UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE AS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DAS ROCHAS PRÉCAMBRIANAS NOS ESTADOS DA PARAÍBA E SÃO PAULO, BRASIL E GANA, ÁFRICA OCIDENTAL

George Asomaning

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1992

E R R A T A

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
i	04	sincere	sincera
"	06	sabio	sábio
"	10	Geológia	Geologia
"	10	Geofisica	Geofísica
"	19	Italia	Itália
"	22	Embaxaida	Embaixada
"	26	permtir	permitir
"	32	Universdade	Universidade
"	-6	contribuiram	contribuíram
"	-7	Coordindoria	Coordenadoria
"	-8	Ministerio	Ministério
"	-11	Loudres	Lourdes
ii	07	discontinuos	descontínuos
"	12	periodo	período
"	14	informaçôes	informações
"	14	tecnica	técnica
"	-3	analizadas	analisadas
"	-5	diferênças	diferências
"	-6	vazôes	vazões
iv	02	AREAS	ÁREAS
"	06	TECTóNICAMENTE	TECTÔNICAMENTE
"	07	TIPICO	TíPICO
"	07	INTEMêRICA	INTEMPéIRCA
"	08	TRóPICA	TROPICA
"	09	INTEMPRISMO	INTEMPERISMO
"	16	CONSEQUéNCIA	CONSEQüÊNCIA
"	19	FRAGIL	FRÁGIL
"	-6	HIDROGRÂFICA	HIDRGRÁFICAS
"	-5	POTÊNCIAL	POTENCIAL
"	-5	HIDROGRÁFIA	HIDROGRAFIA
v	02	PARAiBA	PARAíBA
"	10	GEOLOGICA	GELóGICA
"	12	ALTERÇÃO	ALTERAÇÃO
'	-4	INTEMPERICA	INTEMPéRICA
"	-8	INFLUéNCIA	INFLUÊNCIA
vi	03	FREQUéNCIA	FREQüéNCIA
"	05	ESPECiFICA	ESPECíFICA
"	05	TRANMISSIVDADE	TRANSMISSIVIDADE..
"	09	FREQUüéNCIA	FREQüÊNCIA
"	09	CAPACDDAE	CAPACIDADE
"	11	DIREÇôES	DIREÇõES
iv	16	ESQUEMATICA	ESQUEMÁTICA
"	20	LOACAÇÃO	LOCAÇÃO
"	-8	FOTOGEOLOGICA	FOTOGEOLÔGICA
"	-7	SENSORIAMENMTO	SENSORIAMENTO

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
vii	1	PARÂMETRO	PARÂMETROS
"	2	PARAIBA	PARAíBA
"	5	PRARMETROS	PARÂMETROS
"	5	DOSPOÇOS	DOS POÇOS
"	17	NIVEL	NIVEIS
"	22	PARAíBA,SÃO	PARAíBA SÃO
"	-2	SUBTERRANEA	SUBTERRÂNEA
"	-4	IONS	íONS
"	-10	SIGNIFICANCIA	SIGNIFICÂNCIA
ix	22	AFRICA	ÁFRICA
x	13	HIDROGEOLóGOCOS	HIDROGEOLóGICOS
"	22	Paramétricas	paramêtricas
"	-3	Intrdução	Introdução
ix	4	ADMINSTRAÇÃO	ADMINISTRAÇÃO

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
1	13	disponibildades	disponibilidades
"	18	déficites	déficit
"	21	beneficios	benefícios
"	28	desponibilidades	disponibilidades
"	30	desponibilidade	disponibilidade
"	32	contínuamente	continuamente
2	5	Marfim	Marfim
"	11	paises	países
"	12	agricola	agrícola
"	14	freqüêntemente	freqüentemente
"	20	subterranea	subterrânea
"	-3	compreedendo	compreendendo
3	10	respectivamnte	respectivamente
"	16	ombasamento	embasamento
5	7	incluíndo	incluindo
6	5	rejuvenecidas	rejuvenescidas
6	-2	periódo	período
"	-8	sumarizados	resumidos
"	-9	tectónicas	tectônicas
8	20	rejuvenecimento	rejuvenescimento
"	26	tectónico	tectônico
"	-4	litólogia	litologia
"	-6	gnaíssicas	gnáissicas
"	-9	granítos	granitos
9	3	granulítos	granulitos
"	15	sequência	seqüência
"	22	sequências	seqüências
"	26	Paraiba	Paraíba
10	5	PRÊCAMBRIANO	PRÊ-CAMBRIANO
"	13	precipitaçôes	precipitações
"	21	Comumente	Comummente
"	23	interconecção	interconexão
"	-3	idea	idéia
"	-8	superficie	superfície
11	25	eustatico	eustático
"	26	ao	Ao
"	26	penetraçãodas	penetração das
"	27	niveis	níveis
"	-5	pluviometrica	pluviométrica
"	-9	niveis	níveis
13	9	paretal	parental
14	11	indefinidas	indefinidos
"	-6	mecânicamente	mecanicamente
"	-8	resultamte	resultante
17	7	ma	má
"	8	imtempérica	intempérica
"	12	particularmente	particlaramente
"	16	sanduiche	sanduíche
"	20	incluíndo	incluindo
"	20	porêm	porém

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
17	-3	hidraúlica	hidráulica
"	-4	sôbre	sobre
18	11	conseqência	conseqüência
"	-1	Consquêntemente	Conseqüentemente
"	-2	liticos	líticos
"	-3	extendendo	estendendo
"	-4	tectónicas	tectônicas
"	-4	cratónicas	cratônicas
19	4	atúam	atúa
"	5	esfoços	esforços
"	14	curvilear	curvilinea
"	-1	límite	limite
21	13	téorico	teórico
21	13	téorico	teórico
"	17	consequentemente	conseqüentemente
"	17	tensôes	tensões
24	2	subsdiária	subsidiária
"	15	quilometros	quilômetros
"	22	típicamente	tipicamente
"	-3	expectro	espectro
	-3	comprendendo	compreendendo
"	-9	angulo	ângulo
26	9	*porosidadade*	*porosidade*
"	10	fréatico	freático
"	14	multipla	mútipla
"	16	pertecem	pertencem
"	21	Comumente	Comummente
"	20	drenágem	drenagem
"	24	As	Os
"	-2	hidrológicament	hidrologicamente
"	-2	condiçôes	condições
"	-4	efémeros	efêmeros
"	-5	descontinuos	descontínuos
"	-6	quilometros	quilômetros
"	-7	dimensôes	dimensões
29	9	possivel	possível
"	18	posssibilidades	possibilidades
31	8	unica	única
33	2	estapas	etapas
"	3	comforme	conforme
"	16	coluvios	coluviões
"	19	consequências	conseqüências
"	-5	suscetiveis	suscetíveis
34	1	consequência	conseqüência
"	6	filtraçao	filtração

