20	LEe4	17	LVde4	5	PE26	24	PLSe9	40	Re4*	42
AQd6	11	LEe5	22	LVde5	11	PE27	30	PLSe10	33	Re5	39
BV3*	47	LVd2*	11	LVe1	20	PE28	29	PLSe11	59	Re6	35
Ce1	37	LVd4*	17	LVe2	5	PE29	17	PLSe12	82	Re7	33
Ce2	48	LVd5*	22	LVe3	5	PE30	30	PLSe13	54	Re8	40
Ce3	48	LVd7*	15	LVe4	21	PE31	27	PLSe14	81	Re9	63
Ce4	22	LVd9*	19	LVe5	14	PE32	25	PLSe15	66	Re10	37
Ce5	21	LVd11	14	NC1	38	PE33	32	PLSe16	62	Re11	37
Ce6	19	LVd12*	10	NC2	43	PE34	39	PLSe19	33	Re12	37
Ce7	28	LVd13*	10	NC3	40	PE35	18	PLSe20	35	Re13	67
Ce8*	35	LVd14*	10	NC4	25	PE36	32	PLSe21	53	Re14	63
Ce9	31	LVd15*	15	NC5	38	PE37	33	PLSe22	74	REed1	30
Ce10	28	LVd16*	18	NC6	25	PE38	34	PLSe17	80	REed2	40
Ce11	39	LVd17	13	PE4*	23	PE39	43	PLSe18	38	REed3	28
Ce12	37	LVd18*	10	PE6*	24	PE40	15	PV14*	21	SS1	74
Ce13	48	LVd20*	3	PE11*	21	PE41	35	PV16*	30	SS2	71
Ce14	28	LVd21	10	PE12*	24	PE42	23	PV17	23	SS3	80
Ce15	28	LVd22	16	PE13*	16	PE43	8	PV18	9	SS4	92
Ce16	46	LVd24	5	PE14*	21	PE44	17	PV19*	28	V3*	43
Ce17	5	LVd25	11	PE15*	32	PE45	64	PV27*	29	V4	41
Ce18	30	LVd26	15	PE16*	29	PLe*	42	Rd1*	64	V5	25
Ce91*	37	LVd27	9	PE17*	30	PLSe1*	61	Rd2	33	V6	32
Ce20	27	LVd28	21	PE18*	33	PLSe2*	48	Rd3	27	V7	36
Ce21	23	LVd29	7	PE21*	43	PLSe3*	76	Rd4	22	V8	37
Ce22	23	LVd30	3	PE19	20						
BAHIA (Margem esquerda do rio São Francisco)											
Aed1*	29	AQd12	0	LVd5*	5	NC1	35	PE11	23	Rd5	63
Aed2	49	AQd13	2	LVd6*	8	PE1*	25	PE12	11	Re1*	37
Aed3	54	AQd14	1	LVd7*	3	PE2*	25	PE13	54	Re2*	34
AQd1*	0	AQd15	28	LVd8	7	PE3*	37	PE14	30	Re4	33
AQd2*	0	AQd16*	31	LVd9	15	PE4*	19	PE15	23	Re5	63
AQd5*	8	HGd1*	70	LVd12*	9	PE5*	32	PE16	33	Red	37
AQd7	0	LEd1*	24	LVd13	8	PE6*	23	PE17*	32	REd	37
AQd8	15	LEd2*	9	LVdp*	5	PE7*	19	PE18*	49	REed	46
AQd9	22	LVd2*	20	LVe1	9	PE8*	11	Rd2*	34	SS1	103
AQd10	0	LVd3	10	LVe2	9	PE9*	21	Rd3	23	SS2	81
AQd11	0	LVd4*	33	LVed	14	PE10*	11	Rd4	63	SS3	86

[1] UMP = Unidade de Mapeamento pedológico dos levantamentos exploratórios e reconhecimento de solo (SUDENE/MA/DNPEA/EMBRAPA).

* Atenção: esses solos podem estar fora da região Semi-árida.

CEARÁ

Ae*	55	NC3	49	PE16	31	PE40	35	Re7	37	Red3	37
Ae3	73	NC4	37	PE17	37	PE41	37	Re8	50	Red4	53
Ae4	61	NC5	42	PE18	29	PE42	27	Re9	37	Red5	37
AMd	0	NC6	33	PE19	37	PE44	37	Re10	53	Red6	48
AQd1	0	NC7	34	PE20	37	PL1	84	Re11	37	Red7	37
AQd2	11	NC8	44	PE21	37	PL2	80	Re12	58	Red8	31
AQd3	23	NC9	41	PE22	37	PL3	90	Re13	37	Red9	50
AQd4	10	NC10	45	PE23	37	PL4	71	Re14	42	Red10	73
AQd5	0	NC11	32	PE24	37	PL5	50	Re15	47	Red11	44
AQd6	24	NC12	27	PE25	10	PL6	83	Re16	50	Red12	24
AQd7	10	NC13	21	PE26	37	PL7	72	Re17	37	REe1	5
BV1	50	NC14	44	PE27	37	PL8	71	Re18	57	REe2	27
BV2	47	NC15	57	PE28	17	PV2*	33	Re19	42	REe3	20
BV3	48	PE1*	37	PE29	28	PV3	8	Re20	63	SK1	125
Ce	30	PE6	45	PE30	31	PV4	10	Re21	53	SS1	99
LVd4	10	PE7	34	PE31	40	PV5	46	Re22	33	SS2	65
LVd5	5	PE8	37	PE32	54	PV6	52	Re23	45	SS3	64
LVd8	12	PE9	42	PE33	62	PV7	24	Re24	45	TRe	25
LVd9	3	PE10	33	PE34	23	Re1	37	Re25	63	V1	25
LVd10	12	PE11	30	PE35	34	Re2	37	Re26	63	V2	25
LVd11	23	PE12	48	PE36	16	Re3	53	REd1	5	V3	25
LVe1	4	PE13	27	PE37	37	Re4	48	REd2	52	V4	27
NC1	60	PE14	33	PE38	37	Re5	37	Red1	54	V5	25
NC2	44	PE15	37	PE39	34	Re6	37	Red2	37	V6	42

MARANHÃO

A6*	60	PE20*	36	PL2	56	PVc25	35	TR3*	33	V2*	31
AQd9*	8	PE22*	32	PL3	84	PVc27*	35	TR4*	29	V3*	36
AQd10*	15	PE23*	53	PL4	40	R6*	38	TR5*	22	V4*	34
Ce1*	45	PL1	80	PV19*	40	R7*	41	V1*	32		

NORTE DE MINAS GERAIS

Ae1*	21	Ce3	19	LVa20*	11	LVa33	4	PE7	40	PVd4*	27
Ae2*	34	Ce4	23	LVa24*	3	LVa34	5	PE8	19	Ra8*	64
Ae3*	63	LEe1*	25	LVa25	15	LVe1	12	PE9	21	Ra11	54
Ae4*	55	LEe2	14	LVa26	17	LVe2	8	PE10	20	Re1	34
AQa3*	0	LEe3	15	LVa27	20	PE1	28	PE11	25	Re2	53
AQa6*	2	LEe4	24	LVa28*	10	PE2	28	PE12	36	Re3	33
AQa4	0	LEe5	17	LVa29	12	PE3	23	PE13*	26	TRSe1*	37
Ca4*	39	LEe6	25	LVa30*	5	PE4*	23	PE15*	30	TRSe2	25
Ce1	15	LEe7	10	LVa31	3	PE5*	46	PVd2*	21	TRSe3	25
Ce2	15	LEe8	19	LVa32	3	PE6*	42	PVd3*	24	TRSe4	31

PARAÍBA

Ce2	21	NC9	49	PE10	29	Re9	45	Re19*	64	REe6	41
Ce3	18	NC10	28	PE14*	37	Re10	48	Re20	63	SS1	83
LVe3	18	PE1	37	Re1	37	Re11	48	Re21	63	SS2	94
NC1	37	PE2	37	Re2	37	Re12	48	REd*	3	SS3	75
NC3	37	PE3	37	Re3	45	Re13	37	REe1	17	SS4	53
NC4*	39	PE4	27	Re4	53	Re14	50	REe2	11	V1*	25
NC5	38	PE5	37	Re5	45	Re15	55	REe3	34	V2	29
NC6	29	PE6	33	Re6	33	Re16	67	REe4	11	V3	27
NC7	30	PE7*	37	Re7*	46	Re17	72	REe5	37	V4	47
NC8	31	PE9*	31	Re8	45	Re18	63				

* Atenção: esses solos podem estar fora da região Semi-árida.

PERNAMBUCO

Ae1	44	LVe4	11	PE7	37	PL5	58	Re5	46	REe4	36
Ae2	75	LVe5	8	PE8	11	PL6	62	Re6	32	REe5	66
AQ	0	LVe6	12	PE10*	15	PL7	48	Re7	62	REe6	32
AQd1	0	NC1	37	PE11	36	PL9*	63	Re8	38	REe7	40
AQd2	1	NC2	34	PE16	37	PL10	62	Re9	63	REe8	37
Ce1*	22	NC3	31	PE18	37	Rd1	37	Re10	63	SS1	125
Ce2	21	NC4	30	PE19	12	Rd2	18	REd2	5	SS2	68
Ce3	5	NC8	31	PE20	22	Re1	37	REd3	32	SS3	74
LVd9	15	NC9	49	PL1	70	Re2	34	REe1	5	V1	25
LVd12*	5	PE1*	37	PL2	60	Re3*	64	REe2	32	V2	25
LVe2	18	PE5	31	PL3	54	Re4	34	REe3	18	V3	65
LVe3	14	PE6*	37	PL4	53						

PIAUÍ

A2*	51	LA23	10	NC2	36	PE17	26	PV18	22	R19	31
A3	52	LA27	6	NC3	32	PE18	17	PV19	25	R20	57
AQ5	0	LA28	12	NC4	53	PE19	22	PV20	38	R21	43
AQ6	16	LA30	3	PE1	18	PE20	39	R8	37	R22	51
AQ7	14	LA31	10	PE2	21	PE21	28	R9	31	R23	45
AQ8	12	LA32	9	PE3	18	PE22	21	R10	54	R24	45
AQ10	2	LA33	12	PE4	42	PE23	29	R11	54	R25	42
AQ11	16	LA34	3	PE5	51	PE24	29	R12	50	R26	54
AQ12	22	LA35	10	PE6	29	PE25	40	R13	40	R27	44
BV4	31	LA36	8	PE7	31	PE26	28	R14	46	R28	44
LA6	18	LA37	14	PE8	34	PL4	53	R15	25	R29	44
LA19	8	LE	12	PE14	24	PT7	38	R16	43	R30	32
LA20	8	LV1	6	PE15	29	PT8	40	R17	44	RE	31
LA21	8	LV2	14	PE16	24	PV7	33	R18	37	SS2	91
LA22	16										

RIO GRANDE DO NORTE

Ae4	55	LVe4	11	PE1	34	PE12	25	Re6	32	Re17	63
AQd4	0	NC1	37	PE2	24	PE13	29	Re7	50	REe1	30
AQd5	5	NC2	29	PE3	28	PL1	56	Re8	56	REe2	21
AQd6	6	NC3	31	PE4	27	PL2	57	Re9	61	RZ1	33
AQd7	10	NC4	37	PE5	29	PL3	84	Re10	76	RZ2	33
Ce1	37	NC5	59	PE6	9	PV1	25	Re11	45	SK2	110
Ce2	33	NC6	31	PE7	37	Re1	55	Re12	32	SS1	125
Ce3	37	NC7	55	PE8	33	Re2	37	Re13	31	SS2	98
Ce4	30	NC8	54	PE9	66	Re3	37	Re14	58	V1	25
Ce5	32	NC9	63	PE10	29	Re4	37	Re15	45	V2	27
LVe2	6	NC10	31	PE11	37	Re5	48	Re16	63	V3	25
LVe3	7	NC11	32								

SERGIPE

Ce1*	35	PE8*	27	PLSe2	60	PV19*	32	Re8*	47	Re16	37
Ce2	45	PE10*	36	PLSe3*	72	Rde	37	Re9*	33	Re17	37
NC1	31	PE11*	32	PLSe4	86	Re2*	37	Re10*	33	REd1	29
NC2	27	PE12	64	PLSe5	62	Re3*	37	Re11	53	REd2	28
NC3	40	PE13	60	PLSe6	72	Re4*	37	Re12	37	REd3	35
PE1*	30	PE14*	30	PLSe7	75	Re5	37	Re13	37	REe*	4
PE3*	30	PE15*	33	PV6*	32	Re6	37	Re14	37	SS1	91
PE4*	34	PLe*	41	PV10*	18	Re7*	37	Re15*	32	SS2	92
PE7*	29	PLSe1*	45								

* Atenção: esses solos podem estar fora da região Semi arida.

21



Áreas onde o escoamento é fraco por serem muito arenosas

Área com escoamento forte por apresentar afloramentos rochosos associados a SOLOS LITÓLICOS





Vegetação de caatinga fechada.
- Boa proteção
- Diminui o escoamento

Vegetação de caatinga degradada.
- Riscos de erosão
- Aumenta o escoamento



Etapa 3: Correção de L_{600}

O valor final ou corrigido de L_{600} é calculado pela fórmula:

$$L_{600}\text{ corrigido} = L_{600}\text{ padrão} \times CV \times CA \times CL$$

Onde:

CV *é o fator de correção que considera o tipo de vegetação da BHD.*

CA *é o fator de correção que considera a presença de outros açudes a montante.*

CL *é o fator de correção que considera a presença de solos arenosos profundos nos leitos dos rios e nas partes baixas das vertentes.*

Estas correções são efetuadas em função de critérios de apreciação mais subjetivos que na etapa anterior e requerem uma visita ao campo, assim como uma certa experiência para a avaliação do peso real a ser atribuído a cad. ...or corretivo.

Importante

Todos estes fatores valem normalmente 1. As correções de L_{600} padrão só deverão ser realizadas quando forem detectadas **anomalias importantes.**

■ Correção (CV): Influência da cobertura vegetal

Os valores de L_{600} padrão propostos no parágrafo anterior correspondem a situações médias (ou padrão) da cobertura vegetal, nas condições médias atuais do semi-árido nordestino, as quais são intermediárias entre uma cobertura total e um desmatamento total. Deve-se considerar, sobretudo, o grau de proteção da cobertura do solo e da interceptação da chuva causada pela vegetação. Assim, um pasto em bom estado, ou seja, onde as plantas criam uma camada fechada que protege totalmente o solo, pode ser considerado como um a unidade bem ou extremamente bem conservada, pois é praticamente equivalente, em termos de intercepção de chuva, a uma caatinga nativa. As zonas de solo nu, desprovidas de cobertura vegetal e compactadas, devem ser consideradas como extremamente degradadas.

22 *Queima de vegetação nativa para plantio de culturas de subsistência. Aumenta o escoamento*



Plantio em contorno. Diminui o escoamento.



No caso de uma pequena BHD, multiplicar o valor de L_{600} pelo fator de correção CV, o qual poderá variar entre 0.5 e 2, segundo o grau de conservação ou de deterioração da vegetação. No entanto, recomendamos não utilizar valores de CV inferiores a 0.75 ou superiores a 1.5, salvo em casos extremos.

Fator de correção CV

Estado da Cobertura Vegetal *Exemplos de situação*	**Solos com** **50 mm > L_{600}>20 mm**	**Solos com** **L_{600} < 20 mm ou** **L_{600}> 50 mm**
Extremamente bem conservada *mais de 80% da bacia com caatinga fechada, sem zona de solo nu*	*.5*	*.75*
Bem Conservada *vegetação ou pasto bem conservado*	*.75*	*.90*
Normal *BHD com 20% a 60% desmatada ou BHD com cobertura vegetal rala*	*1.00*	*1.00*
Degradada *BHD com 60% ou mais desmatada*	*1.50*	*1.25*
Muito degradada *Solos nus e degradados com marcas de erosão acentuadas*	*2.00*	*1.50*

■ Correção (CA): Presença de outros açudes a montante do local da represa

Os valores de L_{600} propostos foram estabelecidos a partir de observações efetuadas nas condições atuais no Sertão Norte cristalino. Nesta zona, pode-se considerar que os açudes já existentes controlam, em média, 30 a 50% da superfície das bacias, com um volume total de armazenamento da ordem de 25 a 50% do volume natural médio escoado. Neste caso, não se deve efetuar correções (CA= 1).

O fator de correção CA dependerá dos açudes já existentes na bacia de alimentação. Esse fator varia, normalmente, entre 1 e 1.6 , podendo, excepcionalmente, ser inferior a 1 quando o número e o volume dos açudes situados a montante são extremamente elevados. Neste caso, recomenda-se a realização de um estudo específico.

Sendo S_a a soma das superfícies das bacias hidrográficas dos açudes de montante, a densidade de açudes pode ser medida a partir da razão S_a/S.

Fator de correção CA

Densidade de Açudes	**Muito forte** **> 0.5 açude/km^2**	**Normal** **Entre .25 e .50 açude/km^2**	**Nula**
ou S_a/S	**>.55**	**entre 0.35 e 0.55**	**0**
CA	*< 1*	*1*	*1.6*

Importante

No caso de pequenas BHD desprovidas de qualquer açude ou barreiro, é necessário adotar um coeficiente CA de 1.6.

■ Correção CL: Presença de depressões e zonas de retenção de escoamento

Depressões, zonas aluviais ou bancos de areia podem reter **uma parte importante do escoamento,** sobretudo quando **estão situados no percurso da água,** ou seja, na parte inferior das vertentes ou perto do leito dos rios.
Identificam-se **três tipos principais de retenção ou de absorção dos escoamentos** [1]:

1. Presença, na parte baixa das seqüências de solos, de zonas de solo espesso e permeável.
2. Leitos dos riachos passando por grandes zonas aluviais arenosas **ou permeáveis** de grande superfície. Avalia-se que, quando mais de 1 a 2% da superfície total da BHD é **coberta com solos aluviais arenosos,** deve-se aplicar um valor de CL de 0.9. Uma zona aluvial acima de 4% corresponderá a um CL de 0.8.
3. Leito dos riachos passando por depressões, antigos lagos ou zonas sem relevo suscetíveis de infiltrar, reter ou estocar um volume d'água importante.

Toposeqüência: ver fig. p. 57

A definição do fator CL é subjetiva e requer uma grande experiência na avaliação do funcionamento hídrico global da bacia, das toposeqüências dos solos e da capacidade da rede de drenagem em estocar uma parte dos deflúvios que a atravessam. Procurar, se necessário, a ajuda de um especialista.
Quando se identifica **claramente** a presença de um ou vários mecanismos de retenção d'água, deve-se aplicar um fator de correção CL diferente de 1, de acordo com a seguinte tabela:

Fator de correção CL

Importância mecanismo de retenção	Muito elevada	Elevada	Normal	Fraca ou Nula
Fator CL	*0.8*	*0.9*	*1*	*1.2*

- O fator CL pode excepcionalmente, em alguns casos de retenção muito importante, ser inferior a 0.8. Neste caso, sua avaliação implicará num estudo específico.
- Quando não existe nenhuma zona de retenção importante no percurso da água, aplica-se um fator CL de 1.2.

Importante

Em uma região homogênea, o fator CL será naturalmente maior nas pequenas BHD, as quais são, geralmente, desprovidas de zonas aluviais.

(1) Fora da retenção já realizada no solo, no próprio local onde cai a chuva, retenção que já foi integrada no valor de L_{600} indicado para cada TS ou UMP.

Exemplo de uma sequência de solos que provoca retenção do escoamento

Toposeqüência: é uma seqüência de solos, desde as partes mais altas do relevo até o fundo dos vales. Quando, em uma determinada UMP, a mesma seqüência de solos se repete com freqüencia, ela constitui uma das toposeqüências características da UMP.

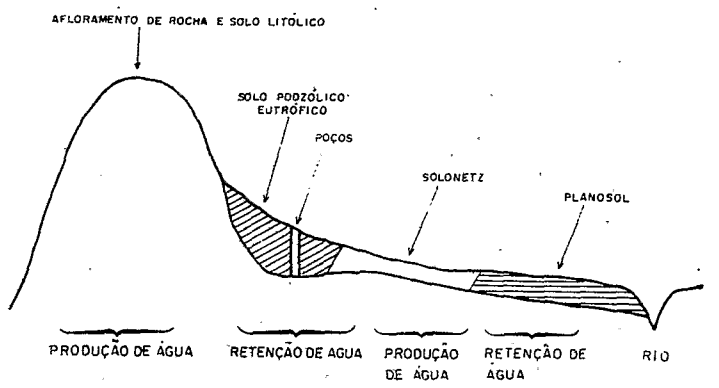
Assim, a toposeqüência observada na região de Juatama (Ceará) que associa:

- *Solos Litólicos + Afloramentos de rocha nas zonas mais altas.*
- *Solos Podzólicos Eutróficos espessos nas zonas imediatamente abaixo, ainda com forte declividade.*
- *Solonetz impermeáveis e rasos nas partes inferiores ainda com declividade.*
- *Planossolo com camadas de areias espessas no fundo dos vales,*

constitui uma toposeqüência freqüentemente observada nas regiões muito acidentadas, onde se observa "inselbergs" (ou afloramentos rochosos que podem apresentar uma forma semelhante ao Pão de Açúcar - RJ).

Nesta toposeqüência, tanto os solos Podzólicos quanto os Planossolos são **arenosos e muito espessos,** *pois podem atingir 2 m. Eles reterão uma parte importante dos escoamentos gerados pelos solos mais impermeáveis situados imediatamente a montante. Neste tipo de toposeqüência, a espessura muito forte dos solos situados a jusante justifica um fator CL de 0.8.*

23



TOPOSEQUÊNCIA TÍPICA NA REGIÃO DE JUATAMA

Etapa 4: Avaliação da pluviometria

■ Determinação do total anual médio das precipitações

A estimativa da pluviometria anual é muito importante: cada 100 mm de chuva suplementar provoca um acréscimo de 40% no escoamento.

A avaliação do total anual (P) das precipitações na BHD deve ser realizada com um mapa de isoietas. Recomenda-se para isso, utilizar o mapa de isoietas homogeneizadas

do Nordeste na escala de 1:2.500.000 e 1:1.000.000, publicado pela SUDENE, ou qualquer outro mapa de isoietas homogeneizadas mais detalhado, quando existir. Encontra-se, no final deste manual, uma redução na escala 1:5.000.000 deste mapa de isoietas.
Nas bacias menores, quando as variações da pluviometria não são elevadas, pode-se admitir que toda a bacia recebe a mesma pluviometria anual (P). Isso acontece sempre nas BHD inferiores a 10 km^2, para as quais se pode utilizar diretamente o resultado da interpolação das isoietas.

Quando existem dúvidas

Quando o reconhecimento no campo evidencia condições pluviométricas locais excepcionais, impostas, por exemplo, pelo relevo, e quando se dispõe, por outra parte, de uma informação pluviométrica local complementar , recomenda-se tentar melhorar a avaliação da precipitação já efetuada com o mapa de isoietas. Esta avaliação representa sempre um trabalho suplementar e deverá ser realizada com a ajuda de hidrólogos ou meteorólogos.

Quando a BHD é muito grande

Quando a diferença de precipitação entre a parte da BHD que recebe mais chuva e a parte que recebe menos é superior a 200 mm, as isoietas que atravessam a BHD deverão ser traçadas. O cálculo da precipitação média Pi deverá ser realizado para cada Unidade de Mapeamento e Pedológico (UMPi), seja por planimetragem, seja efetuando um cálculo simplificado, aplicando-se a fórmula: $Pi = (P_{max} + P_{min})/2$.

Quando a diferença entre a precipitação máxima (P_{max}) e a mínima (P_{min}) da UMP é superior a 300 mm, a unidade de solo deve ser subdividida em duas partes pela isoieta média e os cálculos da chuva média deverão ser realizados separadamente para cada parte.

■ **Determinação da zona climática e da correção climática C**

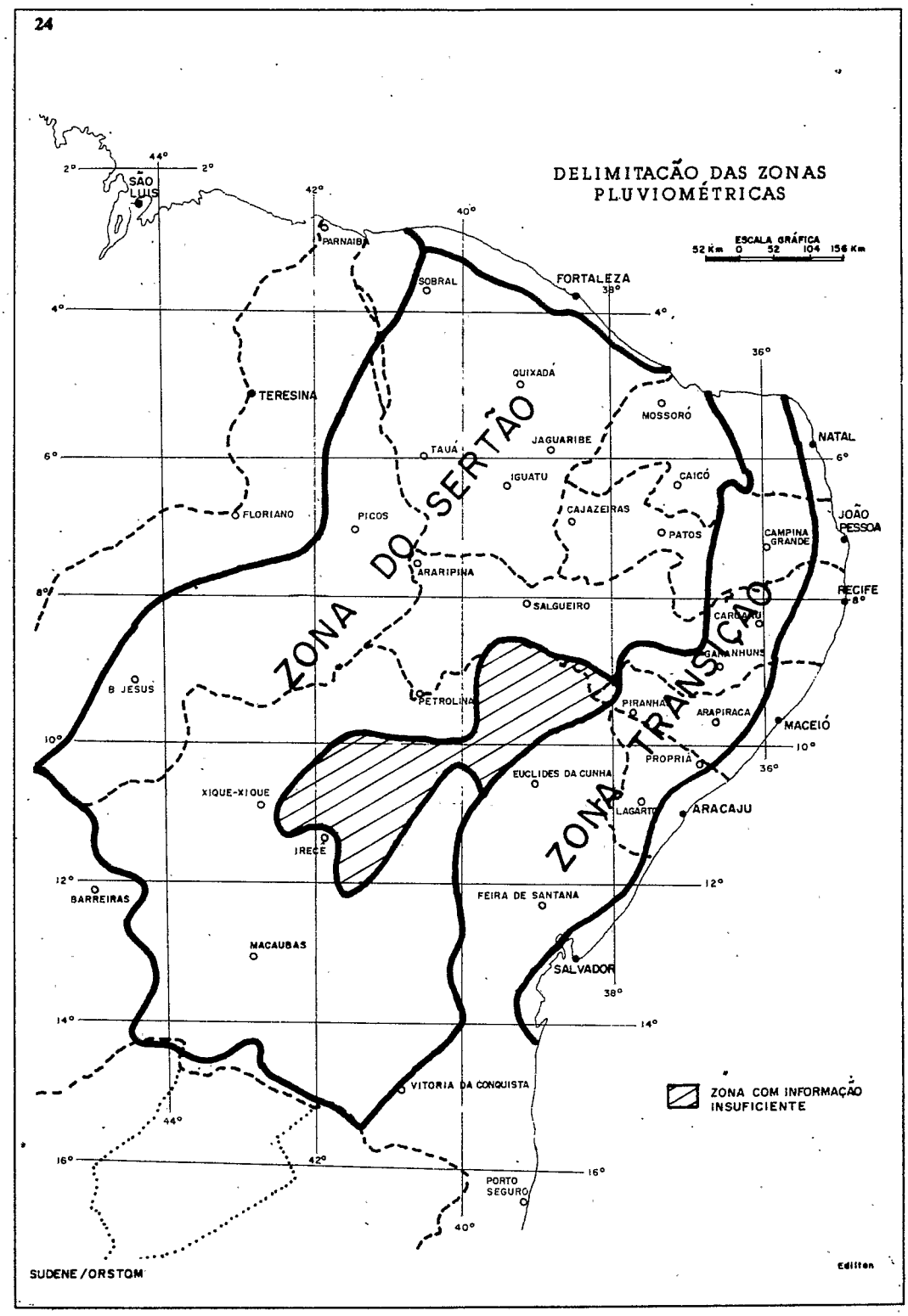
A delimitação das zonas climáticas da figura 24 corresponde a zonas pluviométricas globalmente homogêneas.

O coeficiente climático C vale 1 na zona "SERTÃO" e 0.5 na zona "TRANSIÇÃO".

Admite-se que o coeficiente **C** varia gradualmente de 1 para 0.5 quando se passa de uma zona para outra. Esta faixa intermediária possui uma largura total de, aproximadamente, 50 km. Nesta faixa, calcula-se **C** supondo uma variação contínua entre as duas zonas.