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
34	9	potêncial	potencial
"	14	ümido	úmido
"	-3	Américan	Americana
"	-4	intemperíca	intempérica
"	10	Australia	Austrália
36	9	subtrranea	subterrânea
"	12	fisico	físico
"	12	tecnica	técnica
"	15	hidríco	hídrico
39	7	aqüiféros	aqüíferos
"	20	constituidas	constituídas
43	1	frequentemente	freqüentemente
"	6	otima	ótima
"	-1	Atlantico	Atlântico
	-7	propocionar	proporcionar
44	1	extende-se	estende-se
"	20	maxima	máxima
"	-6	qais	quais
"	-9	Áfica	África
49	2	constiuido	constituído
50	5	trés	três
"	5	dominios	domínios
"	5	climaticas	climáticas
"	6	Paraiba	Paraíba
"	7	pluviometrica	pluviomética
"	11	topograficas	topográficas
"	13	meno	menos
"	14	pluviometrico	pluviométrico
"	17	mese	mêses
"	21	geografica	geográfica
"	22	úmidade	umidade
"	-1	Paraiba	Paraíba
"	-1	demias	demais
"	-1	In	Em
52	11	exedente	excedente
"	15	distribuidos	distribuído
"	-2	serrotões	serrotes
"	-7	escacez	escassez
54	16	hidrogafia	hidrografia
"	20	extendem	estendem
"	-1	superficie	superfície
"	-4	escolamento	escalonamento
"	-7	depositos	depósitos
56	7	hidrográficamente	hidrograficamente
"	9	aflêntes	afluentes
"	17	geolócio	geológico
"	18	estiágem	estiagem
"	-4	més	mês
58	9	drásticamente	drasticamente
"	17	úmidade	umidade

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
58	-5	Basalticas	Bassálticas
"	-6	Atlantico	Atlântico
59	18	Paranapanenma	Paranapanema
"	23	Hidrico	Hídrico
"	-6	hidríco	hídrico
"	-6	evaperação	evaporação
"	-6	rael	real
"	-7	tipicas	típicas
61	8	armzenamento	armazenamento
"	-2	preciptaão	precipitação
63	2	raremente	raramente
"	24	periodo	período
"	25	aréas	áreas
"	-9	constituidos	constituídos
65	1	extendendo	estendendo
"	6	quarztito	quartzito
"	7	metasedeimentos	metassedimentos
"	7	extende-se	estende-se
"	8	enrtando	entrando
"	25	páis	país
67	5	provisóriamente	provisoriamente
"	17	sequência	seqüência
"	19	frequênte	frequente
"	21	migmátitos	migmatitos
"	-6	metamórfismo	metamorfismo
"	-7	Paraiba	Paraíba
69	10	reunem	reúnem
"	12	calcários	calcarios
"	15	constituíndo	constituindo
"	20	porforóides	porfiroides
72	2	gnaíssico	gnáissico
"	7	gnaissico	gnáissico
"	11	diorítos	dioritos
"	11	incluíndo	incluindo
"	11	gnaíssico	gnássico
"	23	muscovita	moscovita
"	-1	subsequência	subseqüência
"	-2	Gnaíssica	Gnáissica
73	4	Litológicamente	Litologicamente
"	5	gnaíssicas	gnáissicas
"	6	litológias	litologias
"	7	intercalaçôes	intercalações
"	8	marmores	mármores
"	9	basálticas	bassálticas
"	16	dominio	domínio
"	-1	sequência	seqüência
74	18	embasmento	embasamento
"	18	afloran	afloram
"	20	facies	fácies
"	23	"	"

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
58	21	mmm	mm
"	-4	constituidas	constituídas
77	1	granito	granito
"	7	Eburean	Ebureano
"	11	hipoabissais	hipabissais
"	12	espesssura	espessura
"	13	constitue	constituem
78	8	basalticos	bassalticos
76	5	descordância	discordância
"	15	metamorfisado	metamorfizado
"	21	diaclases	diáclases

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
79	7	superficie	superfície
"	14	conditivdade	condutividade
"	22	dirétório	diretório
"	-7	comumente	comummente
80	3	desvío	desvio
"	5	sistemáticamente	sistematicamente
"	14	variânça	variançia
"	18	HIDROGEOLóGOCOS	HIDROIGEOLóGICOS
"	-8	período	periódo
81	15	corespondente	correspondente
"	18	interpretaçôes	interpretações
"	23	geneticos	genéticos
"	-2	caracteristicas	características
84	1	importáncia	importância
"	2	aluviôes	aluviões
"	4	minimo	mínimo
"	6	minimas	mínimas
"	14	jorante	jorrante
"	16	variaçôes	varições
"	21	heterogeneo	hetergêneo
"	21	anisotropico	anisotrópico
"	-6	condiçôes	condições
85	7	associaçôes	associações
"	14	PARAMTROS	PARÂMETROS
"	16	análse,os	análise, os
"	16	qais	quais
"	20	Bernado	Bernardo
"	24	extraidas	extraídas
"	-5	aquíferos	aqüíferos
"	-1	parâmêtro	parâmetro
87	1	levenadas	levantadas
"	4	litlógia	litologia
"	16	piezometrico	piezométrico
"	-3	Ghana	Gana
88	6	diametro	diâmetro
"	6	nivel	nível
"	9	abrangendo	abrangendo
"	10	Ghana	Gana
"	12	diametro	diâmetro
	21	codigo	código
90	9	variaçáo	variação
91	1	CARTACTERISTICAS	CARACTERíSTICAS
"	5	cracterísticas	características
"	8	Paraiba	Paraíba
"	9	carcterísticas	características
96	-7	variança	variância

Pg	Li	Onde lê	Leia-se
101	5	condiçóes	condicões
101	8	atribuido	atribuído
"	10	atribuida	atrbuída
102	3	aquífero	aqüífero
102	8	aquífero	aqüífero
102	14	aplicaveis	aplicáveis
102	14	àrea	área
102	10	Figs.6.7b,e,d	Figs6.7b,d
102	11	Fig 6.7a,e	Figs 6.7a,c
102	13	Fig.6.7 c	Fig.6.7 e
102	15	condiçôes	condições
107	-1	tranversais	transversais
107	-4	imperméaveis	impermeáveis
107	-4	perméaveis	permeáveis
109	1	órdem	ordem
109	7	fendilhamento	fendalhamento
109	7	feiçôes	feições
109	19	armazamento	armazenamento
109	-8	fraturda	fraturada
109	11	informaçôes	informações
112	16	piezometro	piezômetro.
112	18	piezometro	piezômetro.
112	19	contibui	contribui
112	20	piezometro	piezômetro.
112	21	hidraúlica	hidráulica
112	-3	minimo	mínimo
113	2	transmissivdade	transmissividade
113	16	anisotropico	anisotrópico
113	17	variavel	variavel
117	13	menoes	menos
117	15	freqúência	freqüência
117	23	a´água	d´água
177	23	producem	produzem
120	4	vazôes	vazões
120	16	porcento	por cento

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
120	20	cisalhamento	cisalhamento
121	2	fisica	física
"	2	posiçôes	posições
"	3	topografica	topográfica
121	8	nivel	nível
"	12	caracteristicas	características
"	-8	freqúência	freqüência
"	-8	ocorréncia	ocorrência
125	2	consequência	conseqüência
"	10	condiçôes	condições
"	13	precipitaçòes	precipitações
"	18	suavizade	suavidade
"	20	divisóres	divisores
"	22	desaguam	deságuam
"	-6	disturbios	distúrbios
"	23	topográfia	topografia
"	24	constituidas	constituídas
"	24	perfís	perfis
126	6	categoría	categoria
"	12	tectónicas	tectônicas
"	14	desenvolviumento	desenvolvimento
"	18	racarga	recarga
"	23	colúvios	coluviões
"	-1	consequentemente	conseqüentemente
"	-3	platafomas	plataformas
"	-8	aparacimento	apareicemnto
"	-9	acrescimento	acrescimento
129	1	PADRÔES	PADRÕES
"	1	HIDROQUIMICA	HIDROQUíMICA
	3	extraidos	extraídos
"	16	Ccomparativo	Comparativo
"	17	minímo	mínimo
"	26	solido	sólido
131	-2	coeficiênte	coeficiente
134	5	constituínte	constituinte
135	7	possuíndo	possuindo
"	18	destribuição	distribuição
"	20	distribuidas	distribuídas
"	22	comumente	commummente
"	-1	desvío	desvio
"	-4	médiana	mediana
"	-7	não-paramétrico	não-paramêtrico
136	6	logarítmico	logarítimico
"	7	não-paramétrica	não-paramêtrica
"	10	interquantil	interquartil
"	10	percentil	porcentil
"	17	assimétria	assimetria
"	18	ditribuição	distribuição
"	-4	maioría	maioria
139	10	ions	íons

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
141	9	susceptiveis	suscetiveis
"	15	hidrogeologos	hidrogeólogos
141	18	Ghana	Gana
141	-2	examplo	exemplo
121	8	estatica	estática
141	-3	apoidaos	apoiados
121	12	caracteriticas	características
145	13	Sào	São
145	24	superficies	superfícies
145	25	geologicos	geológicos
145	25	favoraveis	favoráveis
145	-5	antropicos	antrópicos
146	12	Concluiram	Concluíram
146	25	geofisicos	geofísicos
146	-5	maisproxima	mais proxima
146	-7	geofisica	geofísica
146	-9	insatisfatorio	insatisfatório
147	5	Subterranea	Subterrânea
147	7	nivel	nível
147	20	aspesso	espesso
147	-9	percausão	percussão
148	6	pulverisa	pulveriza
148	7	aquíferos	aqüíferos
148	13	bombeanento	bombeamento
148	-1	frequentemente	freqüentemente
148	-8	frizer	friser
148	-8	criterio	critério
152	6	gnaissos	gnáissos
152	9	caulinitica	caulinítica
152	15	preenchar	preencher
152	25	util	útil

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
153	7	pouplação	população
"	9	contractual	contratual
"	7	intergral	integral
"	9	perfurção	perfuração
"	-3	hidrogeologo	hidrogeológo
"	-6	adequedamente	adequadamente
154	5	Oriete	Oriente
"	7	maquiária	maquinaria
"	12	varios	vários
"	13	paises	países
"	-9	insuficiénte	insuficiênte
155	5	economica	econômica
"	5	particularmente	particularamente
"	13	problelmas	problemas
"	17	aspéctos	aspectos
"	-4	distribuida	distribuída
"	-6	periodo	período
"	-8	reveses	reverses
156	7	consequências	conseqüências
"	12	SUBTERRANEAS	SUBTERRÂNEAS
"	21	construidos	construídos
"	12	Brasilia	Brasília
"	-4	amazonos	amazonas
157	8	indústriais	industriais
"	13	agricola	agrícola
"	14	Aguas	Águas
"	14	Energía	Energia
"	14	Eletrica	Elétrica
"	17	diretrirzes	diretrizes
"	21	hidaulica	hidráulica
"	23	Aquíferos	Aqüíferos
"	-4	contitue-se	constitue-se
158	10	municipio	município
"	10	Sâo	São
"	-3	secundáriamente	secundariamente
"	-4	calcicas	cálcicas
"	-4	maioría	maioria
159	9	tubulars	tubulares
"	12	ministerio	ministério
"	15	atavés	através
"	20	comumente	comummente
"	22	epoca	época
160	8	importancia	importância
"	16	estatisticas	estatíticas
"	17	rassaltar	ressaltar
"	20	possuirem	possuírem
"	21	fluorito	fluoreto
161	17	escasez	escassez
"	17	eminemente	eminente
"	21	comeca	começa