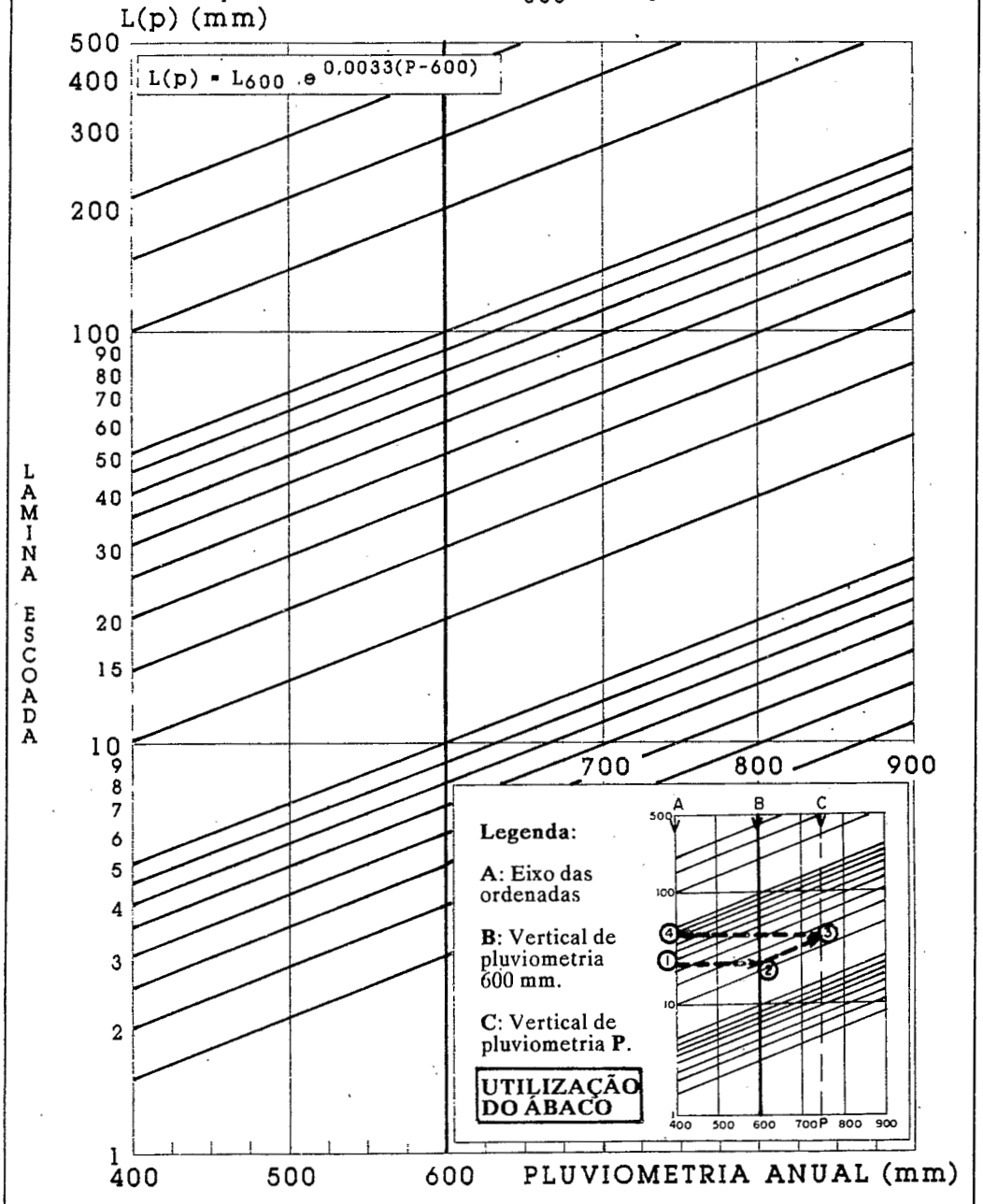
Etapa 5: Cálculo da lâmina escoada L(P)

A lâmina escoada média anual na BHD **(L(P))** deve ser calculada a partir do valor de L_{600} corrigido, da precipitação média P e do fator climático C.
O cálculo pode ser realizado, seja com o ábaco da figura 25 seja com a seguinte fórmula:


24
DELIMITACÃO DAS ZONAS PLUVIOMÉTRICAS
ESCALA GRÁFICA
52 Km 0 52 104 156 Km
SÃO LUIS
PARNAIBA
SOBRAL
FORTALEZA
TERESINA
QUIXADÁ
MOSSORÓ
NATAL
TAUÁ
JAGUARIBE
IGUATU
CAICÓ
FLORIANO
PICOS
CAJAZEIRAS
PATOS
CAMPINA GRANDE
JOÃO PESSOA
ARARIPINA
RECIFE
SALGUEIRO
CARUARU
GARANHUNS
ZONA DO SERTÃO
ZONA DE TRANSIÇÃO
B JESUS
PETROLINA
PIRANHAS
ARAPIRACA
MACEIÓ
PROPRIA
EUCLIDES DA CUNHA
XIQUE-XIQUE
LAGARTO
ARACAJU
IRECÊ
BARREIRAS
FEIRA DE SANTANA
MACAUBAS
SALVADOR
VITORIA DA CONQUISTA
ZONA COM INFORMAÇÃO INSUFICIENTE
PORTO SEGURO
SUDENE/ORSTOM
Editon

CÁLCULO DA LÂMINA ESCOADA ANUAL - L(p)

A partir do valor de L_{600} e da pluviometria P.



Etapas de utilização:

(1) Colocar o valor de $L_{(600)}$ no eixo das ordenadas.
(2) Reportar horizontalmente este valor até a vertical de pluviometria **P** = 600 mm.
(3) Seguir uma paralela às retas inclinadas até cruzar a vertical de pluviometria P, procurada.
(4) Voltar ao eixo das ordenadas para ver o valor de **L(P)** em mm.

Este ábaco pode ser utilizado para valores de **P** entre 400 e 900 mm.

$$L(P) = L_{600}\text{ corrigido} \times C \times e^{A(P-600)}$$

A é um coeficiente **que vale normalmente 0.0033** e pode variar entre 0.0025 e 0.0040, de acordo com a tabela seguinte:

Valor do coeficiente A

BHD com L_{600}<15 mm	Caso geral	BHD com L_{600} >60 mm
0.0040	*0.0033*	*0.0025*

Etapa 6: cálculo do volume médio escoado

O volume escoado anual médio V_{esc} (em m^3) é calculado pela fórmula:

$$V_{esc} = S \times L(P) \times 1000$$

onde:

S é a superfície da Bacia Hidrográfica de Drenagem em km^2

L(P) é a lâmina escoada média em mm.

3. Cálculo da vazão máxima admissível no sangradouro

Propõe-se um método de cálculo da vazão máxima admissível no sangradouro (ou vazao de pico de projeto). Esta vazão corresponde à vazão de pico excepcional que pode acontecer em média, a cada 100 ou 200 anos.

Para obras de porte maior ou quando a ruptura do açude constitui uma ameaça grave para a vida das populações situadas a jusante, recomenda-se acrescentar em 50% o valor da vazão máxima admissível no sangradouro proposto.

O cálculo da vazão máxima admissível no sangradouro divide-se em três fases principais:

- cálculo da vazão de pico da cheia do projeto, ou seja, a vazão natural da cheia no lugar do barramento, sem levar em conta a influência do açude.
- Cálculo do amortecimento da cheia pela futura represa.
- Avaliação do risco de ruptura das represas situadas a montante.

3.1 Cálculo da vazão de pico da cheia de projeto

A vazão de pico da cheia de projeto Q_x é calculada pelas fórmulas seguintes que são apresentadas na figura 26:

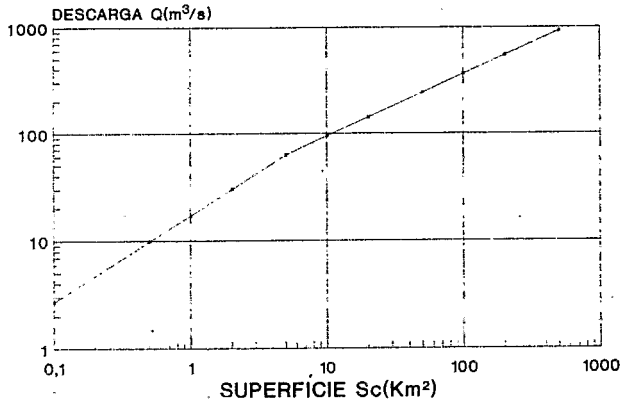
$Sc < 5km^2$	$Q_x = 17 \times (S_c)^{0.8} \times F_c$
$Sc > 5km^2$	$Q_x = 25 \times (S_c)^{0.58} \times F_c$

No caso de o fator corretivo Fc valer 1, pode-se ler diretamente o valor de Q_x na tabela seguinte. No caso geral, Sc e Fc são calculados como indicado a seguir.

Vazão da cheia de projeto em função da superfície, para Fc = 1

$Sc(km^2)$	*0.1*	*0.5*	*1*	*2*	*5*	*10*	*20*	*50*	*100*	*200*	*500*
$Q_x(m^3/s)$	*2.7*	*9.8*	*17*	*30*	*62*	*95*	*142*	*242*	*361*	*540*	*920*

26 DESCARGA MÁXIMA EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE



■ **Etapa 1: determinação da superfície de contribuição da cheia $Sc(km^2)$**

- Calcular a superfície S1 ocupada por solos com $L_{600} < 4$ mm.
- Calcular a superfície S2 ocupada por solos com $5 \text{ mm} < L_{600} < 30$ mm.
- Calcular a superfície S3 ocupada por solos com $L_{600} > 30$ mm.
- Sc é calculado pela fórmula:

$$Sc = 0.1\,S1 + 0.5\,S2 + S3$$

Importante

Quando a BHD só contém solos com L_{600} superior a 30 mm, o que acontece geralmente nas zonas com subsolo cristalino, ou quando não se conhece os grupos de solos da BHD, tomar Sc = S.

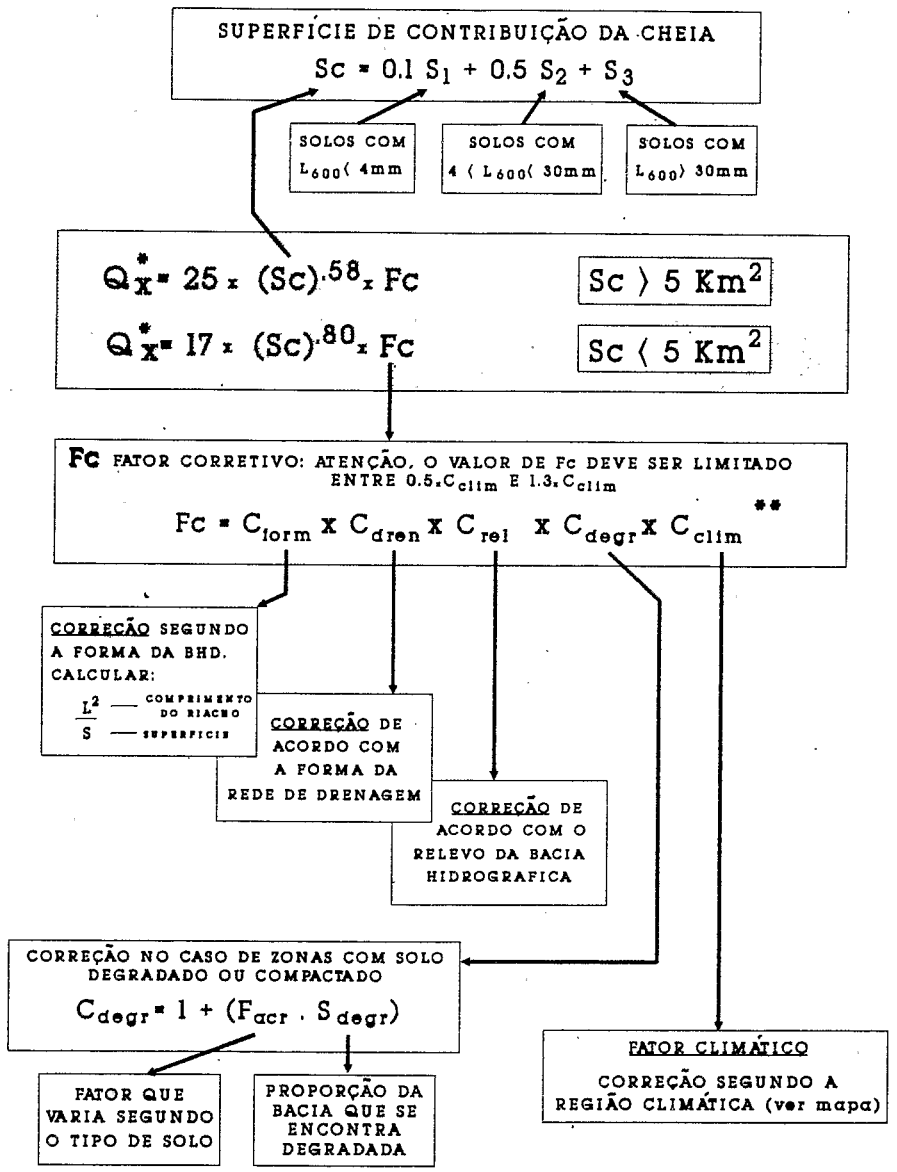
■ **Etapa 2: determinação do fator de correção Fc**

Fc é um fator de correção que pode variar entre 0.5 e 1.2 e introduz correções correspondentes aos fatores seguintes, como indicado na figura 27:

- **forma** da Bacia Hidrográfica de Drenagem (fator C_{form});
- forma da **rede de drenagem** (fator C_{dren});
- **relevo** (fator C_{rel});

27

ETAPAS DO CÁLCULO DA VAZÃO DE PICO Q_x DAS CHEIAS



* Sem aplicar os coeficientes de amortecimento da cheia na represa e sem considerar o risco de ruptura dos açudes situados a montante.

** Em condições normais, todos esses fatores corretivos têm o valor 1.

- existência de **zonas particularmente degradadas**, suscetíveis de apresentar solos quase impermeáveis (fator C_{degr});
- **condições climáticas** especiais ao microclima da BHD (fator C_{clim}).

> **Importante**
>
> *Em condições normais e na zona climática do Sertão, todos os fatores corretivos têm o valor 1. Só se deverá efetuar os cálculos de correção quando a BHD apresentar características especiais.*

☐ Influência da forma da BHD (fator de correção C_{form})

Deve-se determinar no mapa o comprimento **(L)** do rio mais longo e a superfície **(S)** da BHD. A tabela seguinte fornece os valores do fator C_{form} a serem aplicados.

Fator C_{form}

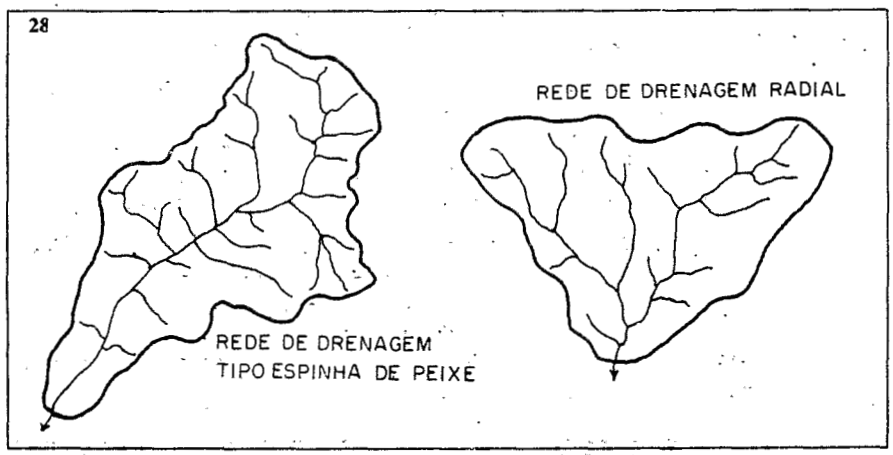
L^2/S	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
C_{form}	*1*	*1*	*0.85*	*0.75*	*0.70*	*0.65*	*0.63*

☐ Influência da forma da rede de drenagem: (fator C_{dren})

Atenção: *Esta correção deve ser aplicada unicamente quando o desenho da rede de drenagem tem uma característica muito marcante.*

Dois tipos especiais de configuração da rede de drenagem podem alterar o fator C_{dren}.

1) Rede de drenagem em "**espinha de peixe**". Quando o riacho ou o talvegue principal ocupa uma posição central com afluentes de importância secundária nos dois lados. As cheias nesse tipo de bacia são menos perigosas. C_{dren} pode ser diminuído, no máximo em 25%, variando, então, entre 0.75 e 1.0.



2) Rede de drenagem "**radial**". Quando um riacho ou um talvegue principal é formado pela convergência de dois ou mais rios de igual importância, juntando-se logo a

montante do açude. As cheias nesse tipo de bacia serão mais perigosas. C_{dren} pode ser aumentado, no máximo em 50%, variando, então, entre 1 e 1,5.

Fator de correção C_{dren}

Aspecto da rede de drenagem	Valor do fator C_{dren}
Normal	*1*
Espinha de peixe	*0.75 a 1*
Radial	*1 a 1,5*

□ Influência do relevo da BHD: (fator C_{rel})

O fator C_{rel} pode variar entre 0.6 e 1.2. O relevo-padrão corresponde a um relevo ondulado a forte, com declividades transversais da ordem de 10 a 15%, e longitudinais de 0.5 a 2%.

Quando o relevo dominante na BHD for muito mais forte (ou seja, montanhoso e escarpado), C_{rel} poderá alcançar 1.10 ou, excepcionalmente, 1.20, quando o leito dos riachos for liso e desprovido de vegetação, permitindo, assim, uma evacuação rápida das cheias.

Fator de correção C_{rel}

Relevo	Montanhoso e Escarpado	Forte Ondulado	Ondulado	Suave Ondulado	Plano
Declividades transversais	**> 25%**	**15 a 25%**	**15 - 8%**	**3 - 8%**	**0 - 3%**
C_{rel}	*1.1 a 1.2*	*1*	*1*	*0.8*	*0.6*

A definição dos relevos provém dos mapas de solo da EMBRAPA

□ Influência das zonas de solos compactados, truncados ou de zonas urbanizadas (fator C_{degr})

As zonas degradadas, geralmente pela ação do homem, ou urbanizadas, podem aumentar sensivelmente o volume escoado e a vazão de pico e diminuir os tempos de transferência das cheias. Essas zonas muito impermeáveis podem ser constituídas de encrostamentos (**"películas de superfície"**), em zonas compactadas pelo homem ou em zonas de solos "truncados", quer dizer, cujas camadas superficiais já foram levadas pela erosão.

A correção deve ser proporcional à fração S_{degr} da bacia efetivamente degradada:

$$C_{degr} = 1 + (F_{acr} \times S_{degr})$$

O fator F_{acr} leva em conta as diferenças dos solos quanto à produção de escoamento, como indicado na tabela abaixo.

Valor do L_{600}	Valor de F_{acr}
Inferior a 30 mm	*1.0*
Superior a 30 mm	*0.5*

Importante

Esta correção C_{degr} *só deverá ser realizada quando uma parte importante da BHD (superior a 15%) for efetivamente degradada. Degradações localizadas e de pequena superfície (estradas, campo de futebol...) não devem ser levadas em conta.*

Exemplo:

Assim, por exemplo, uma bacia composta de solos com L_{600} > 30 mm apresentando degradações importantes em 20% da sua superfície (S_{degr} = 20%), terá um fator C_{degr} de 1.10, calculado da seguinte maneira:

$$C_{degr} = 1 + F_{acr} \times S_{degr} = 1 + (0.5 \times 0.20) = 1.10$$

□ **Correções climáticas (fator C_{clim})**

Apesar da relativa homogeneidade, no Nordeste semi-árido, das características das intensidades e das fortes chuvas em 24 h, observa-se diferenças que tornam, às vezes, necessária a aplicação de uma correção climática.

Assim, na zona de transição (ver figura 24), aplica-se um fator C_{clim} de 0.75. C_{clim} pode atingir em certas regiões 1.1 a 1.2, em particular no sul do Ceará e oeste da Paraíba (para estas regiões, procurar informações mais detalhadas nas publicações hidrológicas da SUDENE).

□ **Cálculo final do fator de correção Fc**

Fc é calculado pela fórmula:

$$Fc = C_{form} \times C_{dren} \times C_{rel} \times C_{degr} \times C_{clim}$$

Atenção:

Fc não pode ser inferior a 0.5 x C_{clim}; se isto for o caso, considerar: **Fc = 0.5 x C_{clim}.**

Fc não pode ser superior a 1.5 x C_{clim}; se isto for o caso, considerar: **Fc = 1.5 x C_{clim}.**

3.2 Amortecimento da cheia pela represa e outros espelhos d'água a montante

Toda represa amortece ou diminui a vazão de pico da cheia que a atravessa pois, uma parte da vazão que entra na represa apenas contribui para elevar o nível da água.

A vazão Q_x da cheia de projeto indicada acima deve ser corrigida da forma seguinte:

■ **Informações necessárias**

Para calcular o amortecimento das cheias precisa-se dos valores de:

H_v = Altura máxima da água no sangradouro (em m)

S = Superfície da Bacia Hidrográfica de Drenagem (BHD)

S_{amort} = Superfície dos espelhos d'água que podem amortecer as cheias.

■ Cálculo de S_{amort}

S_{amort} é calculado a partir da superfície máxima S_x do açude e da superfície total S_{lag} das outras aguadas (açudes, lagoas ou depressões) que podem existir dentro da BHD.

- **Caso 1:** Se $S_{lag} = 0$, ou quando as outras aguadas estão situadas próximas das cabeceiras dos riachos da BHD:

$$S_{amort} = S_x$$

- **Caso 2:** Quando as outras aguadas estão situadas imediatamente a montante do açude projetado:

$$S_{amort} = S_x + 0.8\ S_{lag}$$

- **Caso 3:** Quando as outras aguadas estão situadas no centro da BHD, mas controlando ainda 50% do escoamento:

$$S_{amort} = S_x + 0.3\ S_{lag}$$

Nos casos intermediários, interpolar entre estas três fórmulas.

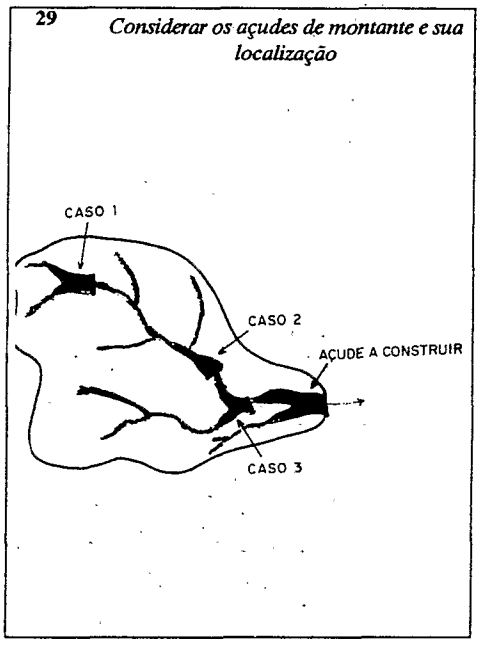
■ Cálculo final da cheia com amortecimento

Calcula-se, em seguida, o coeficiente intermediário X_o:

$$X_o = \frac{S}{H_v \cdot S_{amort}}$$

- Quando X_o é superior a 100, o amortecimento das cheias é desprezível.
  Não aplicar, neste caso, a correção.
- Quando X_o é inferior a 100, proceder da seguinte maneira:
  - — **para as BHD de superfície S superior a 50 km²**, multiplicar X_o por 0.66.
  - — Calcular o fator de amortecimento das cheias (K_{amort}) a partir do ábaco da fig. 30.

29 *Considerar os açudes de montante e sua localização*

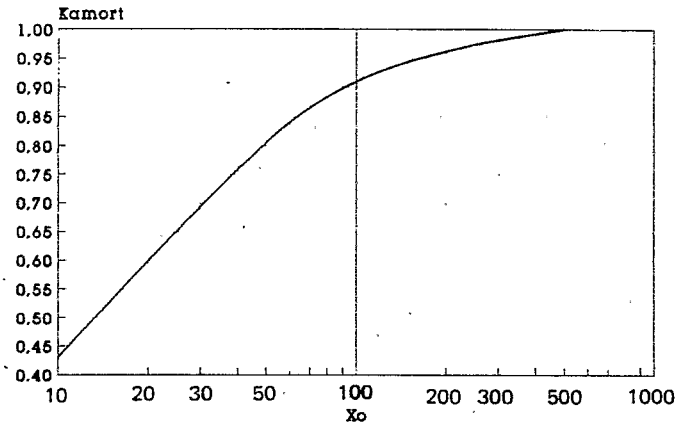


Corrigir a vazão da cheia de projeto pela fórmula:

$$Q_x \text{ amortecida} = Q_x \times K_{amort}$$

30

CÁLCULO DO FATOR DE AMORTECIMENTO
DAS CHEIAS NOS PEQUENOS AÇUDES



Importante

Todas as superfícies "S", "S_x", "Sl_{ag}" e "S_{amort}" mencionadas nesta etapa, deverão ser obrigatoriamente expressas na mesma unidade (m^2, ha ou km^2).

3.3 Risco de rutura dos açudes situados a montante

Muitos arrombamentos são provocados pela rutura em cascata de açudes:
Um açude, ao se romper, provoca uma cheia excepcionalmente breve e intensa que pode provocar o arrombamento dos açudes situados a jusante.

Quando um dos açudes situados a montante **tem um volume superior a 50% do volume do açude projetado, deve-se averiguar se este açude não apresenta qualquer risco de arrombamento.**

Para isso é necessário:

a) verificar dimensionamento do sangradouro deste açude, seguindo a presente metodologia.

b) verificar a qualidade da construção da parede do açude e do seu sangradouro, dando uma atenção especial às ombreiras do sangradouro.

Caso exista risco de arrombamento de qualquer um dos açudes situados a montante, deve-se adotar uma das seguintes soluções:

- **Eliminar o risco**, reformando o açude perigoso. Pode-se, por exemplo, utilizar o trator previsto para a construção, para ampliar o sangradouro do açude em questão.
- Caso isto não seja possível, deve-se procurar um especialista que avaliará com maior precisão os riscos e indicará as providências a serem tomadas.
- Em última instância, desistir de construir o açude naquele local.

4. Dimensionamento do açude

O dimensionamento do açude, ou seja, a escolha do seu volume V_x (ou, na prática, de sua profundidade H_x) faz-se, em primeiro lugar, a partir do valor do volume escoado anual médio V_{esc}, calculado como indicado no item 2 deste capítulo, quer dizer, a partir da **quantidade de água gerada pela BHD.**

O melhor açude não é sempre o maior possível; quanto maior o açude, ou seja, quanto maior a razão V_x/V_{esc}, maiores serão os problemas seguintes:

— O açude sangra cada vez menos e passa a se salinizar, podendo se tornar um **açude morto** se não for utilizado (ver item B5-3).
— Os eventuais açudes situados mais a jusante vão recebendo cada vez **menos água.**
— O custo da obra aumenta e o investimento pode não ser rentável (no caso de um empreendimento privado).
— Grandes áreas de terra, muitas vezes férteis, serão alagadas.

O tamanho ideal do açude **depende muito do uso previsto**, como veremos a seguir.

4.1 Dimensionamento de um açude destinado ao abastecimento

Um açude destinado ao abastecimento deve ser, na medida do possível, **profundo.** A "resistência" do açude às estiagens é praticamente proporcional a sua **profundidade**, pouco importando sua capacidade de armazenamento (o volume utilizado para o abastecimento é, salvo em açudes muito pequenos, desprezível: ver item B5-1).

Se a capacidade do açude for maior do que o volume escoado médio ($V_x > V_{esc}$) e se sua profundidade for bem superior à lâmina perdida por evaporação e infiltração, o açude passará a estocar maiores volumes de um ano para outro, diminuindo assim a sua probabilidade de secar.

As duas variáveis de maior importância são, então, a profundidade H_x e a razão V_x/V_{esc}.

Procura-se fazer o açude **o mais profundo possível, dentro das limitações impostas por:**

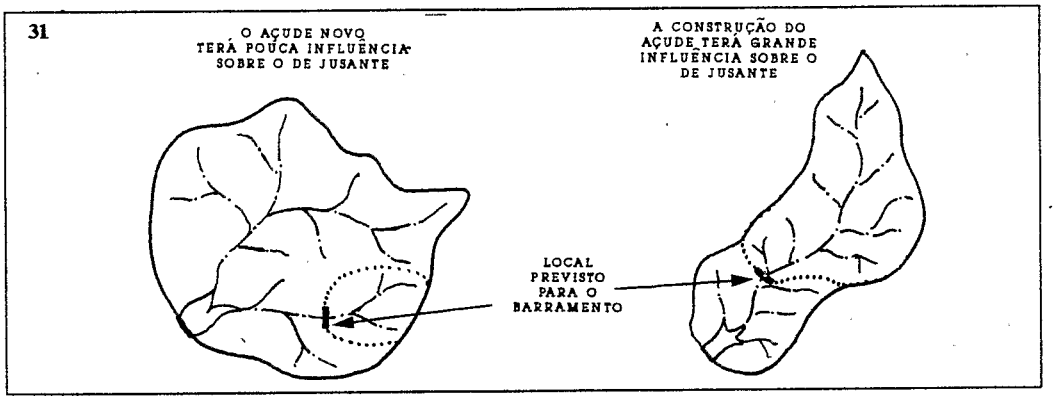
- o capital disponível;
- a topografia do local do barramento;
- as necessidades de água a jusante da barragem;
- o perigo da salinização.