Pg	Li	Onde se lê	Leia-se
162	-3	hidricos	hídricos
"	12	pouplação	população
162	17	necessario	necessário
"	19	tubulare	tubular"
"	25	necessario	necessário
163	1	razoaveis	razoáveis
164	8	cobrturas	coberturas
"	9	Sao	São
"	10	subterranea	subterrânea
"	13	prfundidades	profundidade
"	-2	hidraulica	hidráulica
165	3	frequéncia	freqüência
"	13	subterranea	subterrânea
"	18	tecnológias	tecnologias
"	21	hidrico	hídrico
"	21	subterráneo	subterrâneo
"	-2	metológicos	metodológicos
"	-4	caracter	carácter
166	4	hidrogeologico	hidrogeológico
"	4	basico	básico
"	6	subterranea	subterrânea
"	7	Paraiba	Paraíba
167	13	Gúia	Guia
168	19	geolgia	geologia
169	11	Geologica	Geológica
170	2	Subterraneas	Subterrâneas
"	3	hidrogeologico	hidrogeológico
"	11	geofisica	geofísica
"	12	Subtrranea	Subterrânea
"	13	SUBTERRANEA	SUBTERRÂNEA
171	11	prcatices	practices
"	17	Geoelógi	Geologia
173	1	diversas	Diversas
"	9	Sintese	Síntese
"	15	critalinas	cristalinos
174	1	hidrogeológicos	hidrogeológico
174	1	dos	das
"	10	geotectónica	geotectônica
"	-3	geochronológico	geochronolôgico
"	-7	Municipio	Município
"	9	tecnicas	técnicas
176	3	EXPLORATIUON	EXPLORATION
"	17	interpretaçÃo	interpretação
"	21	sequência	seqüência
"	-4	geofisica	geofísica
177	1	Hidrogeologicos	Hidrogeológicos
177	1	Paraíbano	Paraibano
"	9	characterist	characteristic
162	2	compcts	compacts
"	10	relacinada	relcionada

DEDICATED to honour and memories of my late father, Nana Frempong Manso II alias Charles Kwadwo Asomaning (1905-1948), the late Omanhene of Akim Kotoku State and my late grand-uncle Nana Kwame Akwaboah (1889-1973), the late Akwamuhene of Akim Kotokuom.

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 1721-2.2
U. S. P.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC
30900012408

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE AS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DAS ROCHAS PRÉCAMBRIANAS NOS ESTADOS DA PARAÍBA E SÃO PAULO, BRASIL E GANA, ÁFRICA OCIDENTAL

George Asomaning

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. A.C.Rebouças	
Examinadores:	Dr. O.Sinelli	
	Dr. A.B.Silva	
	Dr. A.M.Guerra	
	Dr. B.B.B.Neves	

SÃO PAULO
1991

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 1721-1.2
U. S. P.

AGRADECIMENTO

A realização do presente trabalho teve a colaboração imprescindível de varias pessoas e entidades às quais o autor gostaria de expressar sua sincere gratidão.

A Deus para todos o sempre, porque dele é a sabedoria e a força. Ele muda tempos e as horas. .. Ele dá sabedoria aos sabios e ciência aos entendidos. Ele revela o profundo e o escondido. Conhece o que está em trevas, e com Ele mora a luz. *Dan 2:20-22.*

Ao Professor Aldo da Cunha Rebouças, Chefe, Departamento de Geológia Economica e Geofisica Aplicada, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências (USP-IG) pela oportunidade oferecida, pela orientação, pela leitura e correção do texto.

Ao Vice-Chancellor da " University of Science and Technology" (UST), Kumasi, Gana, por ter permitido meu afastamento para cursar a Pós-Graduaçao.

Ao Professor F.K.A.Allotey da UST Kumasi, Gana pela sua ajuda e constante incentivo.

Ao Professor Mohamed H.A. Hassan da Academia de Ciências por Terceiro Mundo (Third World Academy of Sciences- TWAS), Trieste, Italia pelo apoio de passagem Gana-Brasil.

Ao Senhor Francisco Chagas Catunda Resende, Chargé d'Affaires da Embaxaide do Brasil em Gana pela informação no decorrer do cursos de Pós-Graduação e sobre a vida no Brasil.

Ao Centro de Pesquisas de Aguas Subterrânea (CEPAS) do Departamento de Geológia Economica e Geofisica Aplicada, USP-IG na pessoa de seu Vice-Director Professor Nelson Ellert por permtir a utilização da infra-estrutura do centro.

Aos professores do Departamento de Geológia Economica e Geofisica Aplicada (USP-IG) pelo ensino de aulas.

Em particular, ao Professor Alberto Pacheco pela disposição para discussão e leitura do texto.

Ao Professor J. do P.T. Albuquerque da Universdade Federal da Paraiba, Campina Grande pelos dados e ajuda oferecidos.

Aos amigos Beltrão e Mistreta pelo auxilio na fase de tradução do texto.

Aos Pessoal da USP-IG e CEPAS ; Walter C. Leite, Loudres, Antonio, Ismael e Gildo que sempre foram de um presteza inestimável durante o curso e no decorrer de todo o trabalho desenvolvido.

Aos Itacy Kroehne e Rodrigo J. Vascòne pelos seus desenhos.

Aos diversos orgãos e entidades, como Comissão de Cooperação Internacional (CCInt), Ministerio da Relação Exterior (MRE), Coordinaçào de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Coordinadoria de Assistência (COSEAS) que contribuiram através de infra-estrutura e financiamento para o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuiram para a realização deste trabalho.

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 1721-e 2
U. S. P.