As duas primeiras restrições variarão para cada caso particular; as duas últimas são relacionadas à razão V_x/V_{esc} como mostrado a seguir.

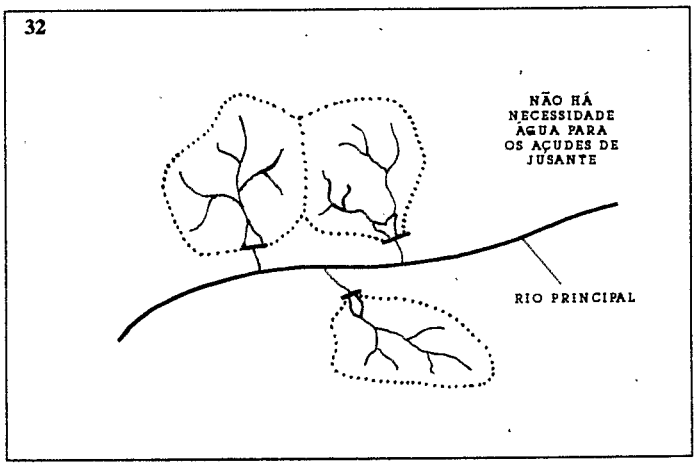
■ Necessidades de água a jusante da barragem

Essa restrição pode ser muito relevante quando existem um ou vários açudes situados a jusante. Deve-se verificar qual é a importância da contribuição do riacho a ser barrado, para esses açudes.

De fato, a redução da vazão do riacho pode não afetar muito os açudes de jusante se estes tiverem recebendo água de outros riachos (figura 31). Ao contrário, se o riacho constituir a principal fonte de alimentação dos açudes de jusante, toda redução da vazão será muito sensível, podendo ser dramática se excessiva.



No entanto, existem também outras situações em que a diminuição do escoamento a jusante não causa problema algum. É o caso, por exemplo, de açudes situados em pequenos riachos laterais de rios importantes, próximos da sua confluência (figura 32).



A figura 33 permite estimar a percentagem do volume escoado que será repassado (sangrado) para jusante em função da profundidade H_x e da razão V_x/V_{esc}.

As necessidades de cada caso permitirão determinar um valor limite do volume V_x a não ser ultrapassado.

Exemplo:
Se se deseja que 50% do escoamento seja, em média, assegurado para os açudes de jusante, o volume do açude deverá ser inferior a 0.85 V_{esc}, para um açude de cerca de 6 m de profundidade (V_x/V_{esc} <0.85), e inferior a .75 V_{esc} para um açude de apenas 4 m de profundidade máxima.

■ Risco de salinização

O açude é um concentrador de sais. Ver item B5-3

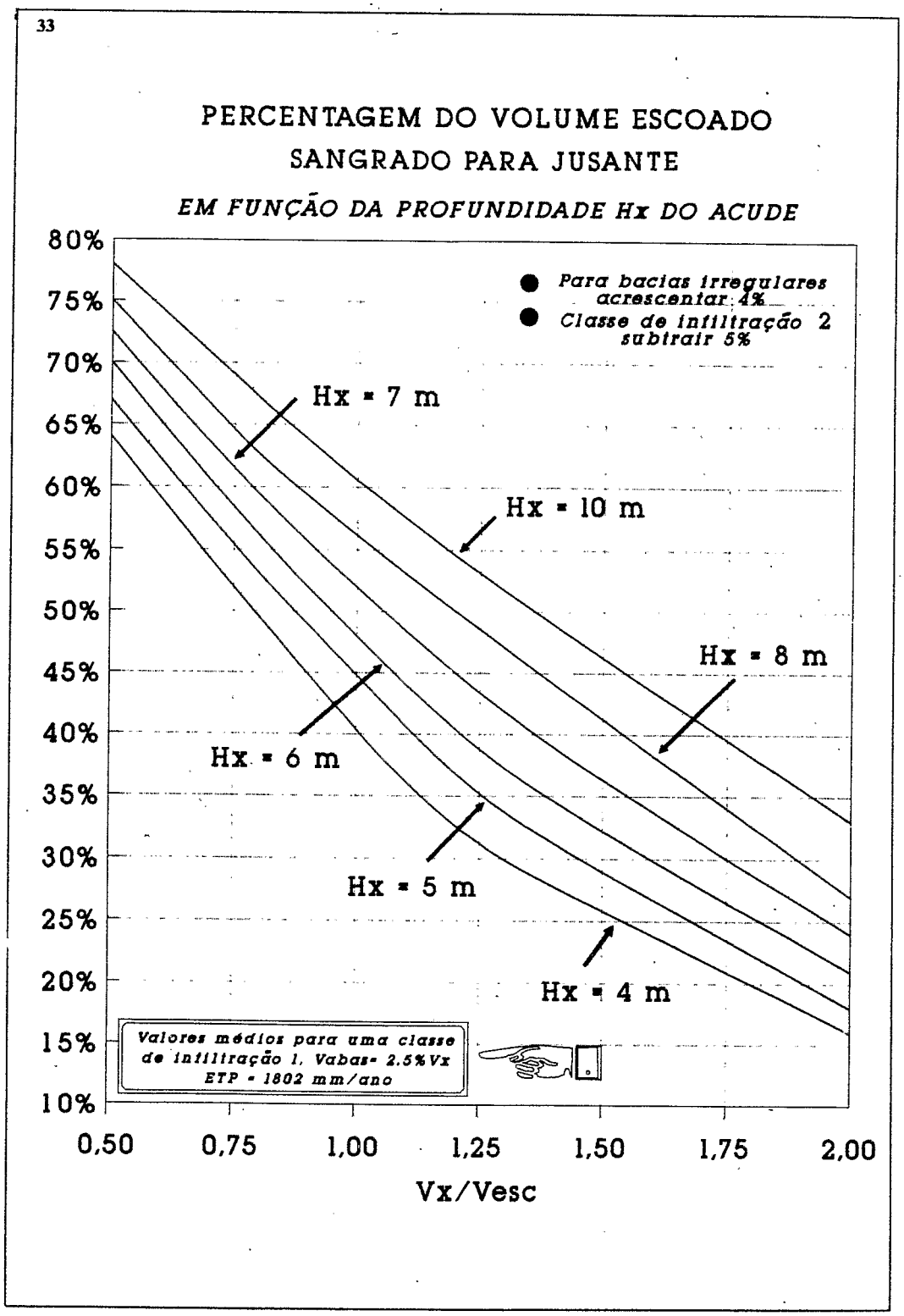
Um açude "à prova d'água", que raramente sangra, é um açude que tem tendência a se salinizar.

Apenas a **retirada de água** para o abastecimento e a existência de **infiltração** tendem a reduzir este processo.

Entretanto, no caso de açudes de várias centenas de milhares (ou até de alguns milhões) de m^3, como é comum para reservatórios construídos para o abastecimento de pequenas comunidades, vilas ou distritos, os volumes correspondentes são geralmente desprezíveis. Isto contribui para o fenômeno de salinização progressiva, o qual pode tornar a água imprópria para o abastecimento humano.

É muito difícil prever a salinidade média do açude pois, além de H_x e V_x/V_{esc}, esta **varia muito** em função do volume retirado e da importância das infiltrações.

33


PERCENTAGEM DO VOLUME ESCOADO
SANGRADO PARA JUSANTE
EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE Hx DO ACUDE
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
Para bacias irregulares acrescentar 4%
Classe de infiltração 2 subtrair 5%
Hx = 7 m
Hx = 10 m
Hx = 8 m
Hx = 6 m
Hx = 5 m
Hx = 4 m
Valores médios para uma classe de infiltração 1, Vabas= 2.5%Vx
ETP = 1802 mm/ano
0,50
0,75
1,00
1,25
1,50
1,75
2,00
Vx/Vesc

Algumas orientações gerais, no entanto, são necessárias para evitar problemas agudos.

- É desaconselhável, em todos os casos, construir açudes para o abastecimento humano em riachos cuja água apresente uma condutividade média superior a 300 micromhos.
- Os açudes mais perigosos são aqueles pouco profundos (4-5 m) e superdimensionados (V_x/V_{esc} superior a 0.8-1).
- Em açudes de profundidade superior a 8 m, pode-se aceitar valores de V_x/V_{esc} de até 1.5.
- Reportar-se ao capítulo B5-3 para melhor entender e avaliar o risco de salinização.

■ Segurança do abastecimento

A segurança do abastecimento, ou seja, a probabilidade das necessidades serem satisfeitas é o critério de maior importância. A figura 34 mostra qual é a probabilidade das necessidades não serem satisfeitas (o nível do açude fica abaixo de um sexto da profundidade máxima) segundo a sua profundidade H_x e a razão V_x/V_{esc}. As linhas cheias correspondem a bacias hidrográficas normais e as linhas pontilhadas a bacias "irregulares" (ver quadro).

Exemplo: A topografia do local previsto para construção do açude indica que, para uma profundidade máxima do açude H_x = 5 m, o volume V_x correspondente fornece uma razão V_x/V_{esc} de 0.88: a probabilidade das necessidades de abastecimento não serem satisfeitas, no caso de uma bacia que comporta outros açudes (escoamentos irregulares), conforme a figura 34, é da ordem de 17 %.

Importante:

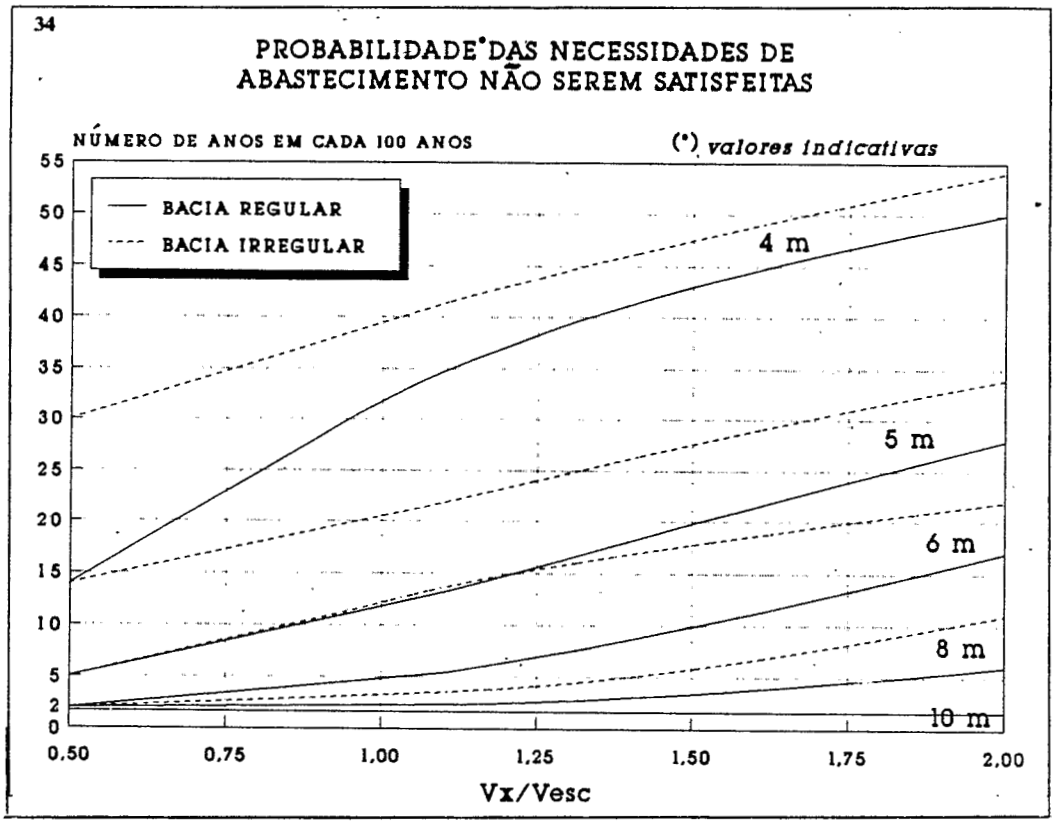
Essas normas devem ser consideradas como **indicativas** na medida em que elas **podem apresentar certa variação** de acordo com a importância das perdas (evaporação + infiltração) bem como com fatores mais complexos (regularidade das chuvas durante o inverno, etc...).

Elas foram estabelecidas para as condições do sertão Norte, para açudes de classe de infiltração 1 (10 % de aumento das perdas por evaporação) e para um volume de abastecimento anual igual a 2.5 % de volume total V_x. Elas podem, assim, ser consideradas como valores limites pessimistas para áreas de menor evaporação. Atenção: em zonas onde os escoamentos subterrâneos são importantes e duradouros (minações), principalmente no Agreste, ou onde a caixa do açude é reabastecida por aluviões, a probabilidade do açude secar será muito menor.

O que é uma "bacia irregular"?

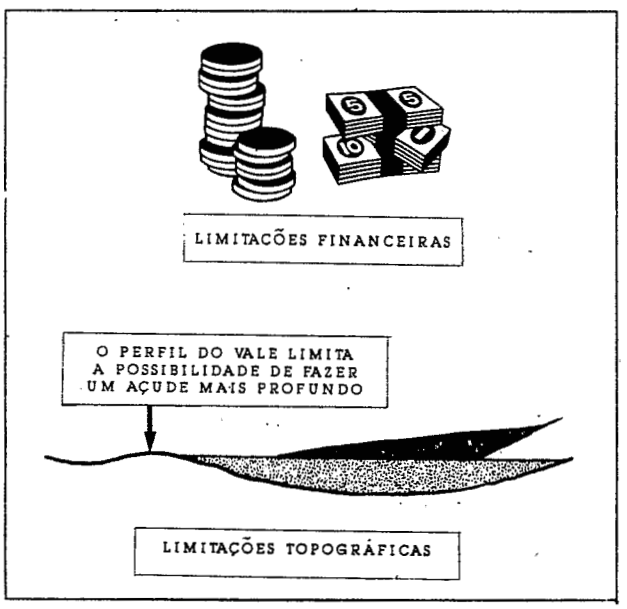
Algumas bacias, por comportarem outros açudes ou zonas de retenção (tais como aluviões arenosos) apresentam escoamentos mais irregulares.
Isto significa que, para um determinado volume anual médio V_{esc}, um açude situado numa bacia irregular terá sangrias menos freqüentes mas, em compensação, um pouco mais fortes do que se fosse situado numa bacia regular.
Isto não será favorável para perímetros com cultivos perenes que precisam de uma irrigação constante e regular.

Açudes de mais de 8 metros (com poucas infiltrações e volume de abastecimento igual a 2.5% de V_x) têm uma fraca probabilidade (2 anos em cada século) de secar. Para açudes de maior infiltração (classe 2), pode-se aumentar o valor da probabilidade da figura 34 em 10 % (5 % para açudes com H_x > 8 m). Para um volume de abastecimento anual dobrado (5 % de V_x), aumentar a probabilidade em 5 %.



■ **Como dimensionar o açude?**

Procura-se fazer o açude mais profundo possível, porém:



- Haverá casos em que a procura de uma maior profundidade trará um **forte aumento** da capacidade do açude **e, conseqüentemente, da razão** V_x/V_{esc}. Será necessário verificar se não haverá problema de salinidade (ver acima) ou de redução de vazão a jusante (figura 31), podendo esses fatores **impor uma limitação** da profundidade do açude.
- A topografia do boqueirão ou a quantidade de dinheiro disponível poderão limitar a altura do açude. Neste caso, verifica-se que a altura H_x limite (e o V_x/V_{esc} correspondente) permitem uma segurança do abastecimento conforme a desejada. Se não for o caso, outro local deverá ser procurado.

A melhor forma de aproveitar um pequeno açude através da irrigação consiste em irrigar um cultivo de ciclo curto logo depois do inverno, como detalhadamente explicitado no item B5-1. Neste caso, o açude (e o perímetro irrigado) deverão ser dimensionados de maneira a otimizar economicamente o investimento: um açude **superdimensionado**, de capacidade maior que o volume escoado médio ($V_x > V_{esc}$) por exemplo, raramente encherá e, assim, não valorizará o acréscimo no investimento que foi necessário para deixá-lo com esta capacidade.

■ Dimensionamento do açude e do perímetro

Recomenda-se planejar o açude para que seu volume V_x fique entre 50 % e 60 % do valor de V_{esc}.

$$\mathbf{0.5\ Vesc < Vx < 0.6\ Vesc}$$

A partir do valor de V_x, calcula-se a profundidade H_x correspondente:

- Se não for possível a construção do açude com esta profundidade (limitação topográfica ou financeira), planejar um açude menor, mas o maior possível dentro das limitações existentes.
- Se H_x for inferior a 2.50 m, ver se há condições de aumentar um pouco o açude sem que o valor de V_x ultrapasse 80 % de V_{esc}.

Para um açude de tamanho recomendado (V_x/V_{esc} = 0.5 - 0.6), calcula-se o valor da superfície potencialmente irrigável S_{pot}, como indicado no item B5-4. A superfície recomendada do perímetro a ser implantado deverá ter dois terços do valor de S_{pot}.

$$S_{peri} = 2\ S_{pot}/3$$

■ Riscos de salinização

Ver papel da sangia no item B5-3

O açude sendo utilizado de maneira intensiva (entre 30 % e 60% da água represada, segundo a profundidade e as perdas, será normalmente aproveitado para irrigar) **não haverá problemas de salinização** (sendo assegurada a drenagem do perímetro).
O fato de deixar o açude com uma capacidade inferior ao volume escoado médio, também contribui para que haja freqüente "lavagem" do açude pelas enchentes.

Pode-se considerar que, três anos em cada quatro, a condutividade média da água de irrigação **será inferior ao dobro do** valor da condutividade média dos escoamentos (desde que o açude seja utilizado a cada ano em que for possível irrigar).

Por isso, em regra geral, não é aconselhável construir pequenos açudes para fins de irrigação em riachos com água de condutividade média superior a 500-600 micromhos, caso aliás pouco freqüente.

■ Quantidade de água sangrada

Para o dimensionamento proposto acima, a freqüência de sangria do açude será da ordem de 55 a 60 %, enquanto o volume sangrado ficará na faixa dos 55 a 65 % do volume escoado recebido, o que pode ser considerado satisfatório.

■ **Uso misto: irrigação depois do inverno + abastecimento**

No caso em que se pretenda utilizar também o açude para o abastecimento, depois do período de irrigação até o próximo inverno, pode-se dimensionar o açude para que V_x/V_{esc} alcance a faixa 0.80 - 1.00, **desde que isto resulte num acréscimo** significativo da profundidade, o que acontecerá quando o valor do coeficiente de abertura K for pouco elevado (300 a 800, por exemplo). O valor de S_{pot} será determinado levando-se em consideração uma cota final H_2 mais alta (ver item B5-4 para o cálculo de S_{pot} e maiores explicações).

5. Dimensionamento do sangradouro

5.1 Definições e explicações

Há dois sistemas para evacuar vazões de cheias fora da bacia hidráulica de uma barragem:

— o sangradouro;

— a descarga de fundo.

Nós nos limitaremos a apresentar os elementos do dimensionamento do sangradouro, sistema utilizado para pequenas barragens de terra.

■ **Cota de sangria**

O açude sangra quando a água transborda acima de uma soleira, ou de um vertedouro, após ter ultrapassado um determinado nível chamado **cota de sangria**. A cota de sangria é igual à cota máxima H_x do açude.

■ **Vazão máxima admissível**

Todo sangradouro é caracterizado pela sua **vazão máxima admissível** Q_a, a qual deve ser igual ou superior à vazão máxima Q_x, calculada como indicado no item 3.

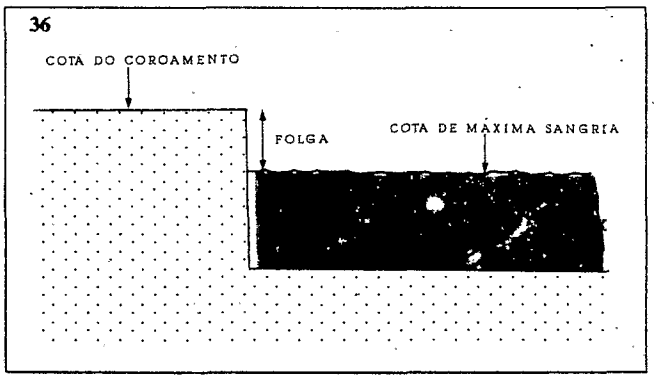
A vazão máxima admissível Q_a depende:

— da largura L do sangradouro;

— da altura H_v da lâmina máxima d'água admissível acima da soleira;

— da forma do vertedor e do canal extravasor. Esta forma é definida pelos perfis transversais e longitudinais do vertedor.

■ **Cota do coroamento da barragem**



A diferença entre a cota do coroamento da parede do açude e a cota do ponto mais baixo da soleira do sangradouro (H_x) deve ser igual a:

Altura da lâmina máxima admissível: H_v + **folga de segurança**, necessária para se precaver contra arriamentos acidentais do maciço e ondas na represa.

Esta folga F pode variar entre 0.50m e 1 m.

(Cota do coroamento - H_x) = H_v + F

■ Como dimensionar o sangradouro

O dimensionamento do sangradouro consiste em definir sua largura **L**, a altura da sua **lâmina máxima admissível H_v** e a **forma** do vertedor.

Para permitir a sangria das maiores cheias, o sangradouro deve, a princípio, apresentar grande comprimento e grande altura (a lâmina vertida será mais alta e mais larga, a vazão admissível maior).
No entanto, isto acarreta dois inconvenientes:

- uma grande altura da lâmina vertida implica num desnível importante entre o coroamento do açude e a cota de sangria. Haverá necessidade de construir uma barragem mais alta (e mais custosa) e uma maior erosão a jusante do vertedor (riscos maiores e necessidades de obras de proteção).
- um sangradouro **muito largo**, por sua vez, não é sempre possível, devido às condições topográficas, e pode ter um custo elevado se for de alvenaria.

A escolha do melhor **par (L, H_v)** dependerá muito das características das encostas do terreno natural, como exemplificado no que segue.

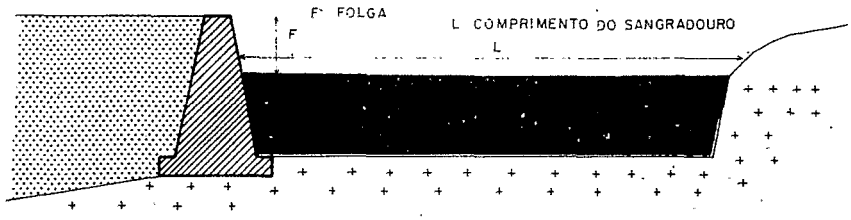
5.2 Dimensionamento de um sangradouro de secção retangular

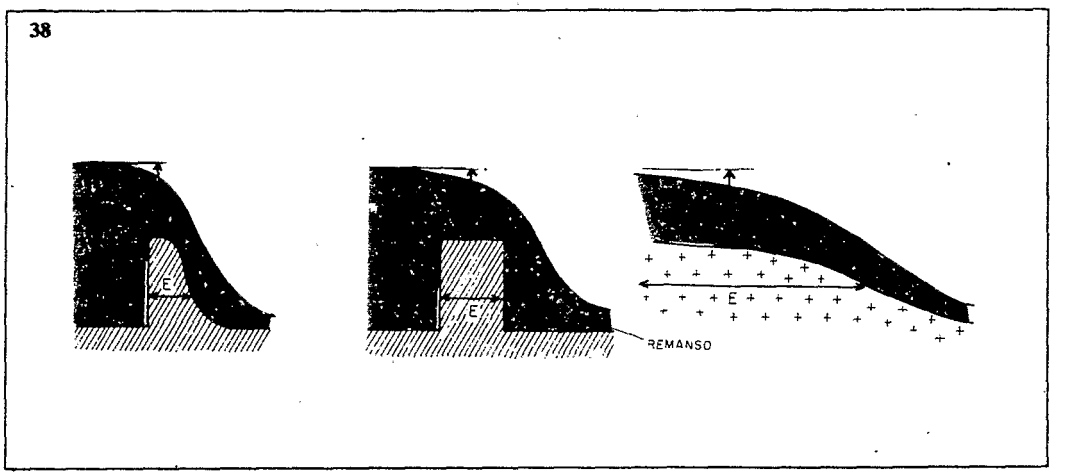
A vazão num sangradouro de secção retangular é calculada pela fórmula:

$$Q_a = C \cdot L \cdot H_v^{1.5}$$

onde (C) é um coeficiente que depende do perfil longitudinal do sangradouro. (C) varia entre 1.4 e 1.95 (ver figura abaixo).

37





Caso 1	Caso 2	Caso 3
$H_v/E > 2$	$H_v/E < 2$	$H_v/E << 2$
forma redonda	arestas agudas	terreno natural

Caso 1:
o vertedor é uma parede alta, com perfil arredondado do lado de jusante para acompanhar o fluxo de água. Neste caso, o valor do coeficiente **(C)** é máximo **(C = 1.95)**.

Caso 2:
a soleira é uma parede de alvenaria com arestas agudas e parede espessa em relação à altura H_v. O coeficiente **(C)** é mais baixo **(C = 1.5)**.

Caso 3:
não tem vertedor. O sangradouro é apenas um corte no terreno natural **(C = 1.4)**.

As importantes variações do coeficiente (C) mostram o interesse de construir uma soleira de forma arredondada para jusante.

A princípio, procura-se construir o **sangradouro o mais largo possível**, desde que seu custo não seja muito alto (soleira natural sem vertedor, ou cordão de fixação de pouca altura). Uma vez definida a largura L, calcula-se a lâmina máxima H_v necessária para que a vazão admissível Q_a seja igual à vazão de projeto Q_x (calculada no item 3). Reescrevendo a fórmula acima, obtém-se:

$$H_v = (Q_x / C.L)^{0.67}$$

Em pequenas barragens, a altura da lâmina máxima admissível H_v deve variar entre 0.50 m (ou menos se for possível) e 1.00 m podendo, excepcionalmente, alcançar 1.50 m.

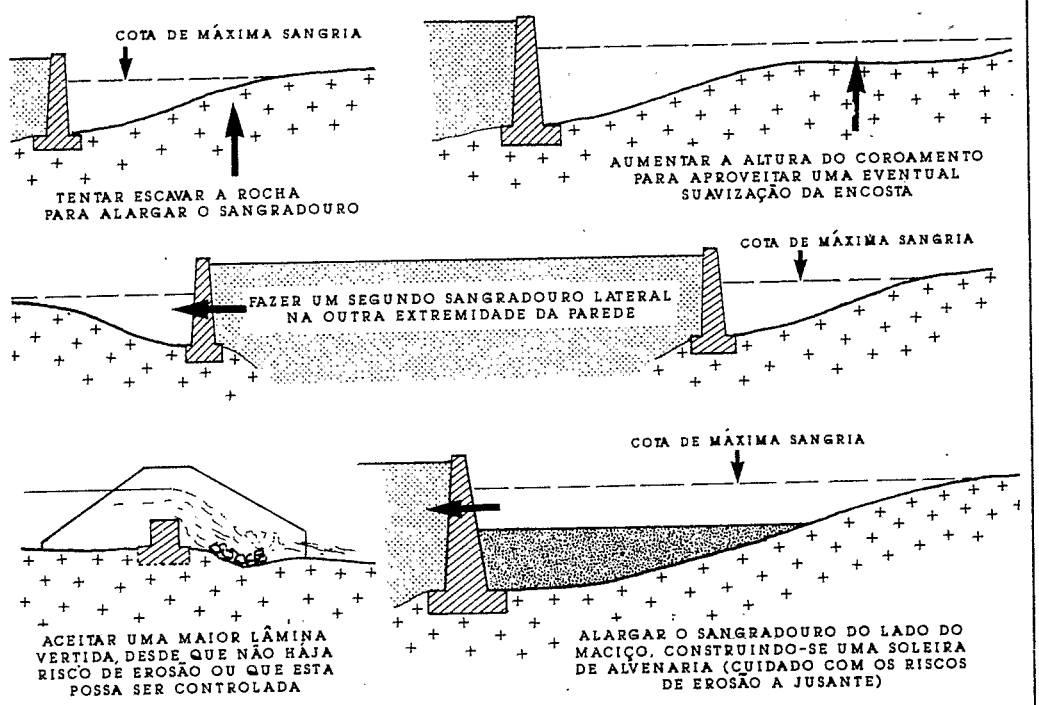
Se o valor de H_v assim calculado for superior a 1 m, será necessário adotar uma das soluções seguintes (figura 39):

Ver como quebrar lajedos. Pág. 99

- **alargar o sangradouro**, cavando a **encosta (usando-se até explosivos)**;
- **aumentar um pouco a altura da barragem** para realçar a cota do vertedor até um nível em que a topografia permita uma maior largura do sangradouro (se isto for o caso e não prejudicar o bom dimensionamento do açude);
- prever um **segundo sangradouro**, na outra extremidade da parede, por exemplo;

- **admitir um valor elevado de H_v**, desde que haja condições naturais favoráveis para dissipar a energia da queda da água (áreas com lajedos, blocos de pedra...);
- **alargar o sangradouro do lado da parede,** diminuindo o comprimento do aterro e aumentando o do vertedor de alvenaria. Neste caso, como no anterior, haverá maiores quedas d'água e riscos de erosão, devendo-se prever as devidas proteções.

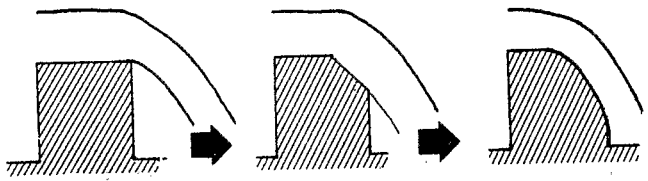
39 *Fazer o sangradouro o "mais" largo possível: diversas soluções*



40

Chanfrar a soleira

No caso do sangradouro apresentar uma soleira de alvenaria, aconselha-se chanfrar (com um caimento de 45°) a aresta de jusante da soleira numa largura de 10 a 15 cm. Tentar suavizar e arredondar os ângulos vivos de jusante. Estes acabamentos aumentam 10 a 25% o coeficiente C e a vazão e diminuem na mesma proporção a largura e o custo do sangradouro.



■ Perfil transversal da soleira

O perfil transversal da soleira deve ser o mais horizontal possível.
Não se deve, por exemplo, abrir um canal ou uma brecha no meio ou no lado da soleira, para evacuar a água. Isso rebaixa inutilmente o nível da água no açude sem aumentar a vazão máxima admissível.

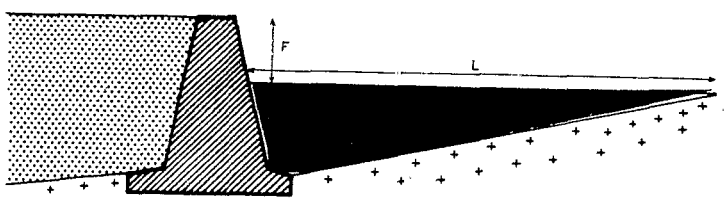
5.3 Dimensionamento de um sangradouro de forma não retangular

A escavação de um sangradouro de secção retangular nas ombreiras dos vales, muitas vezes é dificultada pelo fato de se encontrar a rocha a pouca profundidade: a secção da soleira (ou pelo menos uma parte dela) fica inclinada, seguindo o declive do terreno natural. Neste caso o vertedor pode ser considerado como um triângulo (caso n° 1) ou como a combinação de um trecho retangular com outro triangular (caso n° 2).
As fórmulas correspondentes a estes dois casos são as seguintes:

Caso nº 1: vertedor natural triangular

$$Q_a = 0.4 \cdot C \cdot L \cdot H_v^{2.5}$$

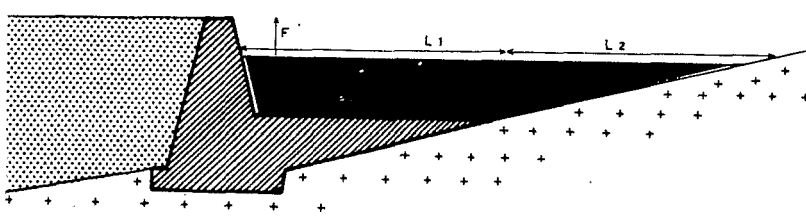
41



Caso nº 2: caso misto - soleira horizontal e trecho inclinado

$$Q_a = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot L_1 \cdot H_v^{1.5} + 0.4 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot H_v^{2.5}$$

42



As vazões de sangradouros de forma mais complexa poderão ser calculadas por meio de combinações destas duas fórmulas.

5.4 O canal extravasor

O canal extravasor deve permitir, no mínimo, o escoamento da vazão admissível no sangradouro.

Deve-se dar uma atenção especial à parte inicial do canal, logo a jusante da soleira, remover os obstáculos, pedras, piquetes, etc... suscetíveis de frear a água. Nunca se deve colocar uma cerca na soleira ou a jusante dela. Se for indispensável, colocar esta cerca bem a montante da soleira.

O canal extravasor nunca deve apresentar um estreitamento na sua parte inicial.

■ Declividade do canal extravasor

O canal extravasor deve ter, **a jusante da soleira**, uma declividade mínima, e, variando entre:

$$i(\%) = \frac{1.5}{(H_v)^{0.33}}$$ para um canal com fundo irregular

e $$i(\%) = \frac{0.15}{(H_v)^{0.33}}$$ para um canal com fundo de cimento alisado

DECLIVIDADE MÍNIMA DO CANAL EXTRAVASOR i (em %)

NATUREZA DO FUNDO	*ALTURA DA LÂMINA VERTENTE H_v (em m)*		
	0.50	*1.00*	*1.50*
Fundo irregular, pedras soltas	*2%*	*1.5%*	*1.3%*
Cimento alisado	*0.2%*	*0.15%*	*0.13%*

■ Proteção contra a erosão

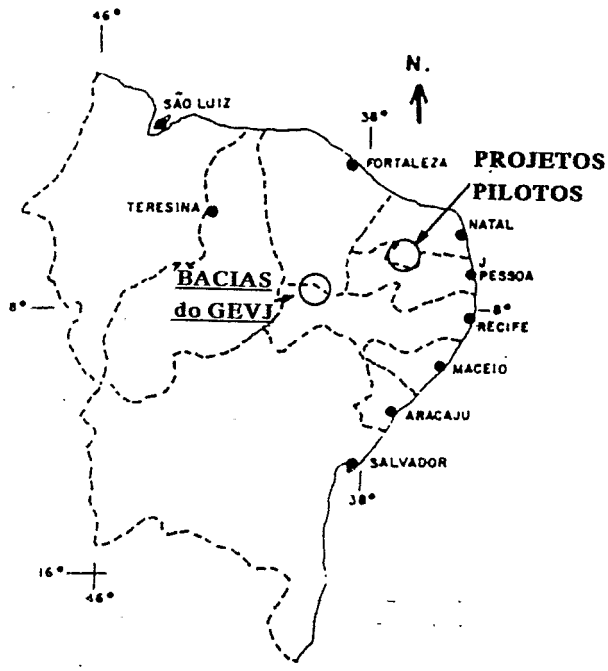
A jusante da soleira e no canal extravasor, a água terá um grande poder erosivo, proveniente da energia da queda d'água. Tentar amortecer essa energia através de pequenas quedas ou de blocos de pedra pesados. Se a queda for importante, será necessário prever uma fossa de dissipação de energia a jusante dela. Ver outros detalhes no capítulo A3 sobre a construção do açude.

É necessário lembrar que a água sempre tentará seguir a linha de declive máximo do terreno. Quando se quer, por exemplo, afastar o fluxo de sangria da parede do açude, deve-se construir uma parede de cimento ou de gabiões. Nunca se deve utilizar, para isso, uma parede de terra que seria levada pela correnteza após algumas cheias.

ANEXO 2

INFORMAÇÕES EXISTENTES A RESPEITO DAS OUTRAS BACIAS REPRESENTATIVAS

Resumimos, neste anexo, algumas informações que se referem a todas as "outras" pequenas bacias das quais utilizamos os dados hidrológicos, sem que pudéssemos apresentar um estudo completo como foi feito para as cinco bacias indicadas no capítulo 3[1]. Uma cartografia dos solos de todas essas "outras" bacias foi sistematicamente realizada.



Essas bacias podem ser reagrupadas em dois conjuntos:

- **As bacias representativas do GEVJ**. Trata-se de quatro bacias, BATATEIRAS, MISSÃO VELHA, AÇUDE JARDIM e QUIXABINHA que estão situadas ao sul do Estado do Ceará, sobre os contrafortes do planalto da CHAPADA DO ARARIPE. Foram observadas durante um período que variou de 1 a 3 anos, entre 1963 e 1965, pelo Grupo de Estudos do Vale do Jaguaribe (GEVJ) da SUDENE. Tinha-se por objetivo principal completar rapidamente a informação fornecida pela rede geral, para melhor abranger as diferenças de comportamento existentes entre as partes da grande bacia do Jaguaribe, situadas sobre embasamento cristalino, e aquelas situadas sobre um subsolo sedimentar. Extraímos dos relatórios hidrológicos elaborados nessa época (GEVJ, 1965), a informação apresentada a seguir. Os mapas de solos foram elaborados mais recentemente por J.C. LEPRUN (ASSUNÇÃO *et al*, 1984). A figura A2.1 permite situar essas bacias.

- Os açudes dos "projetos pilotos" do programa açude. Entre os onze projetos pilotos de irrigação, monitorados entre 1987 e 1991, apenas três puderam fornecer uma informação hidropluviométrica cuja qualidade foi suficiente para realizar a calibragem de modelos de simulação hidrológica. São eles os açudes MANOEL, JERICÓ e PEDRO COSTA, que estão situados na região de Catolé do Rocha no noroeste do Estado da Paraíba.

[1] Trata-se dos cinco conjuntos de bacias representativas : TAUÁ, SUMÉ, RIACHO DO NAVIO, JUATAMA e IBIPEBA.

CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS.

Características morfométricas e pluviométricas das bacias

A tabela A2.1 apresenta as características morfométricas e o total pluviométrico anual de todas essas bacias. Elas estão situadas na parte norte do Sertão, caracterizado por uma única estação de chuvas por ano, entre janeiro e maio. Embora se encontrem a meio-caminho, entre as bacias de TAUÁ e SUMÉ, elas se beneficiam de precipitações bem superiores, cuja média atinge ou ultrapassa 1.000 mm para as bacias de MISSÃO VELHA e de BATATEIRAS que, na realidade, não fazem mais parte da zona semi-árida.

TABELA A2.1 Características morfométricas e pluviométricas das bacias do GEVJ e dos projetos pilotos.

BACIA	SIGLA	SUPERFÍCIE km^2	VEGETAÇÃO	ACUDE m	COMP m	Ds mm	ALT	CHUVA
BATATEIRAS	RBP	203.2	2	0	1.20	412	584	1100
MISSAO VELHA	RMV	323.5	2	0	1.17	423	596	850
ACUDE JARDIM	AJA	49.0	2	0	1.40	300	700	775
QUIXABINHA	QUI	85.6	2	0	1.24	144	515	775
MANOEL	MAN	2.35	3	0	1.20	150	280	830
JERICO	JER	0.41	2	0	1.20	40	260	830
PEDRO COSTA	PCO	0.09	3	0	1.40	100	500	830

Legenda :

Vegetação : 2 : bem conservada,
3 : mais de 30 % da bacia estão cultivados,
Açude : 0 : não existe nenhum açude na bacia,
COMP : coeficiente de Gravelius.
Ds : Desnível específico (m)
ALT : Altitude média (m).

Características dos solos e da vegetação

Reunimos aqui as figuras e as tabelas apresentando os solos de todas essas "outras" bacias, assim como, os resultados das medições de permeabilidade.

Os levantamentos de solos foram realizados aplicando-se os roteiros utilizados para as cinco bacias apresentadas no capítulo 3.

Os das bacias representativas do GEVJ foram elaborados por J.C. LEPRUN (ASSUNÇÃO *et al*, 1984) e os dos "projetos pilotos" por F. BARRETO. A informação referente à vegetação é mais fragmentária e heterogênea.

Figura A2.1 : Mapa de situação geral de bacias representativas do GEVJ. (Região do CARIRI)

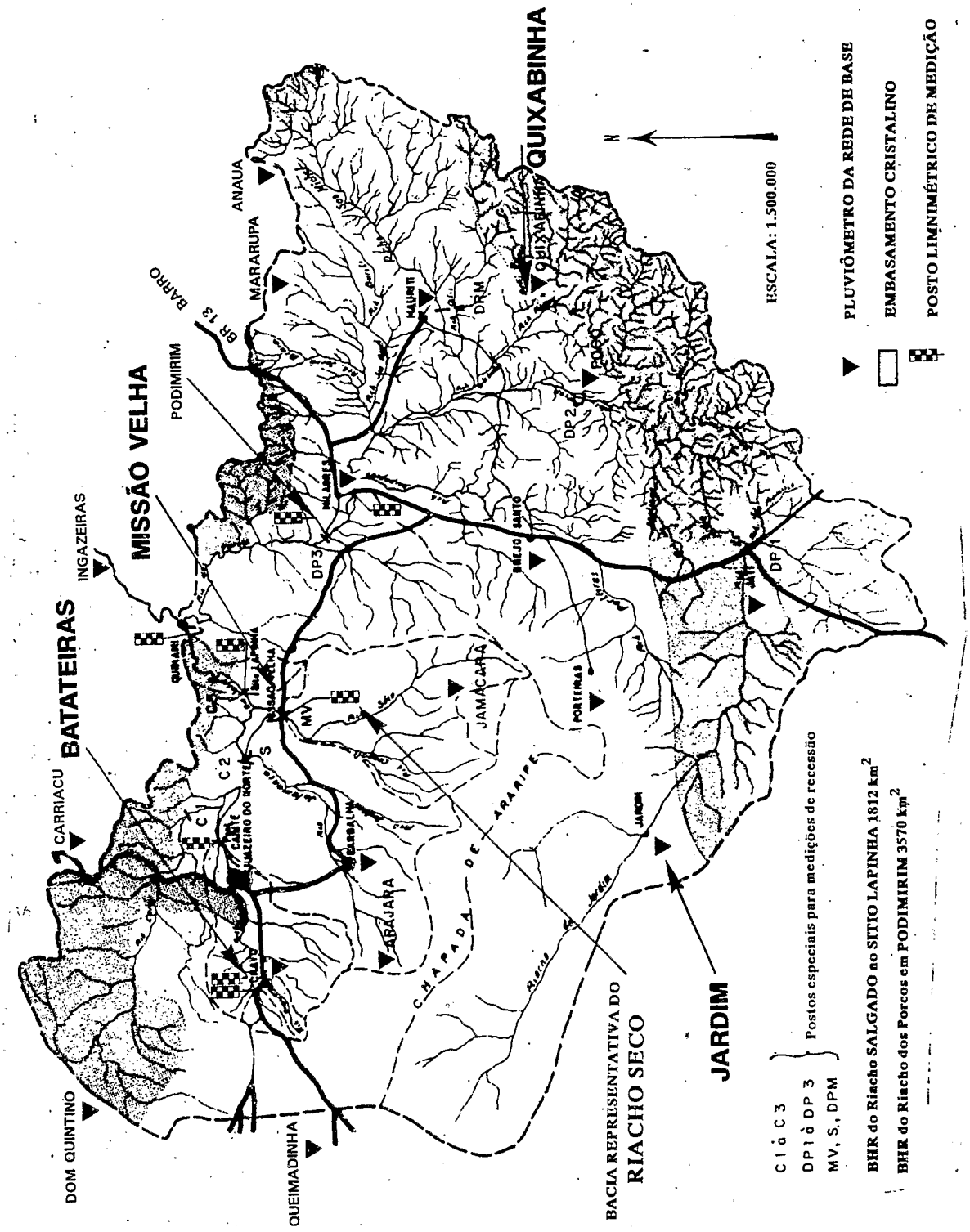


TABELA A.2.2 Bacia Representativa de BATATEIRAS

Principais formações geológicas e tipo de solos.

Formação Geológica	ARENITOS	PERMEÁVEIS		ALUVIAIS	
SOLOS GERADOS	Latoss. verm. amar. distrófico	Associação complexa de solos litólicos, Podzólicos verm. amar. Latoss. verm. amar., Vertissolos e maciço de rocha.	Associação de Podzólicos verm. amar. eutróficos e areias quartzosas distróficas	Associação de solos podzólicos verm. amar. equivalente eutrófico e latossolo verm. amar. sobre aluviões	Solos aluviais eutróficos
RELEVO	Nulo a fracamente ondulado	Forte	Moderado a forte	Moderado a forte	Nulo a fracamente ondulado
OCUPAÇÃO DO SOLO	Floresta: (reserva florestal do IBDF)	Cultivado árvores frutíferas	Cultivado árvores frutíferas e não cultivado	Não cultivado	Cultivado
PERMEABILIDADE (mm/h)	322 a 556	127	365 a 791	24	2
	Porcentagem por Bacia				
CRATO	38 %	33 %	14 %	5 %	10 %
BATATEIRAS*	12 %	13 %	18 %	23 %	30 %

* 4% correspondem à superfície das cidades de Crato e Juazeiro.
A formação geológica principal é composta por arenito, gerando cinco unidades de solo. Existem também aluviões provenientes dos solos situados a montante.

TABELA A.2.3 Bacia Representatativa de BATATEIRAS

Resultados dos testes de infiltração . Método de Muntz

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO DEPOIS DE 6 HORAS
BT 01	Latossolo vermelho amarelo distrófico	556,8
BT 02	Latossolo vermelho amarelo distrófico	322,6
BT 03	Podzólico vermelho amarelo	127,6
BT 04	Podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico	365,1
BT 05	Areias distróficas	791,5
BT 06	Solos aluviais eutróficos	1,9
BT 07	Associação de solos podzólicos vermelho amarelo equivalente eutrófico sobre aluviões	24,7

Figura A2.2 : Mapa dos solos da bacia de BATATEIRAS

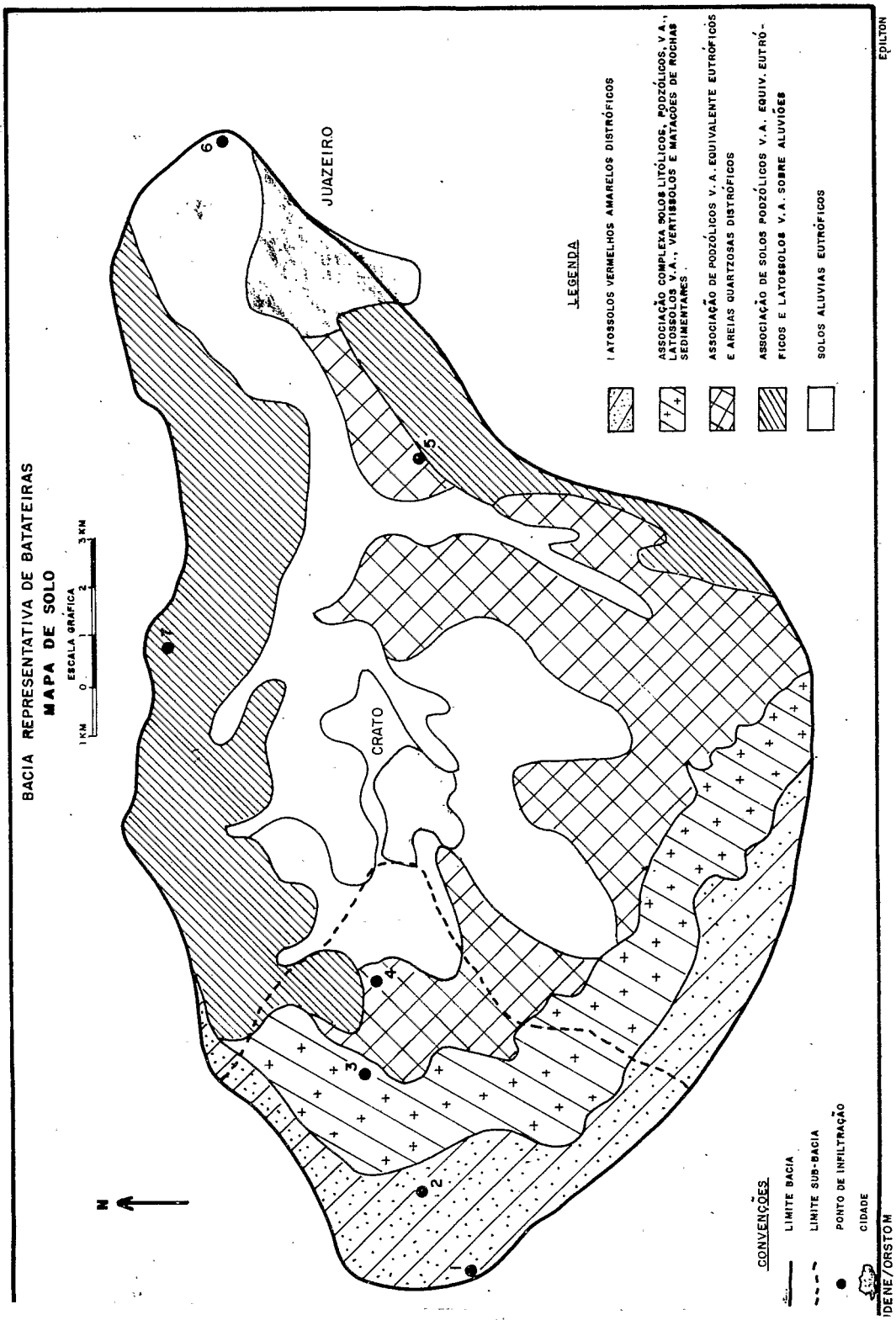


TABELA A.2.4 - Bacia Representativa de MISSÃO VELHA

Principais formações geológicas e tipo de solos

Formaçao Geológica	ARENITOS	PERMEÁVEIS		ALUVIAIS	
Solos gerados	Latossolos verm. amar. distró-ficos	Associação complexa de solos Litó-licos Podzólicos verm. amar. Latossolos verm. amar. Vertissolos e maciço de rochas	Associação de Solos Podzólicos verm. amar. equivalente eutrófico e areias quartzosas	Associação de Solos Podzólicos verm. amar. equivalente eutrófico e Latossolo vermelho amarelo	Solos a-luviais eutró-ficos
Relevo	Muito fraco	Forte	Moderado a forte	Moderado a forte	Nulo a fracamente ondulado
Ocupação do solo	caatinga (capoeira)	Solos cultivados		Solos cultivados	Solos cultivados
Permeabilidade (mm/h)	185	45 à 60		122	9
% do solo na bacia	22 %	17 %	12 %	39 %	10 %

A geologia é de origem sedimentar. O arenito permeável domina nesta Bacia, que está coberta de cinco unidades de solos muito semelhantes às da Bacia da Batateiras.

TABELA A2.5 Bacia Representativa de MISSAO VELHA

Resultados dos testes de infiltração. Método de Muntz

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MEDIO DEPOIS DE 6 HORAS
MV 01	Latossolo vermelho amarelo distrófico	184,9
MV 02	Podzólicos vermelho amarelo equivalente eutrófico	58,8
MV 03	Podzólicos vermelho amarelo	45,5
MV 04	Podzólicos vermelho amarelo equivalente eutrófico	122,3
MV 05	Solos aluviais eutróficos	9,1

Figura A2.3 : Mapa dos solos da bacia de MISSÃO VELHA

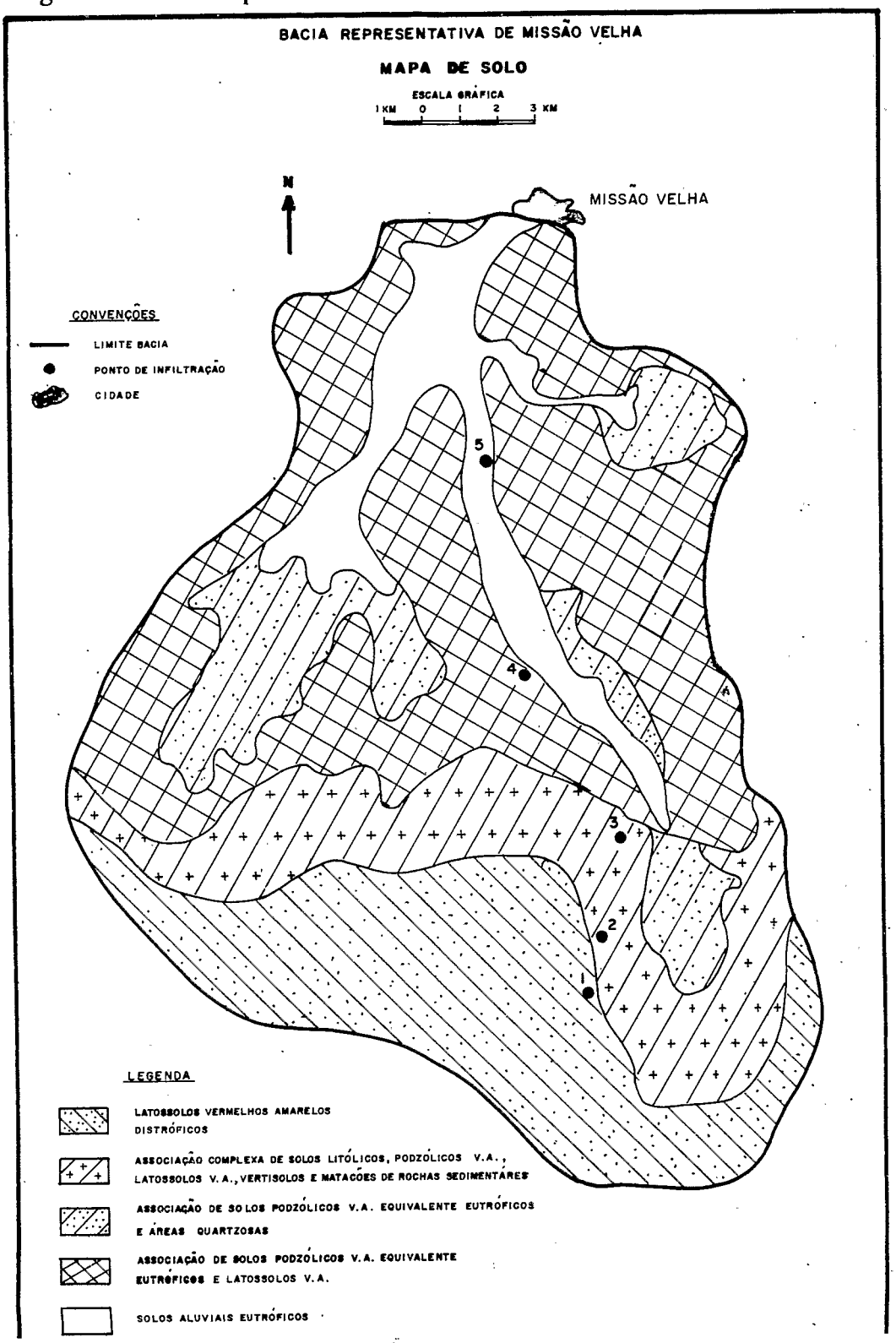


TABELA A2.6 Bacia Representativa de QUIXABINHA

Principais formações geológicas e tipo de solos.

Formação Geológica	X I S T O S	ARENITOS
Solos gerados	Solos Litólicos eutróficos associados a solos Brunos nao Cálcicos sobre xistos	Solos Litólicos distróficos associados a afloramentos de arenitos
Relevo	Moderado a forte	Forte
Ocupação do solo	Pouco cultivado	Pouco cultivado
Permeabilidade (mm/h)	6 a 87	23 a 300
% do solo na bacia	43 %	57 %

Esta bacia está constituída de duas formações geológicas principais: os xistos, que geram solos Litólicos Eutróficos e os arenitos que geram solos Litólicos Distróficos.