RESUMO

Foi realizado um estudo comparativo do comportamento e qualidade dos aqüíferos do Embasamento Cristalino Précambriano nos Estados de Paraíba e São Paulo, Brasil e na Republica de Gana, África Ocidental. O sistema aqüífero cristalino, abrangendo as rochas ígneas e metamórficas ocorre em 97%, 23% e 54% das áreas dos estados da Paraíba, São Paulo e Gana respectivamente. Caracterizam-se como aqüíferos discontinuos, com ocorrência de água em zonas de rochas fraturadas e contatos litológicos, além de horizontes de rochas alteradas. Fornecem vazões moderadas, de ordem de 1 a 30 m^3/h por poço em média. A compilação de dados de quase 2.000 poços tubulares perfurados para abastecimento de comunidades de pequeno porte, no periodo 1963-1985, permitiu o estudo comparativo das características e dos parâmetros destes aqüíferos. Os resultados obtidos abrangem uma gama de informações tecnicas, tais como: profundidade, nível estático, vazão, faixa de entrada d'água, espessura da zona de alteração intempérica, espessura de zona saturada e dados de qualidade fisico-química. A análise estatística mostrou que, em todas as áreas, os poços localizados nos vales e vertentes produzem três vezes mais do que aqueles localizados nas colinas e cumes. A vazão média de exploração obtida nos poços na Paraíba é de 2,16 m^3/h e provem dos meios fissurados e fraturados, sendo que 93% das fraturas produtoras são interceptadas até profundidade de 40 metros. As águas dos poços em Gana provem, na maioria dos casos, dos contatos entre zonas das rochas alteradas e rochas sãs. As médias de profundidades e vazões são de 42.5 metros e 4.52 m^3/h respectivamente. Os poços em São Paulo são mais profundos, alcançando até 150 metros na média. As águas exploradas provem dos meios fraturados e alterados. A vazão media é de 15,70 m^3/h mas as vazões variam entre 0.15 e 50 m^3/h e excepcionalmente atinge-se 150 m^3/h. Existem diferênças marcantes entre as características fisico-químicas das águas da Paraíba, de um lado, e as de São Paulo e Gana, de outro. A media de sólidos totais dissolvidos (STD) nas águas da Paraíba é de 4.000mg/l. Apenas 20% das águas analizadas da Paraíba mostram STD menor que 1.000 mg/l e 5% menor que 500 mg/l, enquanto em São Paulo e Gana, mais de 90% das águas têm STD menor que 500 mg/l.

ABSTRACT

Evidences of similarities and differences between Brazil and Africa, especially with respect to the behaviour and water quality of aquifers of the Precambrian Crystalline Basement of the States of Paraíba and São Paulo in Brazil and the Republic of Ghana in West Africa were investigated. The system of crystalline rock aquifers of igneous and metamorphic rocks occurs over 97%, 23%, and 54% of the areas of Paraíba, São Paulo and Ghana respectively. They are discontinuous in character with the occurrence of water in fractured rock zones, lithological contacts and horizons of weathered rock masses.Average well yields in them are moderate; of the order of 1 to 30 m^3/h. Data on about two thousand wells for water supply to small communities, drilled during the period of 1963-1985, in the crystalline basement rocks of these areas were used for the study and comparison of the characteristics and parameters of these aquifers. The result obtained consists of a wide range of technical informations including well depth, static water level, well yield, depth of entry of water into wells, thickness of weathered and saturated zones. In all the study areas wells located in valleys and on slopes yielded three times more than those located on top of hills. The average yield of wells in Paraíba is 2,16 m^3/h and come mainly from fissured and fractured zones, with 93% of these water bearing zones being intercepted at depth of 40 meters. Water in wells of Ghana are tapped in most cases from the contacts between the weathered mantle and the fresh rock. The average well depth and yield here are 42.50 metres and 4.25 m^3/h respectively. The wells of São Paulo are deeper and reach about 150 meters on the average. Water is produced from both the weathered zone and the fractured medium of rocks. Average yield is 15.70 m^3/h or more. There are marked differences in the physico-chemical characteristics of the groundwater in Paraíba, on one side and those of São Paulo and Ghana on the other. The average total dissolved solids (TDS) in Paraíba water is 4000 mg/l; only 20% of the water analysed in Paraíba has TDS less than 1000 mg/l and 5% less than 500mg/l, while in São Paulo and Ghana, more than 90% of th waters have TDS less than 500 mg/l

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - LOCALIZAÇÃO DAS AREAS ESTUDADAS 4

FIGURA 2.1 - SUMÁRIO DAS PRINCIPAIS LIGAÇÕES GEOLÓGICAS ENTRE BRASIL E ÁFRICA 7

FIGURA 2.2 - CLIMA E PROFUNDIDADE DO INTEMPERISMO DAS ROCHAS NAS ÁREAS TECTÓNICAMENTE INATIVO 12

FIGURA 2.3 - PERFIL TIPICO DE ALTERAÇÃO INTEMPÊRICA DESENVOLVIDO SOBRE ROCHAS DO EMBASAMENTO CRISTALINO NOS TRÓPICOS 15

FIGURA 2.4 - PRINCIPAIS SUBDIVISÕES DO PERFIL DO INTEMPRISMO SOBRE ROCHAS DO COMPLEXO DO EMBASAMENTO NOS TRÓPICOS 16

FIGURA 2.5 - COMPORTAMENTO TENSÃO vsDEFORMAÇÃO DAS ROCHAS 20

FIGURA 2.6 - DEFORMAÇÃO DA ROCHA SOB TENSÃO PURA 22

FIGURA 2.7 - DEFORMAÇÃO CISALHANTE SIMPLES ASSOCIADA A ZONA DE FALHA TRANSCORRENTE 23

FIGURA 2.8 - FALHAS DE SEGUNDA ORDEM E SUBSIDIÁRIAS FORMADAS COMO CONSEQUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO DA TENSÃO PRIMÁRIA AO LONGO DA FALHA DE 1º ORDEM 25

FIGURA 2.9 - MODELO DE FRATURAMENTO DA ROCHA PELA DEFORMAÇÃO FRAGIL 27

FIGURA 2.10 - FRATURAMENTO TIPICO EM RELAÇÃO AOS RIACHOS FENDAS NAS DRENAGENS DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA PARAÍBA, BRASIL 28