TABELA A2.7 Bacia Representativa de QUIXABINHA

Resultados dos testes de infiltração. Método de Muntz

TESTE	TIPO DE SOLO	VALOR MEDIO DEPOIS 6 HORAS
QX 01	Solo Litólico eutrófico associado a solo Bruno não Cálcico sobre xisto. Solo nu	33,0
QX 02	Solo Litólico sobre arenito	197,0
QX 03	Solo Litólico eutrófico associado a solo Bruno não Cálcico sobre xisto	7,0
QX 04	Solo Litólico de transição associado a solo Bruno não Cálcico	59,0
QX 05	Solo Litólico distrófico associado a afloramentos de arenito	34,0

Figura A2.4 : Mapa dos solos da bacia de QUIXABINHA

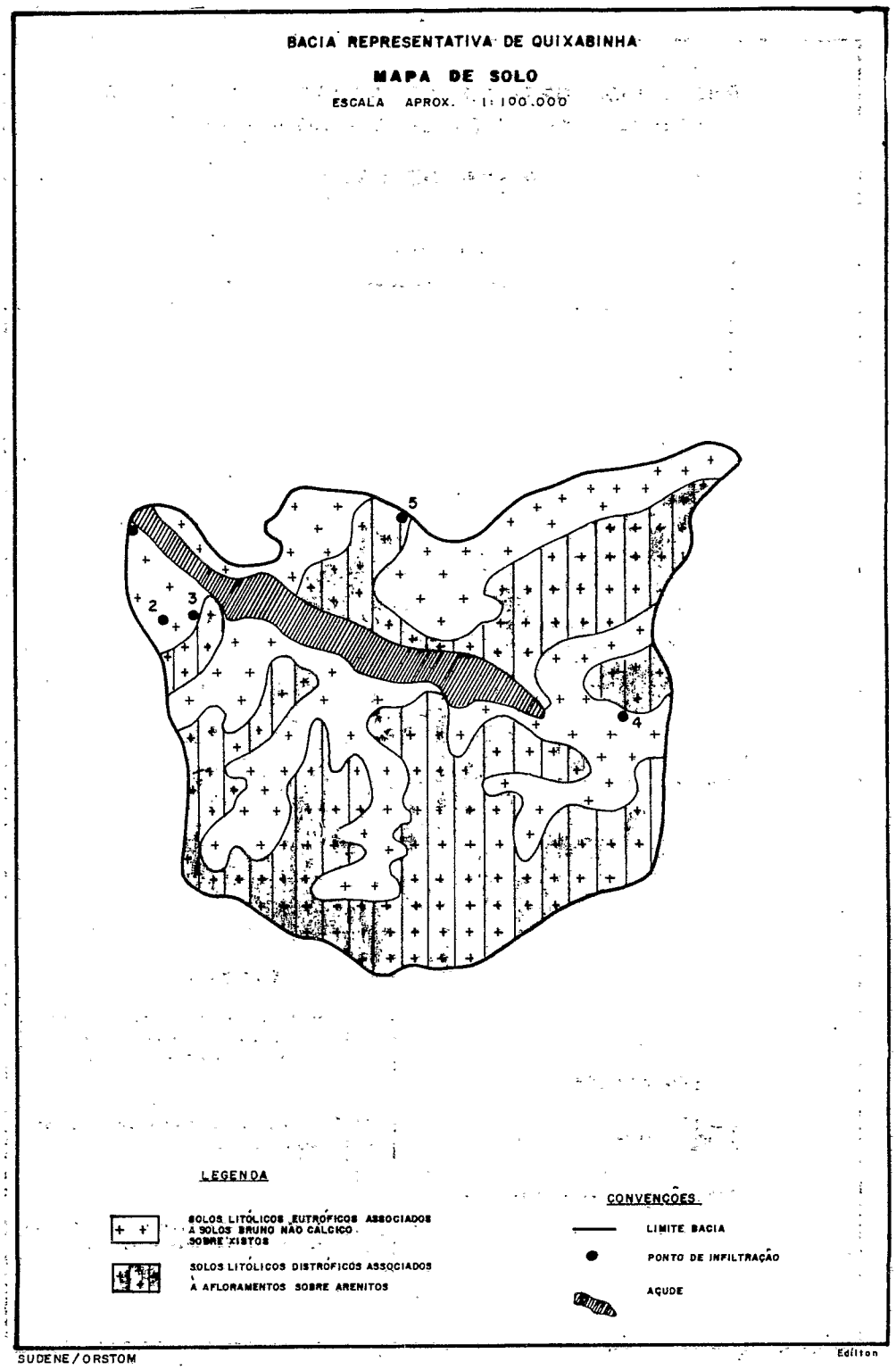


Figura A2.5 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Pedro Costa

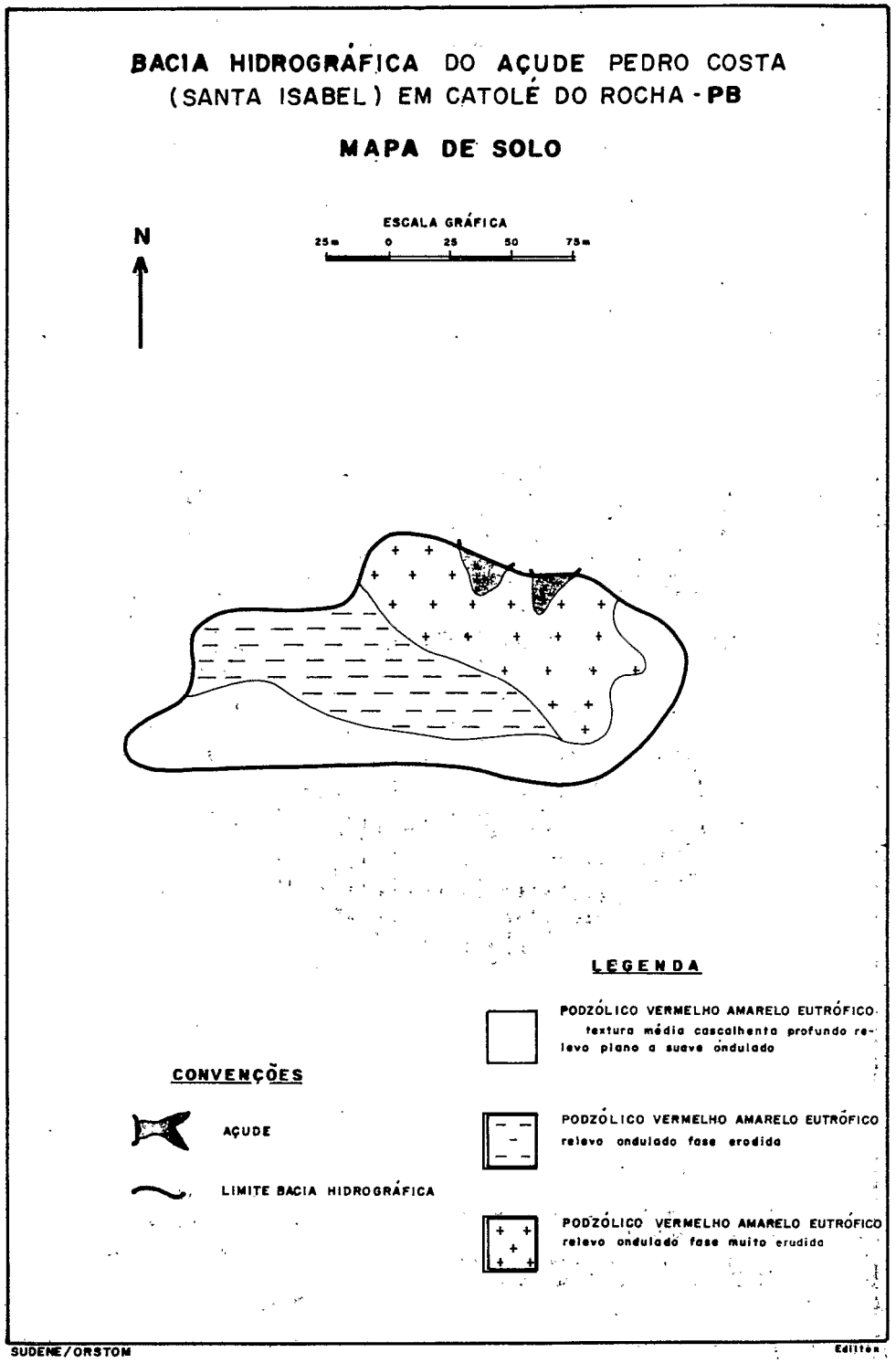


Figura A2.6 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Jericó

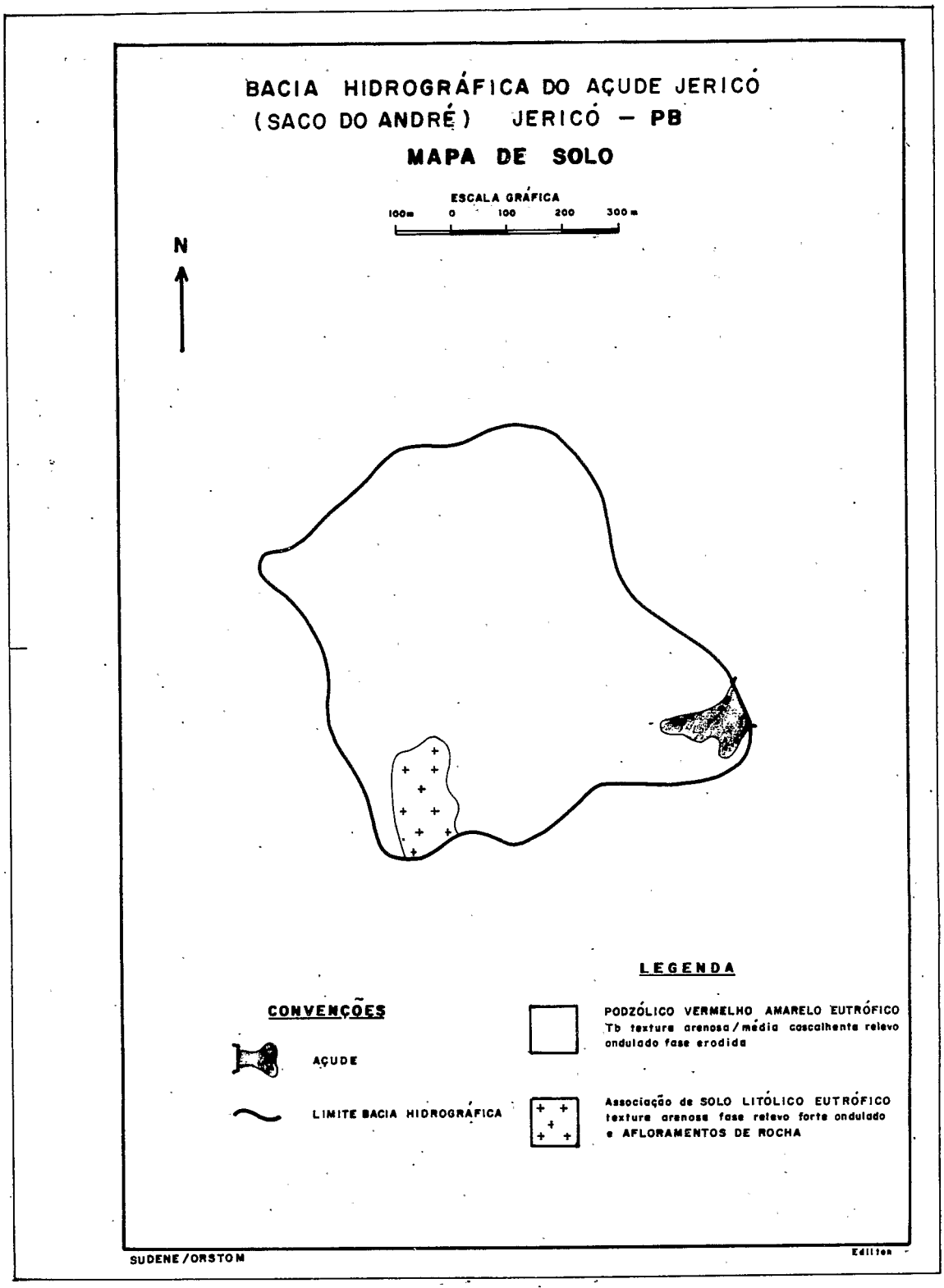
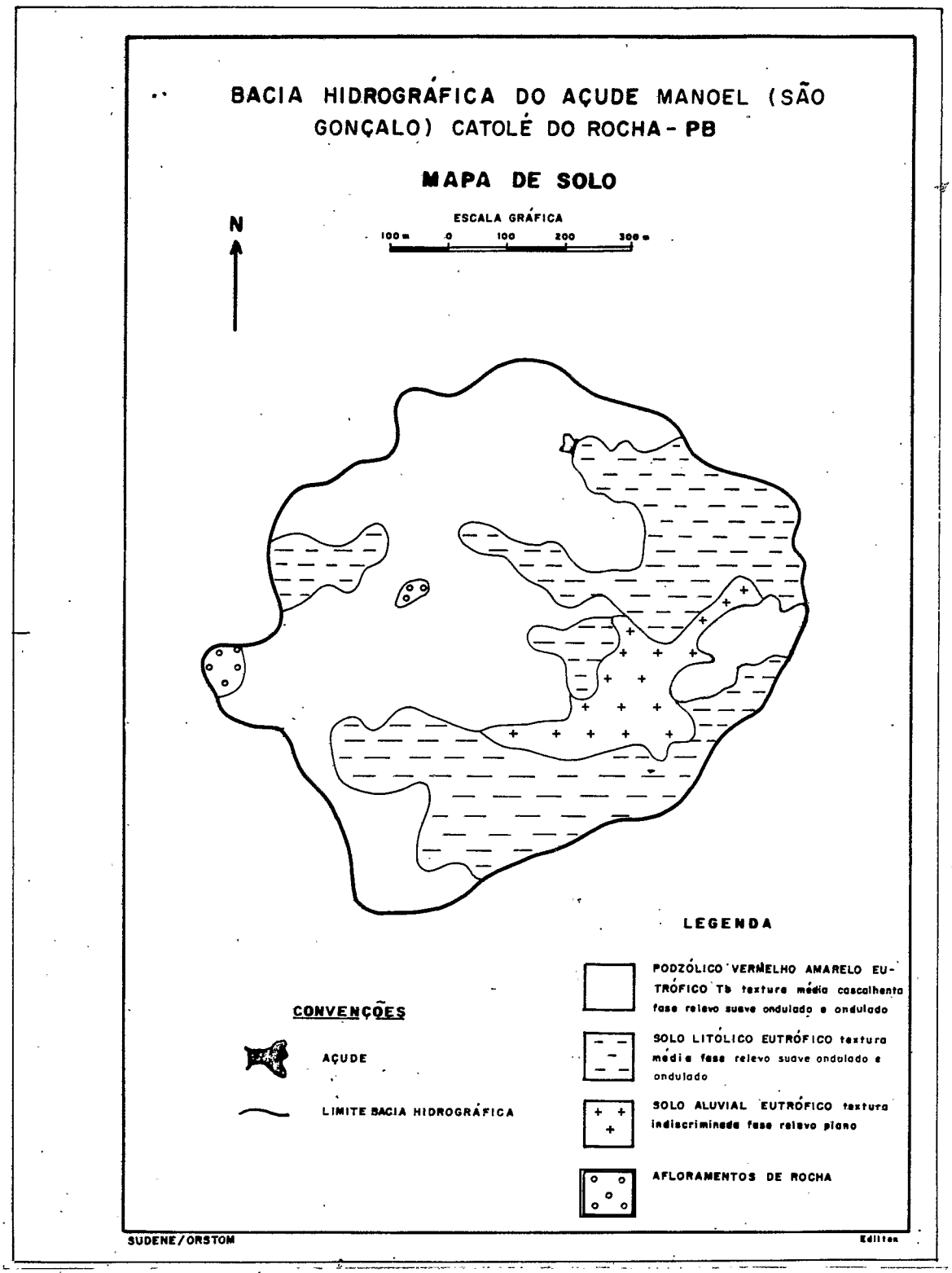


Figura A2.7 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Manoel



RESULTADOS OBTIDOS

Série das lâminas observadas

As tabelas a seguir apresentam as lâminas precipitadas e escoadas, em mm, nas diversas bacias

TABELA A2.8 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: BATATEIRAS em PONTE CARITE

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1962													
CHUVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(5)	(210)	(75)	(290)
ESCOAM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0,2)	(13,0)	(7,0)	(20,2)
1963													
CHUVA	110	395	330	131	15	9	0	0	0	(15)	110	175	1280,0
ESCOAM	(8,6)	62,5	70,0	26,2	4,7	2,9	1,9	0,4	0,3	0,2	1,8	11,3	190,8
1964													
CHUVA	254	210	280	330	57	(40)	(4)	(20)	(0)	15	30	25	1265,0
ESCOAM	27,6	26,7	50,5	64,1	14,2	8,1	5,3	2,3	(0,7)	0	0	0,45	199,95
1965													
CHUVA	180	140	250	350	45	35	2	25	3	-	-	-	1030,0
ESCOAM	5,28	10,19	25,32	45,00	9,70	4,13	2,69	1,36	0	-	-	-	103,67

▪ Os quantitativos que se encontram entre parêntesis foram estimados ou reconstituídas.

TABELA A.2.9 - Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de : MISSÃO VELHA

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agos	Set	Out	Nov	Dez	Total
1962													
CHUVA	-	-	-	110	20	-	-	-	-	20	110	170	430
ESCOAM	-	-	-	2,0	0,8	-	-	-	-	-	-		2,8
1964													
CHUVA	245	220	240	300	50	45	15	10	-	-	-	-	1125
ESCOAM	1,1	3,7	8,1	16,5	1,5	0,4	-	-	-	-	-	-	31,3

TABELA A2.10 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: AÇUDE JARDIM

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agos	Set	Out	Nov	Dez	Total
1962													
CHUVA	176	98	162	276	11	103	(12)	-	-	-	-	-	838,0
ESCOAM	8,2	9,9	8,4	45,8	7,1	7,3	1,4	-	-	-	-		88,1

TABELA A2.11 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: QUIXABINHA

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agos	Set	Out	Nov	Dez	Total
1962													
CHUVA	130	63	189	200	25	33	(3)	-	-	-	-	-	643,0
ESCOAM	0,6	0,5	3,5	16,4	0,8	0	0	-	-	-	-		21,8

TABELA A2.12 Lâminas precipitadas e escoadas nas bacias dos projetos pilotos

Anos	Açude Pedro Costa		Açude Jericó		Açude Manoel	
	Chuva	Escoam.	Chuva	Escoam.	Chuva	Escoam.
1987	538,4	20,4	657,2	254,6	587,3	16,5
1988	799,6	38,4	551,9	158,4	871,5	70,0
1989	1287,4	62,0	1162,2	415,5	1312,6	78,9
1990	(510)	11,8	-	11,1	-	-

Características das cheias

Reunimos as características de cheias das bacias equipadas com limnígrafos, o que exclui os açudes dos projetos pilotos e o açude JARDIM. Indicamos uma parte das características dos hidrogramas da bacia do rio BATATEIRAS, em Crato, do BATATEIRAS, em PONTE CARITE.

TABELA A2.13 Características das cheias das bacias do GEVJ

Bacia	Superfície Km²	Hidrograma unitário Tempo de Subida	Tempo de base	Desc. máxi para Ls = 1 mm	X_{10} (mm)	Kx med	Q_{10} (m³/s)
Batat. Pont Carite	198	3h30'	40 h	3,33	13,0	2,68	35
Missão Velha	266	4h30'	15 h	14,3	4,0	11,5	57
Quixabinha	83	1 h	5 h	10,9	20,0	7,10	142
Granjeiro	18	1 h	2h45'	5,5	-	5,0	-
Batateiras Crato	29,5	0h30'	1h40'	12,0	-	6,75	-

■ Kx mede a média das descargas máximas correspondentes a uma lâmina de 1 mm dos hidrogramas das dez cheias mais fortes, ele permite o cálculo da descarga decenal pela fórmula : $Q_{10} = Kx_{med} * X_{10}$

Lâminas escoadas características

A tabela A2.14 fornece as lâminas escoadas características calculadas de conformidade com as indicações do parágrafo 3.1.4. Constatamos, nessa tabela, que os valores de L(P) e das lâminas de diversas frequências são geralmente bem superiores a L_{600}. Deve-se isso às precipitações elevadas que são encontradas nessas bacias.

TABELA A2.14 Lâminas escoadas características (mm) das bacias do GEVJ e dos projetos pilotos

		ESCOAMENTOS (mm)									
BACIA	L_{600}	L(P)	DECEN. ÚMIDO F=0,1	TRIEN. ÚMIDO F=0,33	MEDIANA F=0,5	TRIEN. SECO F=0,67	DECEN. SECO F=0,9	$L_{(3AC)}$	CHEIA DECEN. X_{10}	COEF. ESCOAMENTO (%)	CHUVA ANUAL MÉDIA
BATATEIRAS	39	200	435	250	160	90	25	200	13	18.0	1100
MISSÃO VELHA	14	42	81	51	36	24	9	51	4	4.4	950
AÇUDE JARDIM	75	130	284	166	112	70	21	138	23	17.0	775
QUIXABINHA	41	72	166	88	53	26	4	49	20	9.0	775
MANOEL	30	64	160	81	53	26	4	62	18	8.0	830
JERICÓ	153	260	578	349	236	148	49	333	58	31.0	830
PEDRO COSTA	31	66	124	79	60	38	19	79	16	8.0	830

ANEXO 3

FUNCIONAMENTO DO MODELO SUDENE/ORSTOM COM SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS DA ÁFRICA

Utilização do modelo SUDENE/ORSTOM que foi ajustado na estação de Caldeirão com 17 pluviômetros do Sahel Africano.

Utilizamos o modelo SUDENE/ORSTOM com 17 pluviômetros situados na África Ocidental, entre a isoieta 400 e 1000 mm.

O ajustamento de Log(P) = f(P) conduz a valores de L_{600} para os pluviômetros da África muito próximos daqueles da zona do Sertão (77,5 mm para a África, ao invés de 82,5 para o Sertão)

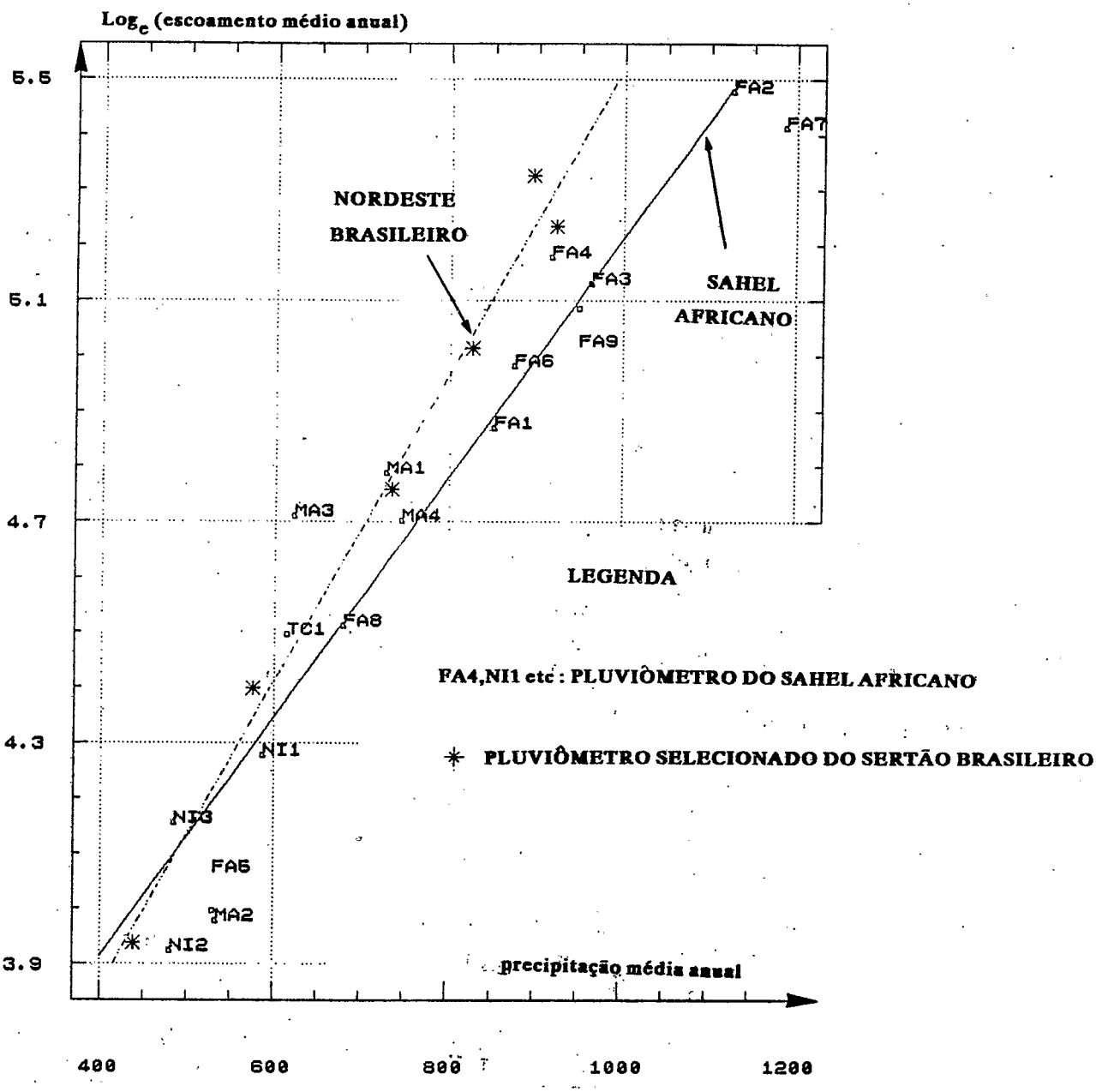
Os coeficientes A ajustados sobre os resultados africanos são um pouco inferiores àqueles da zona Sertão (A = 0,0022 em lugar de 0,0028, que foi o coeficiente específico da bacia de Caldeirão).

É interessante constatar que as diferenças entre os pluviômetros africanos e os do Sertão, se bem que situados a milhares de quilômetros de distância, são bem inferiores àquelas que se constata entre a Grande zona climática Sertão e a Grande zona climática de Transição.

Tabela A3.1 Resultados da utilização do modelo SUDENE/ORSTOM com 17 pluviômetros da rede sinóptica da África semi-árida.

SIGLA	CHUVA	ESCOAM.	LA01	LA033	LA05	LA067	LA09	L3AC	X1	X_{10}
FA1	852.43	130.27	243.68	141.70	120.34	87.91	43.52	144.67	29.51	18.85
FA2	1125.64	239.23	411.33	301.12	221.98	177.71	83.43	390.79	49.70	27.47
FA3	963.70	168.96	267.91	186.40	147.46	119.84	59.97	212.18	50.45	21.63
FA4	917.78	177.46	269.01	201.56	175.42	149.94	72.94	186.89	44.73	21.95
FA5	529.51	54.41	102.63	60.21	48.09	32.69	18.33	73.02	21.15	10.96
FA6	875.29	145.81	264.54	153.02	133.37	99.55	66.96	219.86	38.91	19.36
FA7	1187.19	224.68	405.56	225.44	159.07	136.80	76.20	276.67	54.82	27.84
FA8	678.96	91.22	173.25	93.77	73.67	57.67	29.64	103.25	36.08	15.76
FA9	949.35	161.93	275.10	179.79	148.26	129.50	70.37	182.17	39.06	20.39
MA1	727.95	120.11	224.10	141.78	98.35	75.58	38.17	151.22	38.51	18.86
MA2	532.69	53.38	112.71	68.55	32.73	22.28	12.15	32.44	23.50	11.43
MA3	621.40	111.15	234.77	112.63	68.49	40.44	11.22	44.68	58.77	22.68
MA4	745.65	110.21	197.21	125.97	107.31	80.55	40.55	135.40	32.30	15.94
NI1	586.44	72.07	152.32	72.80	56.23	47.66	24.04	88.31	28.76	12.86
NI2	480.16	50.67	112.73	53.77	40.97	26.72	12.17	35.65	23.74	11.77
NI3	484.22	63.75	144.33	66.77	48.07	31.74	13.29	60.43	30.87	14.10
TC1	613.97	89.65	194.99	100.30	67.84	42.73	21.00	94.78	33.72	16.38

Figure A3.1 Comparação das respostas do modelo SUDENE/ORSTOM utilizado com os pluviômetros africanos e brasileiros



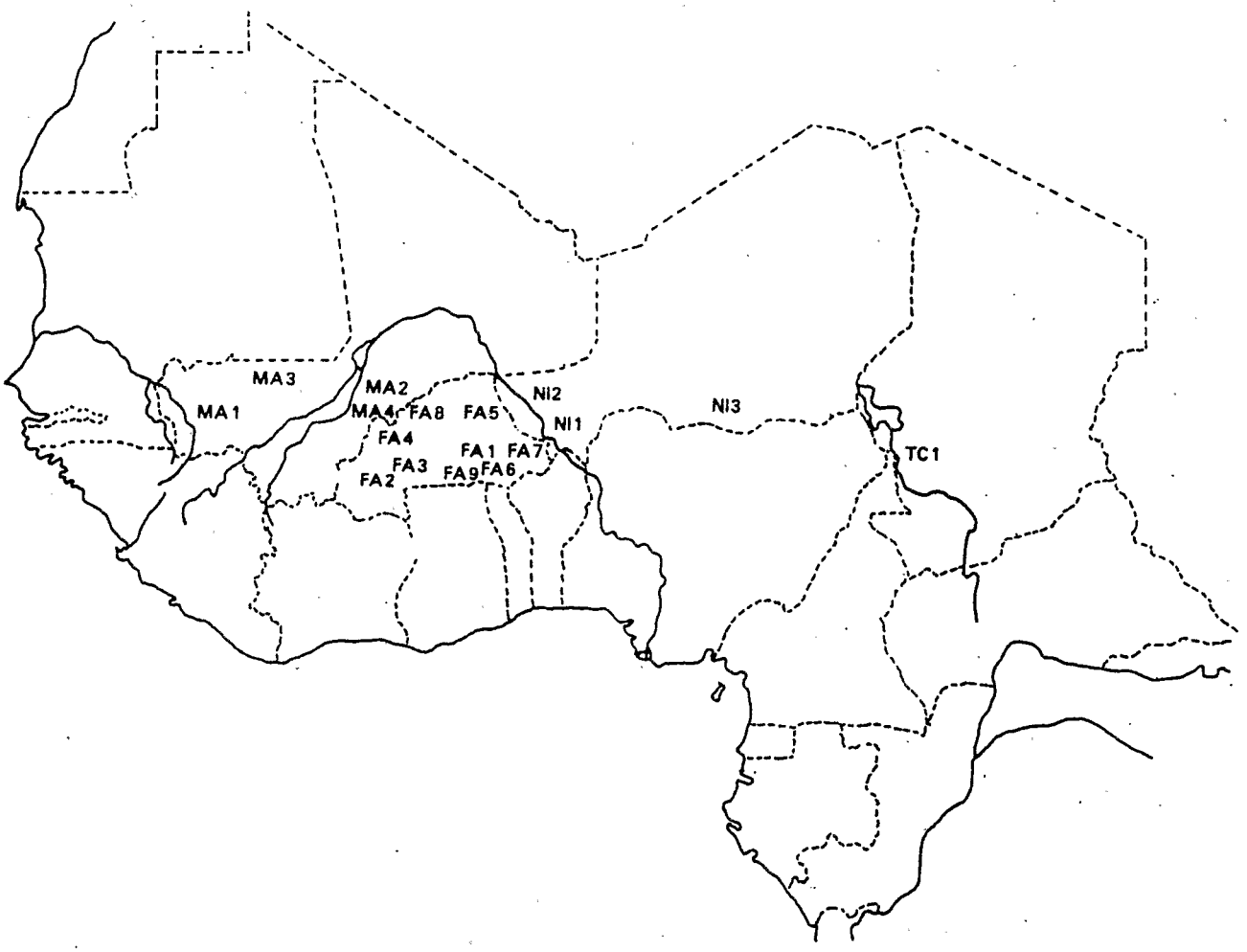


Figura A3.2 Mapa de situação dos pluviômetros africanos utilizados

Tabela A3.2 Relação dos pluviômetros africanos utilizados

SIGLA	Nome do pluviômetro
FA1	OUAGADOUGOU AERO
FA2	BOBODIOLASSO
FA3	BOROMO
FA4	DEDOUGOU
FA5	DORI
FA6	FADA NGOURMA
FA7	GAUA
FA8	OUAHIGOUYA
FA9	PO
MA1	KAYES
MA2	MOPTI
MA3	NIORO DU SAHEL
MA4	SAN
NI1	NIAMEY AERO
NI2	TILLABELY
NI3	ZINDER
TC1	N'DJAMENA AERO

ANEXO 4

GLOSSÁRIO

Abreviações e siglas utilizadas:

ACP	Análise em Componentes Principais
ASMIC	Association pour l'Organisation des Missions de Coopération technique (França)
ATP	Action Thématique Programmée (França)
BUREC	Bureau of Reclamation (U.S.A.)
BHR	Bacia Hidrográfica Representativa
BVE	Bassin Versant Expérimental
BVR	Bassin Versant Représentatif
CIRAD	Centre Internationnal de Recherche en Agronomie pour le Développement (França)
CISAGRO	Companhia Integrada de Serviços Agropecuários (do estado de Pernambuco)
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CNRS	Centre Nationnal de Recherche Scientifique (França)
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNOCS	Departamento Nacional de Obras contra as Secas
DPG	Diretoria de Planejamento Global (da SUDENE)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIT	Frente Intertropical
GEVJ	Grupo de Estudo do Vale do Jaguaribe
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBDF	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOCS	Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (tornou-se mais tarde DNOCS)
IOCS	Inspetoria de Obras Contra as Secas (tornou-se mais tarde DNOCS)
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (França)
PAPP	Programa de Apoio ao Pequeno Produtor rural (da SUDENE)
PIREN	Programme Intégré de Recherche pour l'Environnement (França)
PLIRHINE	Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste
PRN	Programa de Recursos Naturais (da SUDENE)
PROHIDRO	Programa de Recursos Hídricos do Nordeste da SUDENE
PRONI	Programa Nacional de Irrigação
PROVÁRZEA	Programa Nacional de Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis
SCET-COOP	Société Centrale pour l'Equipement du Territoire (França)
SCS	Soil Conservation Service (U.S.A.)
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TAPI	Technologie Appliquée à la Petite Irrigation (Grupo de Cooperação Técnica Francesa na SUDENE)
UFCE	Universidade Federal do Ceará
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
ZIC ou ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

BIBLIOGRAFIA

AGUIAR, F.G. de (1939) Boletim da Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS) v. 1-2, n.1, jul./set. 1939, pp. 03-15. Rio de Janeiro.

AGUIAR, F.G. de (1940) Estudo Hidrométrico do Nordeste Brasileiro. Boletim da Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS) Rio de Janeiro, jan/mar, 1940. v. 13, n. 1

ALBERGEL, A. (1987) Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso. Du m^2 au km^2, étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 341 p.

ALVES, J.A.S. (1988) Análise comparativa de modelos empíricos de previsão de cheias aplicados a bacias nordestinas. UFC. Centro de Tecnologia. Departamento de Hidráulica. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Dissertação (parcial) de Mestrado. Boletim Técnico de Recursos Hídricos. Fortaleza, 1988. n.6, 103 p.

ASSUNÇÃO, M.S. de (1982) Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1979/80. Recife, SUDENE-DRN, 59 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 13) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

ASSUNÇÃO, M.S. de (1984) Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1980/81. Recife, SUDENE-DRN, 71 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 17). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

ASSUNÇÃO, M.S. de, LEPRUN, J.C., CADIER, E. (1984) Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido : Açu, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). Recife, SUDENE-DRN-HME, 52p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 22). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

AUDRY, P., CADIER, E., LEPRUN, J.C., MOLINIER, M. (1987) ATP-PIREN. Projet : Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale. Rapport d'avancement des travaux. Recife. ATP-PIREN. ORSTOM, 78 p.

BARRETO, F.H., LEPRUN, J.C., CADIER, E., CALVALCANTE, N. Ma. da C., HERBAUD, J. J. M. (1989) Classificação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas no Nordeste semi-árido. *In*: Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Foz do Iguaçu, V.1, p. 666-676. Paraná, Brasil.

BERTON, S. (1988) La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits microbarrages en Afrique de l'Ouest. Paris, 474 p. il. Dossier n°2. GRET (Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques).

BLANEY; CRIDDLE (1952). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Departement of Agriculture, Soil Conservation Service.

BORGES, M.C. de A. (1977) Estudo hidro-agronômico de 47 açudes no Nordeste Brasileiro. Recursos Naturais, Meio ambiente e poluição. Rio de Janeiro, SUPREN, IBGE, v.1. p. 123-40.

BRUNET-MORET, Y. (1965) Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rapport de synthèse ORSTOM 1965. Publ. CIEH.

BRUNET-MORET, Y. (1969) Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.,vol. 6,n°, 90 p.

BULTOT, F., DUPRIEZ, G.L., BODEUX, A. (1976) Interception potentielle journalière de la pluie par divers peuplements forestiers. J. Hydrol. n°1, pp. 381-392.

BUREC (1987) Design of Small Dams. 856 p. Third edition. 2 maps cloth Bound.

CADIER, E. (1984) Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 75 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

CADIER, E., ALBUQUERQUE, C.H.C de, ARAÚJO FILHO, P.F., NASCIMENTO, P.H. de A., MONTGAILLARD, M. (1989) Dimensionamento de pequenos reservatórios superficiais do Nordeste semi-árido. *In* : VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABID, Foz do Iguaçu, Anais do..., v.1, pp. 202-225.

CADIER, E., COCHONNEAU, G., GUSMÃO, A.C.S. (1981) Estudo estatístico das precipitações diárias no Estado de Pernambuco. *In* : Anais do IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, ABRH. v.1. pp. 414-22.

CADIER, E.; DUBREUIL, P. (1986). Influence de la taille et du nombre de retenues sur le régime hydrologique de petits bassins du Nordeste du Brésil. XIX^{e} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris.

CADIER, E; DUBREUIL, P.; MOLLE, F. (1987). Influence de différents types d'aménagements hydrauliques emboîtés sur les régimes hydrologiques et les potentialités d'irrigation. Colloque UNESCO. Paris, 1987.

CADIER, E., FREITAS, R.J. (1983) Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanhas 73/80. Recife, SUDENE-DRN, 180 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

CADIER, E., FREITAS, R.J. LEPRUN, J.C. (1983a) Bacia Experimental de Sumé-PB ; instalação e primeiros resultados. *In* : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Blumenau, ABRH, v. 1. pp. 69-90.

CADIER, E., FREITAS, R.J. LEPRUN, J.C. (1983b) Bacia Experimental de Sumé-PB ; instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE-DRN, 87 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 16).

CADIER, E., MOLLE, F., ALBUQUERQUE, C.H.C. de, DOHERTY, F.R., MONTGAILLARD, M. (1990) Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste Brésilien semi-aride. Journées hydrologiques de Montpellier, 30 p.

CADIER, E., POURRUT, P. (1979) Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Equateur. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. v.16, n°3/4, pp. 171-211.

CADIER, E., VIEIRA, H.J.P. (1985) Método de Avaliação dos Escoamentos nas Pequenas Bacias do Semi-árido. *In*: Anais VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos. Tomo I. pp. 217-230, São Paulo.

CALVALCANTE, N.M. da. C., CADIER, E., DOHERTY, F.R. (1990) Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 135 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 28). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

CAMPELLO, S. (1979) Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Brésil). Paris, ORSTOM, 121 p. il. Tese de doutorado apresentada na Universidade Pierre et Marie Curie, Paris VI.

CAMPELLO, S., SANGUINETTI, P., VIEIRA, H.J.P., CADIER, E. (1983) Planificação, instalação e operação de uma rede de bacias representativas em fase de rotina : experiência da SUDENE. *In* : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau. ABRH, v.1. pp. 25-38.

CAMUS, H., CHAPERON, P., GIRARD G., MOLINIER, M. (1976). Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972. Travaux et Documents de l'ORSTOM n.52., 81p. + fig. + annexes.

CARVALHO, M. PACHECO (1960) O Polígono das Secas. In. Boletim do DNOCS n°8, v.21, maio 1960.

CASENAVE A., GUIGUEN, N., SIMON, J.M. (1982) Etudes des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. Cah.ORSTOM, sér.Hydrol. 19, n°4, pp. 229-252.

CASENAVE, A., VALENTIN C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.

CAVIEDES, C N. (1973) "Secas and El Niño : Two simultaneous climatical hazards in South America". Proc Assoc Amer Geograph, 5.pp. 44-49.

CHARNEY, J.G. (1975) Dynamics of desert and drought in the Sahel. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101, 193-202.

CHEVALLIER, P. (1983) L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. Cah.ORSTOM, sér. Hydrol., v.20, n°3/4, pp. 179-190.

CHEVALLIER, P. (1988) Complexité hydrologique du petit-bassin versant : exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 306 p. + annexes.

CHEVALLIER, P., LAPETITE, J.M. (1986) Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Hydrol. Continent., v.1 n°2, pp. 111-119.

CHU, P.S. (1983) Diagnostic studies of rainfall anomalies in Northeast Brazil. Mon. Weath. Rev., 111, 8-1655-1664.

CIEH - Departement Hydrologie (1985) Etude des pluies journalières de fréquences rare dans les Etats membres du CIEH. Rapport de synthèse. CIEH, Ouagadougou, 22 p. + graph.

COLLINET, J. (1984). Hydrodynamique superficielle et érosion comparée de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire) in: *Challenges in African Hydrology and Water Resources, IASH Publ.* n° 144, pp. 499-516.

COLLINET, J., VALENTIN, C. (1979) Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.18, n°4, pp. 283-328.

CORREIA, F.N., MOREL-SEYTOUX, H.J. (1985) OMEGA : another physically-based rainfall model ? Hydrology days and 14th Annual Rocky Moutain Groundwater Conference (April 16-20, 1985). Fort Collins, Colorado. pp. 157-168.

CUNHA (da), E. (1902) "Os sertões". Lib. Ediouro, Rio de Janeiro, Brasil. 363 p.

DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Agricultural Research Service. Soil and water conservation Research Division (1986) . Field manual for research in agricultural hydrology. Washington D.C., 214 p. (Agriculture Handbook, 224).

DHI *(Décennie Hydrologique Internationale)* (1974). Résumés des résultats de recherches obtenus par la France sur bassins représentatifs. Cahiers ORSTOM. Sér.Hydrol.vol.11, n°2, 1974.

DNAEE (Departamento Nacional de aguas e Energia Elétrica) (1984) Mapa de disponibilidade hídrica do Brasil. Recife.

DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) (1981) Plano Diretor do Vale do Pajeú. Recife.

DOHERTY, F.R., CADIER, E., FRASSINETTE, P.F.A. (1992) Modelização Hidrológica das pequenas bacias do Nordeste brasileiro. SUDENE/ORSTOM. 200 p.

DUBREUIL, P. (1965a) Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. n½2.

DUBREUIL, P. (1965b) Etude des précipitations appliquée à la mise en valeur hydro-agricole. Groupe d'étude du Val du Jaguaribe. Paris, ORSTOM.

DUBREUIL, P. (1966) Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans les petits réservoirs d'une région. *In* : Symposium de Garda A.I.H.S. Hydrologie des lacs et des réservoirs, 70. Garda, AIHS, v. 2. pp. 551-59.

DUBREUIL, P. (1967) Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v.4, n°1, pp. 3-24.

DUBREUIL, P. (1970) Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. *In* : Symposium sur les Résultats de Recherches sur Bassins Représentatifs et Expérimentaux. Wellington. AISH-Publication, 96.

DUBREUIL, P (1982) Application of results from representative and experimental basins. Paris, UNESCO 477 p.

DUBREUIL, P. (1986) Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. J. Hydrol., 87, pp. 201-22.

DUBREUIL, P., CAMPELLO, S. (1966) Normes climatiques et hydrologiques pour projets d'aménagements hydrauliques (bassin du Jaguaribe). ORSTOM, 28 p. multigr., 18 graph.

DUBREUIL, P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. (1972) Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.

DUBREUIL, P., GIRARD G. (1970). Influence de très nombreux petits réservoirs sur le module annuel d'une rivière tropicale (exemple pris dans le bassin du Jaguaribe au Brésil). Symp. Man-Made Lakes, Knoxville, Tennessee, USA. 10 p. dactylo. + 2 fig.

DUBREUIL, P., GIRARD, G., HERBAUD, J.M. (1968) Monographie Hydrologique du Bassin du Jaguaribe (Ceará-Brésil). ORSTOM, Paris, 385 p.

DUBREUIL, P., GUISCAFRE, J. (1971) La planification du réseau hydrométrique minimal. *In* : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. vol.8, n°2, p.3-37.

DUBREUIL, P., MORELL M., SECHET P. (1975) Comportement et intéraction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 12, n°1, pp. 13-36.

DUBREUIL, P., VUILLAUME, G. (1975) Influence du Milieu Physico climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. *In* : Symposium de Tokyo. Tokyo. Publication de l'AISH. n°117. pp. 205-15.

DUNNE, T. (1978) Field studies of hillslope flow processes. *In* J. Kirkby (editor) Hillslope hydrology. John Wiley & Sons, pp. 227-293

DUNNE, T. (1983) Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. *In* : I. Rodriguez-Iturbe and V.K.Gupta (guest-editors), Scale problems in hydrology. J. Hydrol., 65, pp. 25-48

EMBRAPA, (1981) Seleção de áreas e construção de barreiros para uso de irrigações de salvação no trópico semi-árido. Circular técnica n.3. Petrolina (PE). Brasil.

EMBRAPA (1991) Em preparação. Zoneamento do Nordeste do Brasil.

EMBRAPA. EMBRATER (1971) Região Nordeste. Semi-arido Brasileiro : Proposta de Implantação de Sistemas de Exploração de Propriedades Agrícolas para Assegurar a Convivência do Homem com a Seca. Anexo 1.

EMBRAPA/SUDENE (1971) Ministério de Agricultura. Mapa exploratório. Reconhecimento de solos. Estado da Paraiba - 1/500 000. Recife.

EMBRAPA/SUDENE (1972/3) Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, (1972, 359 p. Boletim Técnico, 26, v.1.)/(1973, 354 p. Boletim Técnico, 26, v.2).

EMBRAPA/SUDENE (1973) Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. (Boletim Técnico, 28, v.1.)/(1973, 502 p. Boletim Técnico, 28, v.2.).

FERREIRA FILHO, W.M., CADIER, E., MARTINS JUNIOR, C. (1989) Avaliação de escoamento e erosão na Bacia Experimental de Tauá-CE. *In* : VIII SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 8, Foz do Iguaçu, Anais do... S. Paulo. ABRH, 1989. v.1.

FORTIN, J.P., CHARBONNEAU, R., LEFEVRE, J., GIRARD, G. (1971.) Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. AISH Publ. n. 101, v.2, Actes du Colloque de Varsovie, pp. 548-557.

FOTIUS, G. (1983) Bacia Experimental de Sumé ; estratificação e composição da vegetação. *In* : Cadier, E., Freitas, B. J. de & Leprun J. C. Bacia Experimental de Sumé ; instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE, pp. 46-53.

FRANKEN, W., LEOPOLDO P.R., MATSUI E., GOES RIBEIRO M.N. (1982) Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. Acta Amazônica 12(2), 1982, pp. 327-331

FRITSCH, J.M. (1990) Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en GUYANE FRANÇAISE. Thèse de doctorat, Montpellier II, 392 p. il.

GALINDO, C.A. (1980) Bacia Representativa de Tauá ; campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN-HME, 75 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 9). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

GALVÃO, C. de O. (1990) Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias. Tese de Mestrado, Campos II, Campina Grande, UFPB, 185 p.

GIRARD, G. (1966) L'évaporation d'une nappe d'eau libre dans le bassin du Jaguaribe. Paris, ORSTOM, juillet, 44 p. + graph. (ronéo.).

GIRARD, G. (1974) Etude de l'interception par la forêt aux îles Loyauté (Ile Lifou). Rap. ORSTOM, Paris, 9 p, 2 p. fig., 8 p. tab.

GIRARD, G. (1975) Modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 12, n°3, pp. 189-221.

GIRARD, G. MORIN G., CHARBONNEAU R. (1972) Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol.9, n°4.

GOMES FILHO, M.F., (1979) Um estudo sobre a influencia do albedo diferencial e da orografia na circulacao atmosferica : uma aplicacao'para o Nordeste brasileiro.

GOMES, H. P., SRINIVASAN, V. S., CADIER, E. , GALVÃO, C. de O. (1987) Um estudo experimental do escoamento superficial e erosão na região semi-árida paraibana. *In* : Anais VII Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos. Salvador, ABRH, vol. 3, pp. 322-337.

GOMES, J.M., SANTOS, M.F.dos. (1977) Bacia representativa do Riacho do Navio. I. Levantamento de reconhecimento de solos da bacia representativa do Riacho do Navio 1/100.000. II. Levantamento semi-detalhado de solos de uma sub-bacia do Riacho do Navio 1/25.000. Recife. SUDENE/Rec. solos. 84 p. il.

GUSMÃO da SILVA, A.C., JACCON, G., SECHET, P. (1979) Banco de dados hidroclimatológicos do Nordeste. Recife, SUDENE-DRN, "Convênio SUDENE/ORSTOM". 15 p.

GUSMÃO da SILVA, A.C.; CADIER, E.; JACCON, G.; KELNER J.A. (1980). Manual de utilização dos arquivos do Banco de Dados Hidroclimatológicos do Nordeste Brasileiro fora do sistema operacional: o sistema DHM. SUDENE/Missão Hidrológica Francesa, Recife, agosto 1979.

GEVJ (1965) Groupe d'Etude du val du Jaguaribe. Mise en valeur du bassin du Jaguaribe. Etudes générales de base, 1962-64. SUDENE, Recife et ASMIC, Paris. Tome IV - Les eaux de surface, rapport établi par la section hydrologique du GVJ sous la direction technique de l'ORSTOM ; V.1 - Introduction. Hydrologie de surface en région sédimentaire : les bassins représentatifs du Cariri, 156 p. V.2 - Hydrologie de surface en région cristalline : le bassin représentatif de Juatama, 116 p. V.2-bis - Hydrologie de surface en région cristalline : le bassin représentatiof de Juatama, 90 p. V.4 - Aménagements hydro-agricoles des bassins de Quixabinha et Atalho : étude hydrologique, 87 p.

HARGREAVES, G. (1973) Monthly precipitation probabilities for Northeast Brazil. S.L. University Utah State University, Department of Agricultural and Irrigation Engineering, 423 p.

HARGREAVES, G. (1974) Potential evapotranspiration and irrigation requirements for Northeast Brazil. Utah State University. 55 p.

HARGREAVES, G. (1975) Manual de requerimento de água para culturas irrigadas e agricultura seca. Logan, Utah State University, 41 p.

HASTENRATH, S. (1990) Prédiction of Northeast Brazil rainfall anomalies J. Clim., 3, 8, 893-904.

HASNAOUI, M.D. (1985) Analyse des facteurs de ruissellement pour la prédetermination de la crue décennalle au Sahel. Diplôme des Etudes Approfondies en Sciences de l'eau et aménagement. Option: Hydrologie. Montpellier, 102 p. il.

HASTENRATH, S. et HELLER, L. (1977). Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103, 77-92.

HERBAUD, J.J.M. (1983) **inédito**. Note sur la paramétrisation d'hyperboles pour le modèle hydrologique de simulation. SUDENE/ORSTOM. 15 p.

HERBAUD, J.J.M., LINS, M.J.A, ASSUNÇÃO, M.S. de, CADIER, E. (1989a) Bacia Hidrográfica Representativa de Ibipeba. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 219 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 27). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

HERBAUD, J.J.M., MAGALHÃES, F.X. de, CADIER, E., CAVALCANTE, N.M. da C. (1989b) Bacia Representativa de Juatama. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 153 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 24). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

HEWLETT, J.D., HIBBERT, A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In forest Hydrology, Sopper W. E. and Hull H.W. Ed., Pergamon Press : pp. 275-290.

HEWLETT, J.D., NUTTER, W.L. (1970) The varying source area of streamflow from upland basins. *In* : Proc. of the symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, Montana State University, Boseman, American Society of Civil Engineers, 65-83.

HIEZ, G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. *In* : Cah.ORSTOM, sér.Hydrol., vol. 14, n°2, pp. 129-172.

HIEZ, G. (1978) Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste. 2a Parte A. Homogeneização dos dados. Método do Vetor Regional. Recife, SUDENE. DRN. HME, "Convênio SUDENE/ORSTOM".

HISARD, P. (1990) Variabilité des précipitations dans l'Atlantique tropical sud-est pendant un El Niño. ORSTOM, Hydrol. continent., v. 5, n°2, pp. 87-104.

HORTON, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Am. Geophys. Union, 14, pp. 446-460

IBGE (1991) Estimativa da população residente em 1° de julho de 1990.

IBIZA, D. (1983) Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique. Application : variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 20 n°1, pp. 3-46

IBIZA, D. (1984-1985a) Etude de l'infiltration au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 21, n°3, pp. 17-50.

IBIZA, D. (1984-1985b) Une fonction de production aux petits pas de temps. Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 221, n°3, pp. 51-98.

IBIZA, D. (1987) Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique des O (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2 000 km2. Hydrol. Continent. v. 2, n°2. pp. 101-115.

JACCON, G. (1978). Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste do Brasil. Manutenção do cadastro mensal. SUDENE/Missão Hidrológica Francesa, Recife.

JACCON, G., (1982) As precipitaçoes anuais da região paraibana. Homogeneização e análise regional. SUDENE/DRN-HME. Convênio SUDENE/ORSTOM. 97 p.

JACCON, G., SECHET, P. (1980) Base de données hydrologiques du nord-est brésilien. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 17, n.° 3/4 pp. 177-219.

KLEMES, V. (1986) Dilettantism in hydrology : transition or destiny ? Wat. Resour. Res., 22(9), pp. 1775-1885.

KOUSKY, V.E., (1985) Atmospheric circulation changes associated with rainfall anomalies over tropical Brazil. Mon. Weath. Rev., 113, 11, 1951-1957.

KOUSKY, V.E., MOURA, A.D. (1981) Previsão de precipitação no Nordeste do Brasil: o aspecto dinâmico. INPE, 2244, PRE/029.

L'HOTE, Y. (1987) Rappel de l'historique du cycle de l'eau dans la culture Occidentale. Son enseignement en France, hier et aujourd'hui. Pub. AISH nº164, pp. 37-46.

LAFFORGUE, A. (1980) Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 14, nº4, pp. 300-345.

LAFFORGUE, A.; CASENAVE, A. (1980). Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. *La Houille Blanche*, nº 4-5, pp 243-249.

LANNA, A. E. (1983) Províncias hidrológicas e bacias representativas. *In* : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH, v.1, pp. 3-24.

LANNA, A. E. , SCHWARZBACH, M. (1989) Modhac - Modelo hidrológico auto-calibrável. Porto Alegre, IPH/UFRS.

LARAQUE, A. (1989) Estudo e previsão da qualidade da água dos açudes do Nordeste semi-árido Brasileiro. Recife, SUDENE-DPG-PRN-HME, 91 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 26). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

LARAQUE, A. (1991) Comportements hydrochimiques des "Açudes" du Nordeste brésilien semi-aride. Evolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 324 p + annexes.

LEPRUN, J.C. (1981) Relatorio de Andamento do Convênio de Manejo e Conservação do solo no Nordeste Brasileiro. (1982-83). Recife, SUDENE-DRN-Recursos de solo, "Convênio SUDENE/ORSTOM".

LEPRUN, J.C. (1983) Relatório de fim de Convênio de Manejo e Conservação do solo no Nordeste Brasileiro. (1982-83). Recife, SUDENE-DRN-Recursos de solo, 290 p. "Convênio SUDENE/ORSTOM".

LEPRUN, J.C. (1984-1985) La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. Particularités, bilan et perspectives. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.21, nº4, pp. 257-284.

LEPRUN, J.C. (1986) Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.22, nº2, pp. 223-233.

LEPRUN, J.C., ASSUNÇÃO, M.S., CADIER, E. (1983) Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. (Primeira síntese dos resultados obtidos). Recife, SUDENE-DRN-HME, 71 p. il. mapas. (Brasil. SUDENE. Hidrologia,15). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

LINS, M. J.A. (1981) Bacia Representativa de Tauá; campanha 79/80. Recife, SUDENE-DRN, 60 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 10). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

LINS, M. J.A. (1982) Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN, 59 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 12). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

LINS, M. J.A. (1984) Bacias Representativas de Tauá. Relatório de campanha 1980/82. Recife, SUDENE-DRN, 81 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM"

MAKSOUD, H. (1961) Estado atual do conhecimento dos recursos hídricos do Nordeste. Revista do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Rio de Janeiro, jan. 1961, ano 23, nº1, 119 p.

MARKHAM, C.G., Mc LAIN, D.R. (1977) Sea surface temperature related to rain in Ceará, northeast, Brazil. Nature, 265, pp. 320-323.

MECHOSO, C.R., LYONS, S.W., SPAHR, J.A. (1990) The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over Northeast Brazil. J. Clim., 3, 8, pp. 812-826.

MEROT, P. (1988) Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. Hydrol. continent., v. 3, n°2. pp.105-115.

MICHEL, C. (1990) Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, *(em preparação)*, CEMAGREF, 529 p.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Groupe de travail permanent pour les barrages en aménagement rural. (1977) Techniques des barrages en aménagement rural. Paris, 325 p.

MINISTERIO DAS MINAS E ENERGIA (1980) Mapa geológico do estado de Pernambuco : texto explicativo". Anexo mapa 1/500 000. DNPM. Recife. Brésil

MOALLEMI-POUR, A., MICHEL, C. (1989) Contribution à une meilleure estimation des paramètres d'une crue décennale : la méthode "DELTAQIX". ORSTOM, Hydrol. continent., v.4, n°2, pp. 113-122.

MOLINIER, M. (1981) Etude hydrologique des bassins de la Comba (République populaire du Congo). *In* : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 13, n°2/3, p.75-190.

MOLINIER, M. (1985) Um mini-simulador de chuva ou infiltrômetro de aspersão. *In* : Anais do V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo, 1985.

MOLINIER, M., OLIVEIRA GALVÃO, C. , PIMENTEL GOMES, H. (1987) Determinação do escoamento de uma bacia hidrográfica através das técnicas de simulação de chuva. *In* : Anais VI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Salvador, 1987.

MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C. (1989a) ATP-PIREN : Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. "Projet : Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale" Rapport final - ORSTOM Recife, Brésil. 25 p. + annexes.