FIGURA 2.11 - ESQUEMA GLOBAL DAS SUPERFÍCIES DE EROSÃO; EROSÃO; BRASIL E ÁFRICA 30

FIGURA 2.12 - PROCESSOS DE PEDIPLNAÇÃO E ETCHPLANAÇÃO 32

FIGURA 2.13 - POSIÇÃO DOS CONTINENTES NO JURÁSSICO MÉDIO 35

FIGURA 2.14 - POSIÇÃO DOS CONTINENTES DURANTE O EOCENO MÉDIO 35

FIGURA 2.15 - PLUVIOMETRIA MÉDIA ANUAL NO BRASIL E BACIAS HIDROGRÂFICAS 37

FIGURA 2.16 - POTÊNCIAL D'ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL 40

FIGURA 2.17 - PRINCIPAIS PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO BRASIL 42

FIGURA 2.18 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ÁFRICA 45

FIGURA 2.19 - VARIAÇÃO ANUAL DA PRECIPITAÇÃO NA ÁFRICA 46

FIGURA 2.20 - PLUVIOMÉTRIA MÉDIA ANUAL DA ÁFRICA 47

FIGURA 2.21 - PRINCIPAIS PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DA ÁFRICA 48

FIGURA 3.1 - PLUVIOMETRIA MÉDIA NA PARAIBA 51

FIGURA 3.2 - BALANÇO HÍDRICO PARA PARAIBA 53

FIGURA 3.3 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA PARAIBA E RIO GRANDE DO NORTE 55

FIGURA 3.4 - MAPA ISOIETAS DO ESTADO DE SÃO PAULO 57

FIGURA 3.5 - MAPA ISOIETAS DA GANA 62

FIGURA 3.6 - MAPA DOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS DE GANA 64

FIGURA 4.1 - ESBOÇO DA DISTRIBUIÇÃO DAS LITOESTRTIGRÁFICA NO ESTADO DE SÃO PAULO 71

FIGURA 4.2 - MAPA GEOLOGICA DA GANA 75

FIGURA 6.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS FREQÜÊNCIAS DAS ESPESSURASDO MANTO DE ALTERÇÃO E ZONA SATURADA DO MANTO - ESTADO DE SÃO PAULO 92

FIGURA 6.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS FREQÜÊNCIAS DAS ESPESSURAS DO MANTO DE ALTERAÇÃO E ZONA SATURADA DO MANTO - GANA 93

FIGURA 6.3 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA DA ESPESSURA DE ALTERAÇÃO (CAPEAMENTO) -ESTADO DA PARAÍBA 94

FIGURA 6.4 - CONCEITO DO "CONDIÇÃO LIMITE" DE PROFUNDIDADE DA ZONA ALTERADA PARA FORMAÇÃO DE ZONA SATURADA NO MANTO DO INTEMPERISMO 99

FIGURA 6.5 - RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA ALTERAÇÃO INTEMPERICA, ESPESSURA DA ZONA SATURADA E VAZÃO - SÃO PAULO 100

FIGURA 6.6 - RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA ALTERAÇÃO INTEMPERICA, ESPESSURA DA ZONA SATURADA E VAZÃO - GANA 101

FIGURA 6.7 - MODELO DOS DIVERSOS SISTEMAS AQÜÍFEROS NO COMPLEXO DO EMBASAMENTO 103

FIGURA 6.8 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO MANTO DE ALTERAÇÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS-SÃO PAULO 104

FIGURA 6.9 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO MANTO DE ALTERAÇÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS - GANA 105

FIGURA 6.10 - RELAÇÃO ENTRE A ZONA DE ALTERAÇÃO E AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS - ESTADO DA PARAÍBA 106

FIGURA 6.11 - POSIÇÃO DE NÍVEL ESTÁTICA NOS MEIOS AQÜÍFEROS NO COMPLEXO DO EMBASAMENTO 108

FIGURA 6.12 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE ENTRADAS D'ÁGUA - SÃO PAULO 110

FIGURA 6.13 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÉNCIA DA PROFUNDIDADE DE ENTRADA D'ÁGUA - PARAÍBA 111

FIGURA 6.14 - RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE ESPECiFICA E TRANMISSIVIDADE - SÃO PAULO 114

FIGURA 6.15 - MODELO CONCEITUAL DO SISTEMA DE FLUXO D'AGUA SUBTERRANEA NO EMBASAMENTO GEOLÓGICO 115

FIGURA 6.16 - DIAGRAMA DE FREQÜÉNCIA DOS VALORES MÉDIOS DA CAPACIDAE ESPECÍFICAS DOS POÇOS TUBULARES CALCULADOS SEGUNDO AS DIREÇÕES DOS LINEAMENTOS DE FRATURAS 116

FIGURA 6.17 - RELAÇÃO DE FREQÜÊNCIA DOS TIPOS DE FRATURASPOR FAIXAS DE CAPACIDADE ESPECÍFICAS - PARAÍBA 119

FIGURA 6.18 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA CUMULATIVA DE VAZÕES SEGUNDA POSIÇÃO MORFOLÓGICA DOS POÇOS 123

FIGURA 6.19 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA FIGURA "BOX-PLOT" DA ÍNDICE DOS CATIONS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS 132

FIGURA 6.20 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA "BOX-PLOT" DA ÍNDICE DOS ANIONS E STD NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS 133

FIGURA 7.1 - MAPA TOPOGRÁFICA DA UMA ÁREA SOB PESQUISAS PARA LOACAÇÃO DOS POÇOS EM GANA 142

FIGURA 7.2 - INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLOGICA DA IN FIG.7.1 143

FIGURA 7.3 - LOCAÇÕES DOS POÇOS A PARTIR DOS ESTUDOS SENSORIAMENMTO REMOTO 144

FIGURA 7.4 - ESBOÇO DO DESENHO DO POÇO TIPICO NA PARAÍBA 149

FIGURA 7.5 - ESBOÇO DO DESENHO DO POÇO TIPICO NO ESTADO DE SÃO PAULO 150

FIGURA 7.6 - ESBOÇO DO POÇO CAPTANDO ÁGUA DA "ZONA CORRENTE" OU "FLOWING ARENA"- GANA 151

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1- VALORES MÉDIOS RERESENTATIVOS DOS PARÂMETRO DOS POÇOS NO ESTADO DA PARAÍBA 82

TABELA 5.2- DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS SEGUNDO TIPO LITOLÓGICO NO ESTADO DA PARAÍBA 83

TABELA 5.3- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PRARMETROS DOSPOÇOS NO ESTADO DE SÃO PAULO 86

TABELA 5.4- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PARAMETROS DOS POÇOS EM GANA 89