MOLINIER, M., AUDRY, P., LEPRUN, J.C. (1989b) Modelagem do escoamento e da infiltração de um solo bruno do Nordeste semi-árido. *In* : Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, ABRH, v. 1, pp. 432-443.

MOLINIER, M., CADIER, E. (1984-85) Les sécheresses du Nordeste brésilien. *In* : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI(4), 1984-1985. pp. 23-49.

MOLINIER, M. (1992) Homogeneização e zoneamento da pluviometria anual no Nordeste. Convênio SUDENE/ORSTOM, Recife, *(em preparação)*.

MOLLE, F. (1989a) Evapotranspiração - Evaporação do tanque classe A - Evaporação nos pequenos açudes : Variações e correlações. *In* : Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Foz do Iguaçu, 1989.

MOLLE, F. (1989b) Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 172 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

MOLLE, F. (1991a) Geometria dos pequenos açudes. Recife. SUDENE-PRN, 126 p. (Brasil, SUDENE, Hidrologia, 29) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

MOLLE, F. (1991b) Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. Col. Mossoroense, Série C, v. 653, 171 p.

MOLLE, F. (1991c) Caractéristiques et potentialités des "Açudes" du Nordeste brésilien, thèse de doctorat USTL, Montpellier, 362 p.

MOLLE, F., CADIER, E. (1992) Manual do pequeno açude. SUDENE, Coopération Française, ORSTOM, il. 521 p.

MOLLE, F.; CADIER, E.; CAMPELLO, S. (1986). Rapport V.8. Modélisation du fonctionnement de retenues d'eau utilisées pour l'irrigation. XIX^{e} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris.

MONTGAILLARD, M. (1990), **inédito**. Note sur l'utilisation des fichiers MAPEDO et UNIMAP à l'aide des programmes CTL et OPTM, 10 p.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1973a, 1973b, 1974, 1975) Pour une théorie modifiée de l'infiltration. *In* : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 10, n^{o}, 1973a - 1^{e} partie : pourquoi? pp. 185-193; v. 10, n^{o}3, 1973b - 2^{e} partie : comment ? pp. 199-209 ; v. 11, n^{o}1, 1974 - 3^{e} partie : effets de compression et de contre-courant. pp. 51-59 ; v. 11, n^{o}3, 1974 - 4^{e} partie : le drainage vu comme une infiltration d'air, pp. 181-187, v. 12, n^{o}4, 1975 - 5^{e} partie : le cas de la pluie. pp. 227-233.

MORTON, F.I. (1983) *In* : J. Hydrol. Operation estimates of lake evaporation. Paris, 66, pp. 1-76, A83.

MOURA, A.D., SHUKLA, J. (1981) On the dynamics of droughts in Northeast Brazil : observations, theory and numerical experiments with a general circulation model.

NIMER, E. (1973) Climatologia da região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro, IBGE, vol. 34, n^{o}2, pp. 3-51.

NOUVELOT, J.F. (1974) Planificação da implantação de Bacias Representativas. Aplicação à área da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN, 91 p. ilust. Bibliografia original : Planification de l'implantation de bassins versants représentatifs. "Convênio SUDENE/ORSTOM".

NOUVELOT, J.F. (1975) Caracteres físicos e morfológicos das bacias hidrográficas representativas. Boletim de Recursos Naturais, Recife, SUDENE, v.13, n.1/2, pp. 57-68.

NOUVELOT, J.F., FERREIRA, P.A.S. (1977) Bacia representativa do Riacho do Navio : primeira estimativa dos recursos d'água. Recife. SUDENE-DRN-HME. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 4) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

NOUVELOT, J.F., FERREIRA, P.A.S., CADIER, E. (1979) Bacia Representativa do Riacho do Navio. Relatório Final. Recife, SUDENE-DRN-HME, 193 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 6). Bibliografia. "Convênio SUDENE/ORSTOM".

NOUVELOT, J.F., PEREIRA, F.C. (1977) Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE-DRN, 28 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

OBERLIN, G. (1980). Présentation en avant-première d'une méthode sommaire d'estimation des crues sur de petits bassins de métropole: la méthode SOCOSE. *La Houille Blanche* 4/5-1980, p.267-274.

PASSERAT, S.A. de, SILVA, T.C., ANDRADE, F.L.S., ALENCAR, R.T.S., GADELHA, C.L.M., SILVA, E.C. ((1989) Efeito do albedo e da resistência estomatal sobre a evaporaçao das plantas aquaticas. Lisboa, 17 p. Trabalho apresentado no IV Simposio Luso-brasileiro de hidráulica e recursos hídricos.

PEREIRA, F.C. (1978) Bacia Representativa de Ibipeba ; campanha 1976/1977. Recife, SUDENE-DRN, 31p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 3) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

PFAFSTETTER, O. (1957) Chuvas intensas no Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento. (DNOS). Rio de Janeiro. 419 p.

PIOGER, R. (1964) Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du Nordeste. Ressources en eau du Nord-Est du Brésil. Les eaux pluviales. Epta Programme. Recife, FAO, SUDENE, 185 p.

POUYAUD, B. (1985) Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du Lac de Bam et de la Mare d'Oursi (Burkina Faso), du Lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Thèse Université Paris Sud. 254 p.

PUECH, C., CHABI-GONNI, D. (1984) Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits bassins en Afrique de l'Ouest et Centrale (2e édition). CIEH, Ouagadougou, 91 p.

PUNGS, J.P., CADIER, E. (1985) Manual de Utilização dos Sistemas BAC e DHM. Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN-HME, 139 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 23). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

RIBSTEIN, P. (1990) Modèles de crues et petits bassins versants au sahel. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier II. 317 p.

RIBSTEIN, P., RODIER, J.A. (1989) Fortes crues des petits cours d'eau du Sahel : forme de l'hydrogramme. Hydrol. Continent., v. 4, n°1, pp. 33-47.

RIOU, C. (1975) La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoires ORSTOM n°80, Paris, 236 p.

ROCHE, M. (1963) Hydrologie de surface. Gauthier-Villars, ORSTOM, Paris, 430 p.

ROCHE, M. (1967) Recherche d'un hydrogramme standard. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 4, n°1, pp. 27-44.

ROCHE, M. (1972) Problèmes méthodologiques relatifs à la connaissance des crues. Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 9, n°2, pp. 53-63.

RODIER, J.A. (1967) Présentation de toutes les crues de faible fréquence étudiées par les hydrologues de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 4, n°1, pp. 79-85.

RODIER, J.A. (1976a) Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Etude préliminaire. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 13, n°4, pp. 243-263.

RODIER, J.A. (1976b) Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v.13, n°4, pp. 269-306.

RODIER, J.A. (1982) La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°2 pp. 115-127, Paris.

RODIER, J.A. (1984-1985) Caractéristiques des crues de petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°2.

RODIER, J.A. (1989) Ecoulements de surface dans les bassins perméables du Sahel. Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. ORSTOM, Hydrol. Continent. v.4 (2), pp. 123-138.

RODIER, J.A., AUVRAY C. (1965) Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km^2 en Afrique Occidentale. ORSTOM - CIEH, Paris. 30p.

RODIER, J.A., RIBSTEIN, P. (1990) Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les bassins versants du SAHEL couvrant 1 à 10 km^2. ORSTOM, Montpellier, 133 p.

ROPELEWSKI, C.F., HALPERT, M.S. (1989) Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. J. Clim. 2, 2, pp. 268-284.

ROSENBROCK, H.H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a fonction. The Computer Journal, 3(3), pp. 175-184.

S.C.S. (Soil Conservation Service) (1975) Urban Hydrology for small watersheds technical Release 55. Department of agriculture, U.S.A.

SAKOUT, S., GUILBOT, A. (1988) Essais d'estimation des débits de pointe de crue à partir des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants en région méditerrannéenne : le cas du Languedoc-Roussillon. Hydrol.Continent., ORSTOM. v.3, n^{o}1.

SEGUIS, L. (1986) Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée, lame écoulée). Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 326 p.

SEGUIS, L. (1987) Indice des précipitations antérieures et prédiction des crues au Sahel. *In* : Cah. ORSTOM, Hydrol. Continent., v.2, n^{o}1, pp. 47-55.

SERVAIN, J. (1985). Influence de l' Atlantique Tropical sur les hydroclimats de l'Afrique occidentale et du Nordeste Brésilien. V.Clim.Sat., 10, 45-53.

SERVAIN, J., SEVA, M., RUAL, P. (1990) Climatology comparison and long-term variations of sea surfaces temperature over the tropical Atlantic Ocean. I. Geoph. Res. 6, pp. 9421-9432.

SERVAT, E. (1986). Présentation de trois modèles globaux coneptuels déterministes: CREC 5, MODGLO, MODIBI. Multigr. 58 p. ORSTOM, Montpellier.

SERVAT, E., DEZETTER, A. (1990) Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'un modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. ORSTOM, Hydrol. Continent., v.5(2), pp. 147-165.

SHERMAN, L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the unit graph method. Engin. News. Rec, 108 , pp. 501-505.

SOPPER, W.E., LYNCH, J.A. (1970) Changes in water yield following partial forest cover removal on an experimental watershed. *In* "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, Pub. IAHS n^{o}96, pp. 369-389.

SRINIVASAN, V.S., GOMES, H.P., LEPRUN, J.C., SILVA, I.G. (1988) Erosion studies in Sumé a semi-arid region of Brazil. *In* : Sediment Budgets (Proceedings of Porto Alegre Symposium), Porto Alegre, IAHS, pp. 307-314. IAHS Publ. n^{o}174.

SUDENE (1971) Inventário hidrogeológico básico do Nordeste : folha n. 14. 1/500 000.

SUDENE (1971) Inventário hidrogeológico básico do Nordeste : folha n. 15, Jaguaribe-SE, Recife, 187 p. sér. Brasil, 32. 1/500 000.

SUDENE (1980) Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil. (PLIRHINE-FASE I). Recife, 32 volumes.

SUDENE, GEVJ (1967) Estudo Geral de Base do Vale do Jaguaribe. Recife/PE, SUDENE/ASMIC, v.5, Monografia Hidrológica, Bibliografia.

SUDENE, (1968) Mapa hidrogeológico do Nordeste (folha 9). Recife. 178 p.

SUDENE/CISAGRO/COOPERAÇÃO FRANCESA/ORSTOM (1988) Estudo da Pequena açudagem na Região do Alto Pajéu/PE. Recife, SUDENE. 118 p.

SUDENE/CISAGRO/COOPERAÇÃO FRANCESA/ORSTOM (1989) Estudo da pequena açudagem no agreste meridional. Recife.

THEBE, B., PONTANIER, R. (1989) Etude du ruissellement au Nord Cameroun. Transfert de la parcelle au bassin versant. *In* : Cah. ORSTOM, Hydrol. Continent.,vol.4(1).

TOEBES, C., OURYVAEV, V. (1970) Les bassins représentatifs et expérimentaux. Guide International des pratiques en matière de recherche. UNESCO, Etudes et rapports d'hydrologie n°4, 380 p.

TUCCI, C.E.M. (1987) Modelos determinísticos. *In* : Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. Nobel/ABRH, pp. 211-324.

TURC, L. (1954-55) Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron. 5, pp. 491-509; 6, pp. 5-131

VAN TE CHOW (1964) Handbook of Applied Hydrology. Mac Graw Hill Book Company, New York, 1530p.

VIANA, F.L., (1977) Bacia representativa de Juatama. Campanha 1975-76. Fortaleza, ATECEL.

VIANA, F. L. (1986) Comportamento hidrológico das pequenas bacias do Nordeste, Fortaleza, UFC, 166 p. Dissertação de Mestrado.

VIEIRA, H.J.P., CADIER, E., LINS, M.J.A. , ASSUNÇÃO, M.S. (1983) Descrição da Rede de Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste brasileiro. *In* : V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, Blumenau, Anais do Fortaleza, v. 1, pp. 39-66.

VUILLAUME, G. (1974) L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calculs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 11, n°3, pp.205-240.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion Losses ; a guide to conservation and planning. Washington, U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 537.

ZELAQUETT, G. J. (1980) Bacia Representativa de Açu ; relatório de campanha 1977/1978 e complementação do relatório de instalação. Recife, SUDENE-DRN, 99 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 8). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS NÃO CITADAS

BRET, B. (1989) "Les hommes face aux sécheresses - Nordeste brésilien, Sahel africain". IHEAL & EST - Samuel Tastet Ed. Mayenne. 422 p.

BRUNET, S. (1986) Le Nordeste brésilien. Les véritables enjeux. Publication de la Fondation Liberté sans Frontières. Paris. 44p.

CADIER, E.,(inédito 1983) Elaboration d'une méthode d'évaluation des écoulements des petits bassins du Nordeste semi-aride brésilien, Recife, 64p.

CADIER, E., LANNA, A.E., MENEZES, M., M.S. CAMPELLO (1987) Avaliação dos Estudos referentes aos Recursos Hídricos das Pequenas Bacias do Nordeste Brasileiro. *In* : Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos, Salvador/BA.

CASTRO, J. (1965) Une zone explosive, le Nordeste du Brésil. Ed. Esprit Seuil. Paris. 225 p.

CHEVALLIER, P. (1985) Analyse et modélisation du ruissellement en région sahélienne (Mare d'Oursi, Burkina Faso). La Houille Blanche n^{O} 6/7, pp. 573-580.

CHEVALLIER, P., CLAUDE, J., POUYAUD B., BERNARD A. (1985) Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981. Travaux et Documents de l'ORSTOM n.190. 256 p.

CONDEPE (Companhia de Desenvolvimento de Pernambuco) (1978) Plano Diretor para o Desenvolvimento Integrado da Bacia do Rio Capibaribe. Recife.

CORMARY, Y., GUILBOT, A. (1971) Ajustement et réglage des modéles déterministes. Méthodes de calage des paramètres. La Houille Blanche 2/1971, pp. 131-140.

DOOREMBOS, J., PRUITT, W.O. (1977) Crop water requirements. Rome, F.A.O., 178 p. (Irrigation and Drainage, série 24).

DUBREUIL, P. (1982). Estimation of water resources characteristics ; introduction. *In* : UNESCO. Application of results from representative and experimental basins. Paris, UNESCO, pp. 15-26.

DUBREUIL, P. (1985a) Review of field observations of runoff generation in the tropics. J. Hydrol., 80 pp. 237-264.

DUBREUIL, P. (1985b) "Quelques problèmes de l'eau rencontrés au Brésil". Ed. La houille blanche n^{O}2, Paris. pp. 112-122.

DUQUE, J G. (1975) Solo e água no polígono das secas. 4e ed., Fortaleza. DNOCS, Publicação 154, série I-A : 122 p.

DUQUE, J.G. (1973) O Nordeste e as lavouras xerófilas. Fortaleza. Banco do Nordeste do Brasil.

GIRARD, G. (1981) Etude des ressources en eau d'une région comportant des aménagements hydrauliques (application aux bassins du polygone de la sécheresse du Nord-Est du Brésil). C.I.G. Fontainebleau. ORSTOM, Bureau Central d'Hydrologie, Bondy. 25 p.

HARR, R.D., HARPER, W.C., KRUGIER, J.T., HSIEH F.S. (1975) Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. Wat. Resour. Res.,11(3), pp. 436-444.

IBBIT, R. P., O'DONNELL, T. (1971) Fitting Methods for conceptual catchment models. Journal of the hydraulics division, Proc. ASCE, 97 (HY9), pp. 1331-1342.

IBIZA, D. (1984-1985c) Point de vue sur les fonctions de production. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 21, n°3, pp. 5-15.

JACCON, G. (1980) Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste. Convênio SUDENE/ORSTOM.

KIRKBY, M. (1988) Hillslope runoff processes and models. J. Hydrol., 100, pp. 315-339.

KOVNER, J.L., EVANS, T.C. (1954) A method for determining the minimum duration of watershed experiments. Trans. Amer. Geophys. Union, 35, pp. 608-612.

MARWELL FILHO, P., LANNA, A. E. (1986) MOHTSAR : um modelo hidrológico, Caderno de Recursos Hídricos. 4(1), pp. 95-118.

MARWELL FILHO, P., LANNA, A.E. (1987) MOHTSAR, un modèle hydrologique pour le Tropique semi-aride.

MOLLE, F. (1985) Potencialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier, France, 142 p.

MOLLE, F., CADIER, E. (1986) Potencial dos Açudes e Dimensionamento dos Perímetros Irrigados. Revista Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID.

MOLLE, F., COURCIER, R., CADIER, E. (1988) Quelques aspects de la petite irrigation dans le Nordeste Brésilien. *In* : Les Cahiers de la Recherche Développement, n· 19, sept. 1988.

MOLLE, F., MEDEIROS, R.D., DOHERTY,F. R. et al. (1989) Perdas por infiltração nos pequenos açudes. *In* : Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Foz do Iguaçu, 1989.

MONIOD, F. (1969) Calcul automatique des paramètres de l'Hydrogramme Standard. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., vol. VI, n°2, pp. 77-98.

MONIOD, F. (1983) Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XX, 3/4, pp. 191-203.

NASCIMENTO, S. R., CADIER, E., MOLLE, F., *et al* (1987) POMAC : Um sistema automatizado de simulação de pequeno perímetro de irrigação alimentado por açude. *In* : VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Anais do... ABRH, Salvador, 1987. V. 1, pp. 382-394.

NASH, J. E., SUTCLIFFE, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models ; Part I - A discussion of principles ; J. Hydrol., 10, pp. 282-290.

PICK-UP, G. (1977) Testing the eficiency of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models. Hydr. Scienc. Bull., XXII, 2 6/1977, pp. 257-274.

PILGRIM, D. H. (1986) Bridging the gap between flood research and design practice. Wat. Resour. Res., 22(9), pp. 1655-1765.

PILGRIM, D.H. (1983) Some problems in transferring hydrological relationships between small and large basins and between regions. *In* : I. Rodiguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editors), Scale problems in hydrology. J. Hydrol., 65, pp. 49-72.

REBOUÇAS, A. da C., (1973) Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil. Evaluation des ressources. Orientations pour la mise en valeur. Thèse de Doctorat d'Etat et Sciences (A.O.8639). Université Louis Pasteur de Strasbourg. 291 p.

REBOUÇAS, A. da C., MARINHO, E. (1972) Hidrologia das secas. Nordeste do Brasil. Recife, (Série Brasil. SUDENE. Hidrogeologia, 41).

ROCHE, M.A. (1981) Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ECEREX en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 19, v. 2., pp. 81-114, Paris.

ROCHE, M.F (1986) Dictionnaire Français d'hydrologie de surface. Masson, Paris, 288 p.

RODIER, J.A (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Toulouse. ORSTOM, Paris, 137 p.

SANGUINETTI, P.A., CADIER, E. (1981) Avaliação dos recursos hídricos para pequenos aproveitamentos em zonas semi-áridas do Nordeste : estudo de Bacias Representativas e Experimentais. *In* : IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, v. 3, pp. 223-36.

SECRETARIA DE ENERGIA E RECURSOS MINERAIS (1982) Mapa geológico do Estado da Paraiba - 1/500 000. Recife.

SERVAIN, J., PICAUT, J., MERLE, J. (1982) Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic ocean. J. Phys. Ocean., 12, pp. 457-463.

SHERMAN, L.K. (1941) The unit hydrograph and its applications. Bull. Ass. State Eng. Soc., vol. 17, pp. 4-22.

SIMMERS, I. (1975) The use of regional hydrology concepts for spatial translation of stream flow data. AISH. Publication n°117. Symposium on the Hydrological Characteristics of River Basins, Tokyo.

SIQUEIRA, L. (1964) Aspectos hidrogeológicos do Cariri paraibano. SUDENE Boletim de Recursos Naturais, Recife, 2(1/4), pp. 11-44.

SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. J. (1985) The analysis of structural identifiability : theory and application to conceptual rainfall-runoff models. Wat. Resour. Res., 21(4), pp. 487-495.

SWANK, W. T., HELVEY, J.D. (1970) Reduction of streamflow increases following regrowth of clearcut hardwood forests. *In* "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, pub. IAHS n°96, pp. 346-360.

THEBE, B. (1987) Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des tranferts d'échelles. Thèse USTL, Montpellier, 306 p.

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.C. (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centertan, Drexel Institut of Technology (Publications in Climatology, 3).

SUMÁRIO DETALHADO

Resumo 5
Agradecimentos 9
Prefácio 11
Introdução 13

1. Contexto natural e história da hidrologia das pequenas bacias 15
1.1 Contexto natural do nordeste do brasil 15
1.1.1 Os mecanismos do clima. Por que existe uma zona seca? 19
1.1.2 As precipitações 23
1.1.3 As secas 26
1.1.4 Os solos da zona semi-árida 28
1.1.5 Os açudes, meio de luta contra a irregularidade dos escoamentos 31
1.2 Histórico da hidrologia das pequenas bacias do nordeste 33
1.2.1 Dados anteriores a 1963: a rede geral hidropluviométrica 33
1.2.2 Os anos 60: o estudo do Vale do Jaguaribe e os primeiros estudos sobre pequenas bacias hidrográficas 34
1.2.3 Os anos 70: planificação e instalação de uma rede de Bacias Hidrográficas Representativas 36
1.2.4 Os anos 80 : a diversificação 39
1.2.4.1 Enfraquecimento do Programa de Bacias Hidrográficas Representativas (BHR) 39
1.2.4.2 As bacias hidrográficas experimentais (BHE) 41
1.2.4.3 O estudo dos açudes 42
1.2.5 Informações hidrológicas fornecidas pelos diferentes programas 47

2. Técnicas hidrológicas utilizadas 50
2.1 Poblemática e especificidade da hidrologia das pequenas bacias 50
2.1.1 Por que estudar as pequenas bacias? 50
2.1.2 Imperativos e técnicas próprios às pequenas bacias 52
2.1.2.1 Metrologia 52
2.1.2.2 Heterogeneidade das pequenas bacias 54
2.1.2.3 Noção de representatividade, necessidade de planificação 55
2.1.2.4 Técnicas de homogeneização, de extensão de série e de modelização 56
2.1.2.5 Interpretação dos resultados e elaboração de sínteses regionais 56
2.2 Conceitos e esquemas atuais da hidrologia das pequenas bacias. Resumo bibliográfico .. 58
2.3 Técnicas utilizadas no Nordeste brasileiro 63
2.3.1 Planificação inicial da rede de Bacias Hidrográficas Representativas 63
2.3.1.1 Planificação efetuada por NOUVELOT em 1974. 63
2.3.1.2 Pertinência do zoneamento e da planificação realizada por NOUVELOT 66
2.3.1.3 Como planificaríamos hoje? 69
2.3.2 Instalação de uma bacia hidrográfica representativa 73
2.3.3 Operação das bacias hidrográficas em fase de rotina 79
2.3.4 Funcionamento do dispositivo e resultados obtidos 81

3. Descrição das bacias hidrográficas representativas implantadas no Nordeste brasileiro 87
3.1 Bacia representativa de TAUÁ 88
3.1.1 Histórico 88
3.1.2 Descrição da bacia 89
3.1.3 Dispositivo de monitoramento instalado 95
3.1.4 Resultados obtidos 98
3.1.5 Interpretação: conhecimentos adquiridos através da bacia de TAUÁ 103
3.1.5.1 Principais tipos de comportamentos hidrológicos 103
3.1.5.2 Descrição dos principais grupos 104
3.1.5.3 Variação das lâminas escoadas em um conjunto de bacias encaixadas 106

3.1.6 Conclusão da Bacia de TAUÁ ... 108
3.2 A Bacia representativa de SUMÉ ... 109
3.2.1 Histórico ... 109
3.2.2 Descrição da bacia ... 110
3.2.3 Rede de medição hidrometeorológica instalada ... 119
3.2.3.1 Bacia representativa : 1974-1989 ... 119
3.2.3.2 Bacia Experimental: 1981-1990 ... 120
3.2.3.3 Ação Temática Programada (ATP) (ORSTOM/CNRS/SUDENE/UFPB) ... 128
3.2.4 Resultados obtidos no conjunto do dispositivo ... 128
3.2.5 Conclusões: os resultados obtidos da bacia de SUMÉ ... 131
3.2.5.1 Variações das lâminas escoadas em função da vegetação ... 131
3.2.5.2 Variações dos escoamentos entre microbacias semelhantes ... 132
3.2.5.3 Lâminas escoadas nas Bacias Representativas ... 132
3.3 A bacia representativa do RIACHO DO NAVIO ... 134
3.3.1 Histórico e descrição da bacia ... 134
3.3.2 Rede de monitoramento instalada ... 141
3.3.3 Resultados obtidos ... 144
3.3.4 Interpretação: resultados obtidos da bacia do RIACHO DO NAVIO ... 147
3.3.4.1 Os regimes hidrológicos ... 148
3.3.4.2 Tentativa de ajustamento de um modelo simplificado utilizando um índice pluviométrico ... 149
3.3.4.3 Funcionamento do açude CONCEIÇÃO ... 150
3.3.5 Conclusões dos estudos da Bacia do RIACHO DO NAVIO ... 153
3.4 A Bacia representativa de JUATAMA ... 154
3.4.1 Histórico ... 154
3.4.2 Descrição da bacia ... 156
3.4.3 Rede de monitoramento instalada ... 161
3.4.4 Resultados obtidos ... 162
3.4.5 Conclusões e interpretação: os resultados obtidos ... 166
3.5 Bacia representativa de IBIPEBA ... 167
3.5.1 Histórico e descrição da bacia ... 168
3.5.2 Equipamento de medição instalado ... 173
3.5.4 Conclusões: resultados obtidos na Bacia de IBIPEBA ... 178
3.5.4.1 Os módulos anuais ... 178
3.5.4.2 Principais regimes hidrológicos ... 178
3.5.4.3 Paradoxo das cheias ... 179
3.5.4.4 Perdas na rede hidrográfica ... 179
3.5.4.5 Aperfeiçoamento dos conhecimentos hidrológicos regionais. ... 180
3.6 Conclusão da terceira parte ... 181

4. Transposição dos escoamentos anuais ... 185
4.1 Objetivos e estratégia ... 185
4.2 Modelização hidrológica das pequenas bacias hidrográficas do nordeste ... 189
4.2.1 Algorítmos utilizados pelo modelo SUDENE-ORSTOM ... 189
4.2.2 Apresentação de um exemplo de ajustamento ... 193
4.2.2.1 Inicialização do ajustamento ... 194
4.2.2.2 Os programas de ajustamento do modelo ... 194
4.2.2.3 Apresentação de um exemplo de modelo ajustado ... 197
4.2.3 Ajustamentos realizados: validação ... 205
4.2.3.1 Critérios de ajustamento ... 205
4.2.3.2 Validação dos modelos ... 208
4.2.3.3 Principais parâmetros dos modelos ... 209
4.3 Escolha dos pluviômetros para a transposição espacial ... 211
4.3.1 Zoneamento para as chuvas em 24 h ... 211
4.3.2 Crítica e consistência dos dados pluviométricos ... 211
4.3.2.1 Seleção dos pluviômetros ... 211
4.3.2.2 Atribuição de uma classe de qualidade aos 156 pluviômetros selecionados ... 212
4.3.3 Zoneamento pluviométrico ... 218
4.3.3.1 Método empregado - Definição do "faciès" do regime hidrológico ... 218
4.3.3.2 Definição de duas grandes zonas climáticas ... 219
4.3.3.3 Forma da relação chuva-escoamento anual. O coeficiente L_{600} ... 219
4.3.3.4 A grande zona climática do Sertão ... 222

4.3.3.5 A grande zona climática de Transição 227
4.3.4 Seleção final dos pluviômetros 230
4.4 A Redução das chuvas 233
4.4.1 Lembrete teórico 233
4.4.2 Coeficiente de redução proposto para as fortes chuvas 233
4.4.3 Correção para as chuvas fracas 235
4.4.4 Fórmulas de correção propostas 236
4.4.5 Discussão - Pertinência da redução 237
4.5 Tipologia das bacias 239
4.5.1 Caracterização e reagrupamento de bacias 239
4.5.1.1 A abundância: a média dos escoamentos 239
4.5.1.2 Os "faciès" dos regimes: variabilidade e reagrupamento de bacias 242
4.5.2 Caracterização numérica dos diferentes regimes 249
4.5.3 Análise dos fatores condicionantes dos módulos 256
4.5.3.1 Apresentação dos parâmetros físicos estudados 256
4.5.3.2 Correlações entre os parâmetros físicos e morfológicos e os dos modelos 259
4.5.3.3 Análise, em componentes principais, do papel dos diferentes parâmetros 267
4.5.3.4 Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE 270
4.5.4 Primeira tentativa de transposição 272
4.6 Utilização dos dados da rede geral 274
4.6.1 Por que utilizar os dados da rede geral? Objetivos e estratégia 274
4.6.2 Seleção e homogeneização dos dados das bacias da rede geral 275
4.6.3 Introdução da informação pedológica e pluviométrica 280
4.6.3.1 Elaboração final da informação pedológica e pluviométrica: os arquivos UNIMAP e MAPEDO 280
4.6.3.2 Tipologia dos solos: definição dos grupos de solo 284
4.6.4 Cálculo dos valores de L_{600} dos sub-grupos de solo 285
4.6.4.1 Princípio do método de otimização 285
4.6.4.2 Realização da otimização: discussão, precauções e artifícios 286
4.6.4.3 Resultados obtidos: os valores de L_{600}, base da transposição 287
4.6.4.4 Importância relativa dos fatores explicativos "solo" e "chuva" 295
4.6.4.5 Tentativa de evidenciar outros fatores explicativos 296
4.6.5 Adaptação da fórmula às pequenas bacias 297
4.6.5.1 Influência da cobertura vegetal no escoamento (correção CV) 298
4.6.5.2 Correção devida à presença de açudes na bacia hidrográfica (correção CA) 301
4.6.5.3 Influência de zonas de retenção situadas no percurso da água (correção CL) 303
4.6.5.4 Papel da superfície 304
4.6.6 Validação 305
4.6.6.1 Validação com a ajuda dos resultados obtidos nas bacias representativas 305
4.6.6.2 Comparação da fórmula SUDENE/ORSTOM com a fórmula de AGUIAR 311
4.6.7 Conclusões sobre a utilização dos dados da rede geral 314