TABELA 6.1- MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA ZONA ALTERADA TOTAL E SATURADA NAS ÁREAS ESTUDADAS 95

TABELA 6.2- ANÁLISE DE REGRESSÃO E CORRELAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE INTEMPERISMO E SUA ESPESSURA SATURADA NAS ÁREAS ESTUDADAS 97

TABELA 6.3- VALORES DE CAPACIDADE ESPECÍFICA POR TIPO DE FRATURA (PARAÍBA) 118

TABELA 6.4- VALORES GLOBAIS MÉDIOS E MEDIANAS DAS CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS DE ACORDO COM NÍVEL TOPOGRÁFICOS 122

TABELA 6.5- SUMÁRIO DE ESTATÍSTICAS DOS NÍVEIS ESTÁTICOS, REGOLITO E REGOLITO SATURADO DE ACORDO COM GRUPO TOPOGRÁFICO NAS ÁREAS DE ESTUDO 124

TABELA 6.6- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS CONCENTRAÇÕES DO SOLUTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PARAÍBA,SÃO PAULO E GANA 130

TABELA 6.7- NÍVEIS DE SIGNIFICANCIA ATINGIDOS, p-PROBABILIDADE QUE O AFASTAMENTO DE UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL SÃO DEVIDOS À ALEATORIEDADE MAIS QUE À UMA DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS 137

TABELA 6.8- COMPARAÇÃO DOS ELEMENTOS MAIORES NAS ÁGUAS ENTRE AS ÁREAS ESTUDADAS 138

TABELA 6.9- CORRELAÇÃO DE REGRESSÃO ENTRE OS IONS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS 140

TAELA 7.1- VOLUME DE ÁGUA SUBTERRANEA CONSUMIDOS NA ÁREA METROPOLITANA DE SÃO PAULO 158

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - DESCARGA DOS RIOS DO BRASIL 38

QUADRO 2.2 - RESERVAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL 41

QUADRO 3.1 - MÉDIAS MULTI-ANUAIS DO BALANÇO HÍDRICO NO ESTADO DE SÃO PAULO 60

QUADRO 4.1 - QUADRO ESTRATIGRÁFICO GERAL DO PRECAMBRIANO NO ESTADO DA PARAÍBA 68

QUADRO 4.2 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA SIMPLIFICADA DO ESTADO DE SÃO PAULO 70

QUADRO 6.1 - INTERRELAÇÃO ENTRE RECARGA EFETIVA QUE SE PROCESSA A PARTIR DA PRECIPITAÇÃO E O RELEVO 128

SUMÁRIO

1: INTRODUÇÃO 1
1.1. APRESENTAÇÃO 1
1.2. OBJETIVOS 3
1.3. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDOS 3
1.4. METODOLOGIA DA PESQUISA 5

2: CONTEXTOS HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS 6

2.1. PRINCIPAIS EVIDÊNCIAS E CONCLUÇÕES DAS LIGAÇÕES GEOLÓGICAS - BRASIL E ÁFRICA 6
2.2. OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NAS ROCHAS DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO PRÉCAMBRIANO 10
2.2.1. Aspectos Fundamentais 10
2.2.2. Processos de Intemperismo 10
2.2.3. Perfis de Intemperismo 14
2.2.4. Aqüíferos da Zona de Intemperismo 17
2.2.5. Características das Zonas Fraturadas 18
2.2.6. Mecanismos e Tipos de Fraturamentos 19
2.2.7. Aqüíferos das Rochas Fraturadas 26
2.3. INFLUENCIAS DOS CICLOS DE EROSÃO 29
2.3.1. Contextos de Pediplanação 31
2.3.2. Contextos de Etchplanação 33
2.4. QUADRO HIDROGEOLÓGICO DO BRASIL 36
2.5. QUADRO HIDROGEOLÓGICO DA AFRICA OCIDENTAL 43

3. CARACTERÍSTICAS FISIOCLIMÁTICAS DAS ÁREAS DO ESTUDO 50

3.1. PARAÍBA 50
3.1.1. Elementos do Clima 50
3.1.2. Balanço Hídrico 52
3.1.3. Relevo e Geomorfologia 52
3.2. SÃO PAULO 56
3.2.1. Elementos de Clima 56
3.2.2. Aspectos Geomorfológicos 58
3.2.3. Balanço Hídrico 59
3.3. GANA 61
3.3.1. Elementos de Clima 61
3.3.2. Aspectos Morfológicos 63
3.3.3. Balanço Hídrico 66

4: CONTEXTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS ESTUDADAS 67

4.1. PRÉCAMBRIANO DA PARAÍBA 67
4.2. PRÉCAMBRIANO DE SÃO PAULO 69
4.3. PRÉCAMBRIANO DE GANA 74

5: CONTEXTOS HIDROGEOLÓGICOS DAS ÁREAS ESTUDADAS 79

5.1. INTRODUÇÃO 79
5.2. PARAÍBA 80
5.3.SÃO PAULO 85
5.4. GANA 87

6: ESTUDOS COMPARATIVOS DAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS E HIDROQUÍMICAS 91

6.1. INTRODUÇÃO 91
6.2. MODELOS HIDROGEOLÓGOCOS CONCEITUAIS 91
6.2.1. Aqüífero do Manto de Intemperismo 91
6.2.2. Análise dos Modelos Conceituais 101
6.2.3. Aqüífero dos Meios Fraturados 107
6.3 INFLUÊNCIA DO RELEVO NOS POÇOS 120
6.4 RELEVO, CLIMA E RECARGA 125
6.5. PADRÕES HIDROQUÍMICOS 129
6.5.1 Introdução 129
6.5.2. Análise Comparativa da Qualidade da Água 129
6.5.3. Estatísticas não Paramétricas dos Dados da Qualidade da Água 135

7: ESTUDOS COMPARATIVOS DOS ASPECTOS TÉCNICOS 141
7.1. INTRODUÇÃO 141
7.2. TÉCNICAS DE DESENVOLVIMENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA 141
7.2.1. Lopcação dos Poços 141
7.2.2. Desenvolvimento de Água Subterranea 147
7.2.3. Construção e Desenho dos Poços 148
7.2.4. Profundidade Ótima dos Poços 152
7.3. USO E PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA 154
7.3.1. Intrdução 154
7.3.2. Paraíba 155
7.3.3. São Paulo 157

7.3.4. Gana 159
7.4. PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO 160
7.5. PLANEJAMENTO E ADMINSTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA 161

8: CONCLUSÕES 164

9: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 166

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

A água é essencial para qualquer atividade humana. A sua disponibilidade é vital para ao crescimento da população mundial, produção dos bens materiais, elevação do nível de vida e preservação da qualidade ambiental do sistema natural.