5. Transposição das características das cheias 317
5.1 Compilação bibliográfica correspondente às cheias 318
5.2 Método, objetivo e estratégia 321
5.3 Informação disponível 323
5.3.1 Resumo das características das cheias das pequenas bacias do Nordeste 323
5.3.2 Variação do tempo de concentração em função da superfície 324
5.4 Fórmulas propostas para a transposição das cheias nas zonas cristalinas 326
5.4.1 Superfícies de bacias compreendidas entre 5 e 500 km^2 326
5.4.1.1 Variações de Kx em função da superfície 326
5.4.1.2 Variações da lâmina escoada da cheia decenal em função da superfície 327
5.4.1.3 Fórmula de cálculo da descarga da cheia de projeto 328
5.4.2 Superfícies de bacias compreendidas entre 0,1 e 5 km^2 329
5.4.3 Superfícies superiores a 500 km^2 330
5.4.4 Relação entre os tempos característicos dos hidrogramas 332
5.5 Discussão: os fatores corretivos das cheias 335
5.5.1 Correção a efetuar quando a bacia é sedimentar 335
5.5.2 Os outros fatores corretivos 336
5.5.3 Validação 341

6. Conclusão geral 347
6.1 Nossas opções, prioridades e ações 347
6.2 Funcionamento das bacias representativas 349
6.3 Estimativa dos escoamentos anuais 351
6.4 Estimativa das cheias 353
6.5 Perspectivas e prioridades para a pesquisa hidrológica 354

ANEXOS 373
Anexo 1 Dimensionamento dos açudes 375

Anexo 2 Informações existentes a respeito das outras bacias representativas 401
Características das bacias 402
Características morfométricas e pluviométricas das bacias 402
Características dos solos e da vegetação 402
Resultados obtidos 413
Série das lâminas observadas 413
Características das cheias 414
Lâminas escoadas características 415

Anexo 3 Utilização do modelo SUDENE/ORSTOM com séries pluviométricas da África 417

Anexo 4 Glossário 421

Bibliografia 423

Sumário detalhado 439

Relação das Figuras 443

Relação das Tabelas 446

RELAÇÃO DAS FIGURAS

Capítulo 1 : Contexto natural e história da hidrologia das pequenas bacia

1.1 : Mapa de situação do Nordeste brasileiro 15
1.2 : Grandes zonas fisiográficas do Nordeste 18
1.3 : Esquema de interação da ZCIT com as outras zonas de convergência 20
1.4 : Condições de aparição de uma frente fria no Sul do Nordeste, *segundo KOUSKY e MOURA.* 20
1.5 : Os sistemas de circulação atmosférica e os principais efeitos orográficos 22
1.6 : Precipitação anual média 24
1.7 : Algumas distribuições de precipitações mensais do Nordeste brasileiro 25
1.8 : Precipitações máximas em função de sua duração e de seu período de retorno 26
1.9 : Série dos índices pluviométricos no Nordeste, *segundo MOLINIER e CADIER (1984-85).* 27
1.10: Situação de diferentes solos com relação ao relevo ao longo de um corte característico do Nordeste, *(segundo F. BARRETO, inédito, 1991).* 29
1.11 : Mapa dos riscos de erosão do Nordeste brasileiro, *(segundo LEPRUN, 1983).* 30
1.12 : Irregularidade dos escoamentos sobre uma pequena bacia 31
1.13 : Densidade de açudes na região de Caicó *(segundo MOLLE, 1991c).* 32
1.14 : Mapa de situação das bacias representativas instaladas no Nordeste brasileiro 38
1.15 : Número de instrumentos instalados pelos diferentes programas 48

Capítulo 2 : Técnicas hidrológicas utilizadas

2.1 : As zonas hidrológicas do Nordeste brasileiro *(segundo NOUVELOT)* 68
2.2 : Comparação de dois tipos de zoneamento 70
2.3 : Seqüência de solo freqüente numa unidade de paisagem da EMBRAPA 72
2.4 : Erro de leitura limnimétrica freqüente 82

Capítulo 3 : Descrição das bacias hidrográficas representativas implantadas no Nordeste brasileiro

3.1.1 : Mapa dos solos da bacia representativa de TAUÁ 91
3.1.2 : Bacia representativa de Tauá: Rede de medição hidropluviométrica e delimitação das bacias hidrográficas 96
3.1.3 : Croqui de situação das instalações da bacia experimental de Tauá 97
3.2.1 : Esboço geológico da bacia de SUMÉ 113
3.2.2 : Mapa dos solos da bacia de SUME 114
3.2.3 : A complexidade da repartição e do funcionamento dos solos da bacia experimental de SUMÉ (*segundo AUDRY, LEPRUN e MOLINIER*) 117
3.2.4 : Rede de medição do açude **SUMÉ** 121
3.2.5 : Rede hidropluviométrica e hidrográfica da BHR de **SUMÉ** 122
3.2.6 : Croqui de situação da bacia experimental de Sumé 124
3.2.7 : Fossa de sedimentos das micro-bacias 127
3.2.8 : Reservatórios coletores das parcelas de WISCHMEIER 127
3.3.1 : Esboço geológico da bacia do **RIACHO DO NAVIO** 137
3.3.2 : Esboço pedológico da bacia do RIACHO DO NAVIO 138
3.3.3 : Mapa dos solos da parte oriental da bacia do RIACHO DO NAVIO 139

3.3.4 : Rede hidropluviométrica da bacia do RIACHO DO NAVIO 143
3.3.5 : Dispersão da relação entre as chuvas e os escoamentos anuais 145
3.3.6 : Relação entre chuva (PM), escoamento das cheias (Ls) e o índice de saturação prévia das cheias (IK) 146
3.3.7 : Simples acumulação das lâminas escoadas no posto de SALOBRO 148
3.3.8 : Rebaixamento do açude CONCEIÇÃO em função da evaporação do "tanque" e da profundidade do açude 151
3.3.9 : Variações do nível do açude CONCEIÇÃO 152
3.4.1 : Mapas dos solos da bacia de JUATAMA 157
3.4.2 : Toposeqüência típica na região de JUATAMA 158
3.4.3 : Rede hidropluviométrica da bacia de JUATAMA 163
3.4.4 : Ligação entre a chuva (Pm), o escoamento das cheias (Ls) e o índice de saturação hídrica prévia da bacia (IK) 165
3.5.1 : Mapas de solos da bacia de IBIPEBA 174
3.5.2 : Rede hidropluviométrica e açudes da bacia de IBIPEBA 175

Capítulo 4 : Transposição dos escoamentos anuais

4.1 : Principais etapas da elaboração de um método de transposição dos escoamentos anuais de bacias do Nordeste do Brasil 187
4.2.1 : Parametrização das hipérboles 191
4.2.2 : Principais etapas do ajustamento do modelo SUDENE/ORSTOM 195
4.2.3 : Relação entre a chuva (Pm), o escoamento (Ls) e o índice de precipitação anterior (IK). *(Posto de Caldeirão)* 196
4.2.4 : Correção automática *"por evento"* 199
4.2.5 : Comparação entre os valores mensais dos escoamentos calculados e observados 204
4.2.6 : Comparação entre os valores diários dos escoamentos calculados e observados 204
4.2.7 : Validação do modelo para CALDEIRÃO 208
4.2.8 : Validação do modelo para MOQUEM 209
4.3.1 : Zoneamento pluviométrico inicial *(em redução no fundo da figura)* 213
4.3.2 : Situação dos 156 pluviômetros analisados 213
4.3.3 : Diferenciação das duas grandes zonas climáticas 220
4.3.4 : "Grandes" zonas pluviométricas 221
4.3.5 : Análise dos componentes do regime pluviométrico da zona Sertão 224
4.3.6 : Os componentes do regime pluviométrico. Reagrupamento dos pluviômetros 225
4.3.7 : Evidência da abundância dos escoamentos na zona 6 227
4.3.8 : Análise em componentes principais do regime pluviométrico da zona de Transição 228
4.3.9 : Comparação dos escoamentos das zonas 8 e 9 229
4.3.10 : Distorção induzida pela seleção dos pluviômetros 232
4.4.1 : Coeficiente de redução em função da superfície da bacia e do período de retorno da chuva pontual *(segundo NOUVELOT et al)* 234
4.4.2 : Variação do coeficiente de redução em função da chuva diária *(para uma bacia de 500 km^2)* 235
4.5.1 : Comparação dos coeficientes L_{600} das duas zonas climáticas 241
4.5.2 : Comparação dos coeficientes A das duas zonas climáticas 242
4.5.3 : Coeficiente L_{600} em função de A para a zona climática Sertão 243
4.5.4 : Tipologia das bacias: a) análise dos componentes 244
4.5.4 : Tipologia das bacias: b) reagrupamento das bacias 245
4.5.5 : Tipologia das bacias: Regularidade e abundância 248
4.5.6 : Exemplo de duas regressões entre "faciès" do regime e módulo 249
4.5.7 : "Faciès" do regime em função do módulo, para os diferentes grupos de bacias 252
4.5.8 : Evolução do "faciès" do regime em função do grupo de bacias 253

4.5.9 : Evolução do "faciès" do regime em função da pluviometria anual média 253
4.5.10 : Evolução do "faciès" do regime em função da zona climática" 254
4.5.11a : Correlação entre parâmetros característicos das bacias 265
4.5.11b : Correlação entre parâmetros característicos das bacias 266
4.5.11c : Nível de significação dos coeficientes de correlação 267
4.5.12a : Análise, em componentes principais, dos diferentes parâmetros - Análise dos componentes 268
4.5.12b : Análise, em componentes principais, dos diferentes parâmetros - Reagrupamento das bacias 269
4.5.13 : Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE (parâmetros físicos das bacias). Explicação do L_{600} por CSOL e CVEG 270
4.5.14 : Cálculo de L_{600} pelo método de STEPWISE (parâmetros do modelo). Explicação do L_{600} por IK1, D1 e X03 271
4.6.1 : Utilização da rede geral para elaboração de um método de transposição 276
4.6.2 : Mapa da situação das bacias selecionadas 277
4.6.3 : Exemplo de ajustamento de uma função potência entre lâminas escoadas e precipitadas 279
4.6.4 : Exemplo de mapa pedológico e de isoietas para três bacias da rede geral 283
4.6.5 : Comparação entre as lâminas calculadas e as observadas 292
4.6.6 : Cálculo das lâminas escoadas das diferentes sub-bacias com as UMP dos mapas da EMBRAPA 310
4.6.7 : Validação do método : comparação entre as lâminas calculadas e as observadas 311
4.6.8 : Comparação da fórmula SUDENE/ORSTOM com a fórmula de AGUIAR 313

Capítulo 5 : Transposição das características das cheias

5.1 : Relação entre Kx e a superfície S da bacia de zona cristalina 326
5.2 : Relação entre a lâmina da cheia decenal e a superfície S da bacia 327
5.3 : Tempo de base médio em função da superfície para bacias das zonas cristalinas 331
5.4 : Tempo de subida médio em função do tempo de base médio para todas as zonas 333
5.5 : Tempo de base médio em função do tempo de base unitário para todas as zonas 334
5.6 : Kx médio em função de Kx unitário para todas as zonas 334
5.7 : Kx médio em função da superfície para bacias das zonas sedimentares 335
5.8 : Tempo de base médio, em função da superfície para bacias das zonas sedimentares 336
5.9 : Comparação do dobro da cheia decenal estimada com a cheia de projeto calculada pela fórmula SUDENE/ORSTOM 342

Anexo 2 : Informações existentes a respeito das outras bacias representativas

A2.1 : Mapa de situação geral de bacias representativas do GEVJ. (Região do CARIRI) 403
A2.2 : Mapa dos solos da bacia de BATATEIRAS 405
A2.3 : Mapa dos solos da bacia de MISSÃO VELHA 407
A2.4 : Mapa dos solos da bacia de QUIXABINHA 409
A2.5 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Pedro Costa 410
A2.6 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Jericó 411
A2.7 : Mapa dos solos das bacias dos projetos pilotos : Açude Manoel 412

Anexo 3 : Funcionamento do modelo SUDENE/ORSTOM com séries pluviométricas da África

A3.1 : Comparação das respostas do modelo SUDENE/ORSTOM utilizado com os pluviômetros africanos e brasileiros 418
A3.2 : Mapa de situação dos pluviômetros africanos utilizados 419

RELAÇÃO DAS TABELAS

Capítulo 1 : Contexto natural e história da hidrologia das pequenas bacia

1.1 : Número de instrumentos instalados e volume de informação recolhido pelos diferentes programas 47

Capítulo 2 : Técnicas hidrológicas utilizadas

2.1 : Como resolver os problemas hidrológicos das pequenas bacias 53
2.2 : Etapas dos estudos hidrológicos de pequenas bacias 64
2.3 : Datas de publicação dos diferentes relatórios 84

Capítulo 3 : Descrição das bacias hidrográficas representativas implantadas no Nordeste brasileiro

3.1.1 : Resultados dos testes de infiltração da bacia de TAUÁ 90
3.1.2 : Principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação das sub-bacias de TAUÁ .. 93
3.1.3 : Características morfométricas das bacias de TAUÁ 94
3.1.4 : Lâmina anual escoada da bacia de TAUÁ (mm) 98
3.1.5 : Variabilidade dos escoamentos anuais nas bacias de Tauá 100
3.1.6 : Características das cheias da bacia de TAUÁ 101
3.1.7 : Lâminas escoadas características da bacia de TAUÁ (mm) 102
3.1.8 : Principais grupos ou tipos de comportamento hidrológico na bacia de TAUÁ 104
3.2.1 : Resultados dos testes de permeabilidade da bacia de SUMÉ 115
3.2.2 : Principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação da bacia de Sumé 116
3.2.3 : Parâmetros morfométricos das três sub-bacias de Sumé 119
3.2.4 : Série das lâminas escoadas da bacia de SUMÉ (mm) 129
3.2.5 : Características das cheias da bacia de SUMÉ 129
3.2.6 : Lâminas escoadas características da bacia de SUMÉ(mm) 130
3.2.7 : Evolução dos escoamentos em função do solo e da cobertura vegetal da bacia de Sumé .. 131
3.3.1: Resultados dos testes de permeabilidade da bacia do Riacho do Navio Método de Muntz 136
3.3.2 : Principais formações geológicas, tipos de solo e de vegetação. Esquema das ligações entre subsolo, solo e vegetação da bacia do RIACHO DO NAVIO 136
3.3.3 : Características morfométricas das bacias de RIACHO DO NAVIO 140
3.3.4 : Série das lâminas precipitados e escoadas da bacia do RIACHO DO NAVIO 144
3.3.5 : Características das cheias da bacia de RIACHO DO NAVIO 146
3.3.6 : Lâminas escoadas características da bacia do RIACHO DO NAVIO 147
3.3.7 : Comparação entre as lâminas da bacia do RIACHO DO NAVIO, calculadas pelo modelo simplificado mensal e pelo modelo diário 150
3.4.1 : Resultados dos testes de infiltração na bacia de JUATAMA. Método de Muntz 159
3.4.2 : Principais formações geológicas, tipos de solo e vegetação da bacia de JUATAMA 159
3.4.3 : Características morfométricas da bacia de JUATAMA 160
3.4.4 : Pequenos açudes cadastrados na bacia de JUATAMA 161
3.4.5 : Série dos termos do balanço hidrológico da bacia de JUATAMA 162
3.4.6 : Características das cheias da bacia de JUATAMA 164
3.4.7 : Lâminas escoadas características da bacia de JUATAMA 165
3.5.1 : Resultados dos testes de infiltração da bacia de IBIPEBA Método de Muntz 170
3.5.2 : Principais formações geológicas, tipos de solo e vegetação da bacia de IBIPEBA 171
3.5.3 : Características morfométricas da bacia de IBIPEBA 172

3.5.4 : Série das precipitações e dos escoamentos na bacia de IBIPEBA 176
3.5.5 : Características das cheias da bacia de IBIPEBA 177
3.5.6 : Lâminas escoadas características da bacia de IBIPEBA 177
3.5.7 : Estimativa das perdas na rede hidrográfica da bacia de IBIPEBA 180
3.6.1 : Permeabilidade de diferentes solos do Nordeste segundo LEPRUN *et al.* (1983) 182

Capítulo 4 : Transposição dos escoamentos anuais

4.2.1 : Valores iniciais dos parâmetros das hipérboles do posto de Caldeirão 194
4.2.2 : Exemplo de resumo de ajustamento através do modelo SUDENE-ORSTOM 202
4.2.3 : Critérios de ajustamento dos modelos 207
4.2.4 : Validação dos modelos 208
4.2.5 : Principais parâmetros dos ajustamentos e siglas das bacias 210
4.3.2 : Distribuição dos pluviômetros por classe de qualidade global 215
4.3.3 : Relação e qualidade dos pluviômetros selecionados 215
4.3.4 : Zoneamento pluviométrico da zona Sertão 223
4.3.5 : Zoneamento pluviométrico da zona de Transição 229
4.3.6 : Lista dos pluviômetros selecionados 230
4.3.7 : Validação da seleção dos pluviômetros 231
4.4.1 : Comparação entre os coeficientes de redução propostos por VUILLAUME e NOUVELOT 234
4.4.2 : Coeficiente Ro para diferentes pluviômetros 236
4.4.3 : Coeficiente de redução R em função da chuva diária para uma bacia de 500 km^2 236
4.4.4 : Proporção do coeficiente de correção "r" a ser aplicado em função da superfície 236
4.4.5 : Conseqüência da redução das chuvas sobre o cálculo dos escoamentos anuais 238
4.5.1 : Valores de L_{600} e de A para as duas grandes zonas climáticas 240
4.5.2 : Regressões entre os "faciès" do regime hidrológico e o módulo (L(P)), para cinco grupos de bacias.Grande zona climática do Sertão 250
4.5.3 : Valores de X_{10} para diversas zonas e pluviometrias 254
4.5.4 : Parâmetros físicos e morfológicos das bacias estudadas 258
4.5.5 : Correlações entre parâmetros físicos e morfológicos e dos modelos 261
4.5.6 : Primeira tentativa de classificação das pequenas bacias do Nordeste brasileiro (segundo CADIER, 1984) 273
4.6.1 : Principais características das bacias selecionadas 279
4.6.2 : Extrato do arquivo MAPEDO.FLV 280
4.6.3 : Extrato do arquivo UNIMAP.FLV 281
4.6.4 : Número de UMP e de TS contidos no arquivo UNIMAP.FLV 282
4.6.5 : Características e valores de L_{600} dos subgrupos de solo 288
4.6.6 : Explicação dos escoamentos em função da chuva e do solo 295
4.6.7 : Fator de correção CV 301
4.6.8 : Fator de correção CA proposto 302
4.6.9 : Fator de correção CL 304
4.6.10 : Elementos do cálculo de L_{600} das diferentes sub-bacias 306
4.6.11 : Validação do método: comparação entre as lâminas calculadas e as observadas 309
4.6.12 : Coeficiente de correção U da fórmula de AGUIAR 312
4.6.13 : Comparação do cálculo do escoamento anual médio por diversas fórmulas 312

Capítulo 5 : Transposição das características das cheias

5.1 : Características das cheias das bacias hidrográficas representativas do Nordeste 324
5.2 : Valores do tempo de concentração, em minutos, de acordo com diversos tipos de morfologia da bacia 325
5.3 : Coeficientes K e C da fórmula de AGUIAR para o cálculo das cheias 331
5.4 : Validação da descarga da cheia de projeto das cinco bacias mais perigosas 342
5.5 : Comparação entre as descargas de cheias calculadas com as fórmulas de AGUIAR e da SUDENE/ORSTOM (em m^3/s) 343

Anexo 2 : Informações existentes a respeito das outras bacias representativas

A2.1 Características morfométricas e pluviométricas das bacias do GEVJ e dos projetos pilotos 402
A2.2 Bacia Representativa de BATATEIRAS 404
A2.3 Bacia Representativa de BATATEIRAS 404
A2.4 Bacia Representativa de MISSÃO VELHA 406
A2.5 Bacia Representativa de MISSAO VELHA 406
A2.6 Bacia Representativa de QUIXABINHA 408
A2.7 Bacia Representativa de QUIXABINHA 408
A2.8 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: BATATEIRAS em PONTE CARITE 413
A2.9 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de : MISSÃO VELHA 413
A2.10 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: AÇUDE JARDIM 414
A2.11 Lâminas precipitadas e escoadas na bacia de: QUIXABINHA 414
A2.12 Lâminas precipitadas e escoadas nas bacias dos projetos pilotos 414
A2.13 Características das cheias das bacias do GEVJ 415
A2.14 Lâminas escoadas características (mm) das bacias do GEVJ e dos projetos pilotos 415

Anexo 3 : Funcionamento do modelo SUDENE/ORSTOM com séries pluviométricas da África

A3.1 Resultados da utilização do modelo SUDENE/ORSTOM com 17 pluviômetros da rede sinóptica da África semi-árida 417
A3.2 Relação dos pluviômetros africanos utilizados 419

Publicações da Série:
Brasil.SUDENE.Hidrologia*

---

1 - VIEIRA, Humberto José Pires. Bacia Representativa de Escada; campanha 1975. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1976. 70 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 1) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

2 - VIEIRA, H.J.P. Bacia Representativa de Escada; campanha 76. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1977. 35p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 2) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

3 - PEREIRA, Francisco das Chagas. Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 1976/1977. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1978. 31p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 3) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

4 - NOUVELOT, Jean-François. ; FERREIRA, P.A.S. Bacia Representativa do Riacho do Navio; primeira estimativa dos recursos de água. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1977. 28p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 4) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

5 - NOUVELOT, J.F.; PEREIRA, F.C. Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1977. 28p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

6 - NOUVELOT,J.F. ; FERREIRA, P.A.S.; CADIER, E. Bacia Representativa do Riacho do Navio; relatório final. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1979. 193p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 6) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

7 - MAIA, Breno Valter Batista. Bacia Representativa de Escada; campanha 1977. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1979. 62p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 7). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

8 - ZELAQUETT, Gisnaldo José. Bacia Representativa de Ibipeba; relatório de campanha 1977/1978 e complementação do relatório de instalação. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1980. 99p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 8). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

9 - GALINDO, Carlos Alberto P. M. Bacia Representativa de Tauá; campanha 78/79. Recife, 1980. 75p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 9). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

10 - LINS, Maria José A. Bacia Representativa de Tauá; campanha 79/80. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1981. 60p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 10). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

11 - ZELAQUETT, Gisnaldo José. Bacia Representativa de Açu; relatório de instalação e campanha 1978/79/80. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1981. 85p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 11). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

12 - LINS, Maria José A. Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1982. 59p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 12). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

13 - ASSUNÇÃO, Moisés S. de Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 79/80. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1982. 59p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 13). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

14 - CADIER, E.; FREITAS, B.J. Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanha 73/80. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1983. 180p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

15 - LEPRUN, J.C.; ASSUNÇÃO, M.S.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1983. 70p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 15). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

16 - CADIER, E.; FREITAS, B.J.; LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1983. 87p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 16) "Convênio SUDENE/ORSTOM".

17 - ASSUNÇÃO, M.S. Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1980/81. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 71p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 17). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

18 - CARTER, R.E. ; DAVIDIAN, J. Relação cota-descarga em estações fluviométricas (Discharge Ratings at Gaging Stations). U.S. Geological Survey. Tradução de Sylvio Campello. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

19 - LINS, M.J.A. Bacia Representativa de Tauá. Relatório de Campanha 1980/82. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 81 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

20 - DALRYMPLE, T. Análise de freqüência de cheias (Flood - Frequency Analyses) - Tradução Gilberto Falcão. Supervisão Técnica; Sylvio Campello. Recife, SUDENE-DRN- HME, 1984. 87p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 20).

21 - CADIER, E. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 75p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

22 - ASSUNÇÃO, M.S. ; LEPRUN, J.C. ; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Açu, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 52p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 22). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

23 - PUNGS, J. P.; CADIER, E. Manual de utilização dos sistemas BAC e DHM - Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1985. 137 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 23).

24 - HERBAUD, J.J.M. ; MAGALHÃES, F.X. ; CADIER, E.; CAVALCANTE, N.M. da C. Bacia Representativa de Juatama. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1989. 153p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 24). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

25 - MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1989. 172p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".

26 - LARAQUE, Alain. Estudo e previsão da qualidade da água de açudes do Nordeste Semi-árido brasileiro. Recife, SUDENE.DPG-PRN-GT.HME, 1989. 91p.il. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 26). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

27 - HERBAUD, J.J.M. ; LINS, M.J.A. ; ASSUNÇÃO, M.S. ; CADIER, E. Bacia Hidrográfica Representativa de Ibipeba. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1989. 219p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 27). "Convênio SUDENE/ORSTOM).

28 - CAVALCANTE, N.M. ; Cadier, E. ; DOHERTY, F.R. Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1990. 326p. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 28). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

29 - MOLLE, F. Geometria dos pequenos açudes. Recife. SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1992. 126p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 29). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

30 - MOLLE, F. Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1992. 171p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 30).

---

* Essas publicações encontram-se à disposição dos usuários, para consulta, na Biblioteca da SUDENE.



Flamar Editora Indústria e Comércio Ltda.
Av. Visconde de Suassuna, 440
Santo Amaro - Recife - PE
Fone: (081) 222.2315 / Fax: (081) 221.1962

SDR - SUDENE

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO GLOBAL

PRN - HME

ISOIETAS MÉDIAS ANUAIS

DADOS HOMOGENEIZADOS

PERÍODO 1912 - 1983

ESCALA GRÁFICA

52 Km 0 52 104 156 Km

SÃO LUIS · Parnaíba · Acaraú · Granja · Mundaú · Itapipoca · FORTALEZA · Sobral · Pindaré-Mirim · Esperantina · Piripiri · Sta. Quitéria · Canindé · Ipueiras · Quixadá · Russas · Quixeramobim · Morada Nova · Independência · Messejana · Macau · Touros · TERESINA · Castelo do Piauí · Tauá · Sen. Pompeu · Apodi · Assu · Angicos · Caicó · Currais Novos · NATAL · Arneiroz · Iguatu · Jaguaribe · Icó · Paulo Ferros · Jardim do Seridó · Floriano · Picos · Campos Sales · Cajazeiras · Bananeiras · JOÃO PESSOA · S. Raimundo das Mangabeiras · Crato · Bonito de Sta. Fé · Patos · Teixeira · Barbalha · Princesa Isabel · Araripina · Simplício Mendes · Cabaceiras · Campina Grande · Itaiaçá · Limoeiro · RECIFE · Salgueiro · Sertânia · Arcoverde · Caruaru · Afrânio · Cabrobó · Floresta · Ibimirim · Petrolândia · Garanhuns · Palmares · Sta. Maria da Boa Vista · Bom Conselho · Pta. Calvo · B. Jesus · Petrolina · Palmeira dos Índios · Pilar · Piranhas · Arapiraca · Gilbués · Remanso · Uauá · Canindé do S. Francisco · Tripui · MACEIÓ · Parnaguá · N. S. da Glória · Propriá · Penedo · Barra · Xique Xique · Euclides da Cunha · Japaratuba · Lagarto · ARACAJU · Queimadas · Tucano · Irecê · Estância · Inhambupe · Barreiras · R. Barbosa · Ipirá · Feira de Santana · Macaúbas · Andaraí · Cruz das Almas · SALVADOR · Correntina · B. Jesus da Lapa · Jequié · Caetité · Brumado · Carinhanha · Vitória da Conquista · Itabuna · Belmonte · Porto Seguro · Salinas · Pirapora · Caravelas

SUDENE / ORSTOM

Edition