A escassez de um elemento tão fundamental como a água é determinante como desarticulador da atividade social e econômica. Não surpreende pois o surgimento de publicações anunciando que a "crise de energia" dos anos setenta, deverá ser seguida pela "crise da água".

Enquanto a água potável encontra-se em todo lugar, como parte do vasto ciclo hidrológico global, seu valor e suficiência como recurso é determinado pelas disponibildades, avaliadas in loco ou regionalmente e a maneira como elas são usadas e gerenciadas .

Na visão global, a água é de necessidade incontestável. De acordo com WIDSTRAD (1980), para cada habitante humano há um volume disponível, renovável anual, de 8300 m^3 de água. Entretanto, variações climáticas naturais provocam facilmente déficites sobre esta figura de plenitude, fazendo com que nem sempre seja disponível, quando e onde ela é mais necessária. Aproximadamente dois terços do escoamento anual transformam-se rapidamente em inundações, causando maior destruição que beneficios; o outro terço é relativamente estável, constituindo desta forma, a principal fonte de água para consumo ou irrigação .

Asia e África são os continentes que enfrentam os maiores problemas oriundos da falta de água. As disponibilidades para cada asiático hoje são de menos da metade da média global .

Na África, o rio Zaire, segundo em volume após o Amazonas, responde por aproximadamente 30% das desponibilidades de águas renováveis deste continente, mas flui através de uma região de abundantes chuvas tropicais e pouco povoada. Dois terços das nações africanas têm desponibilidade, em termos de escoamento anual, acima da média global. As condições de estiagem que contínuamente assolam o continente, nas regiões de seca, têm ameaçado cerca de vinte nações VAN DER LEEDEN (1975), BROWN (1984).

Em Gana, a falta de fluxo de água nos áreas mais secas da bacia do Rio Volta, causou, em 1981, a queda do nível do reservatório de Akosombo Dam. A bacia do Rio Volta, cobrindo uma área de 343.680 Km^2, com 42% do seu leito localizado em Gana, é compartilhada por seis países : Benin, Gana, Costa do Marfím, Mali, Togo e Burkina Faso.

A América do Sul aparece como o continente mais bem dotado em recursos hídricos. Contudo, 60% do seu fluxo ocorrem na bacia do Rio Amazonas, fora do alcance de 90% da sua população .

A presente situação dos recursos hídricos é caracterizada por problemas consideráveis, para cujas soluções, a água subterrânea poderia desempenhar um importante papel em vários paises. A água subterrânea é adequada para o suprimento do consumo humano, industrial e agricola. As vantagens da utilização da água subterrânea no desenvolvimento desses paises são óbvias : a água subterrânea é o recurso hídrico mais disponível , muito freqüêntemente mais barato e além disso, é de melhor qualidade. Em muitas áreas a água subterrânea é um recurso hídrico disponível continuamente. A demanda de água subterrânea é, por isso, enorme e contínua crescendo em tais áreas.

O texto é composto de sete Capítulos numerados de 2 a 8. O Capítulo 2 abrange os contextos hidrogeológicos regionais do Brasil e África Ocidental , inclusive os conceitos básicos da ocorrência de água subterranea no embasamento geológico precambriano. As caracterizações climáticas e fisiográficas das áreas estão apresentadas no Capítulo 3, seguindo -se um sumário da geologia, no Capítulo 4.

Um exame dos dados hidrogeológicos existentes em cada uma das áreas selecionadas está no Capítulo 5. Os padrões comparativos da ocorrência de água subterrânea nas rochas cristalinas precambrianas do embasamento geológico , na Paraíba, São Paulo e Gana são tratados em dois capítulos compreedendo tópicos de Aspectos Hidrogeológicos e Aspectos Tecnológicos nos Capítulos 6 e 7 respectivamente. Finalmente as concluções e recomendações do estudo estão no Capítulo 8 .

1.2. OBJETIVOS :

Os principais objetivos deste trabalho são :

- Analisar e avaliar as características qualitativas e quantitativas dos recursos de águas subterrâneas das rochas do embasamento geológico precambriano, sob diferentes condições de clima : semi-árido, semi-úmido, úmido.

- Identificar os métodos e problemas envolvidos na explotação destes recursos nestas áreas.

Os Estados da Paraíba e São Paulo no Brasil foram escolhidos por representarem áreas de condições semi-áridas e úmidas respectivamnte, para um estudo comparativo com Gana na África Ocidental, sob condições úmidas e semi-úmidas.

1.3 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO :

Paraíba - O Estado da Paraíba cobre uma área de 56.374 Km^2 e situa-se entre as longitudes 35° 30' e 38° 00' oeste e 06° 05' e 08° 00' de latitude sul, no Nordeste do Brasil (Fig 1.1). O ombasamento geológico précambriano ocupa cerca de 97% da área do Estado

São Paulo - O Estado de São Paulo cobre uma área de 246.898 Km^2, localizado no Sudeste do Brasil . Está situado entre as longitudes 44° 19' e 53° 08'e as latitudes 19° 46' e 25° 16' (Fig 1.1). O domínio de ocorrência de rochas do embasamento geológico precambriano cobre cerca de 23% da área do Estado.

Gana - A República de Gana está localizada ao longo do Golfo da Guiné. Situa-se entre as longitudes 03° 15' oeste e 01° 12' leste e as latitudes 04° 44' sul e 11° 11' norte (Fig 1.1). Cobre uma área de 238.537 Km^2. Os aqüíferos de rochas do embasamento geológico precambriano ocorrem sobre cerca de 54% do seu território.

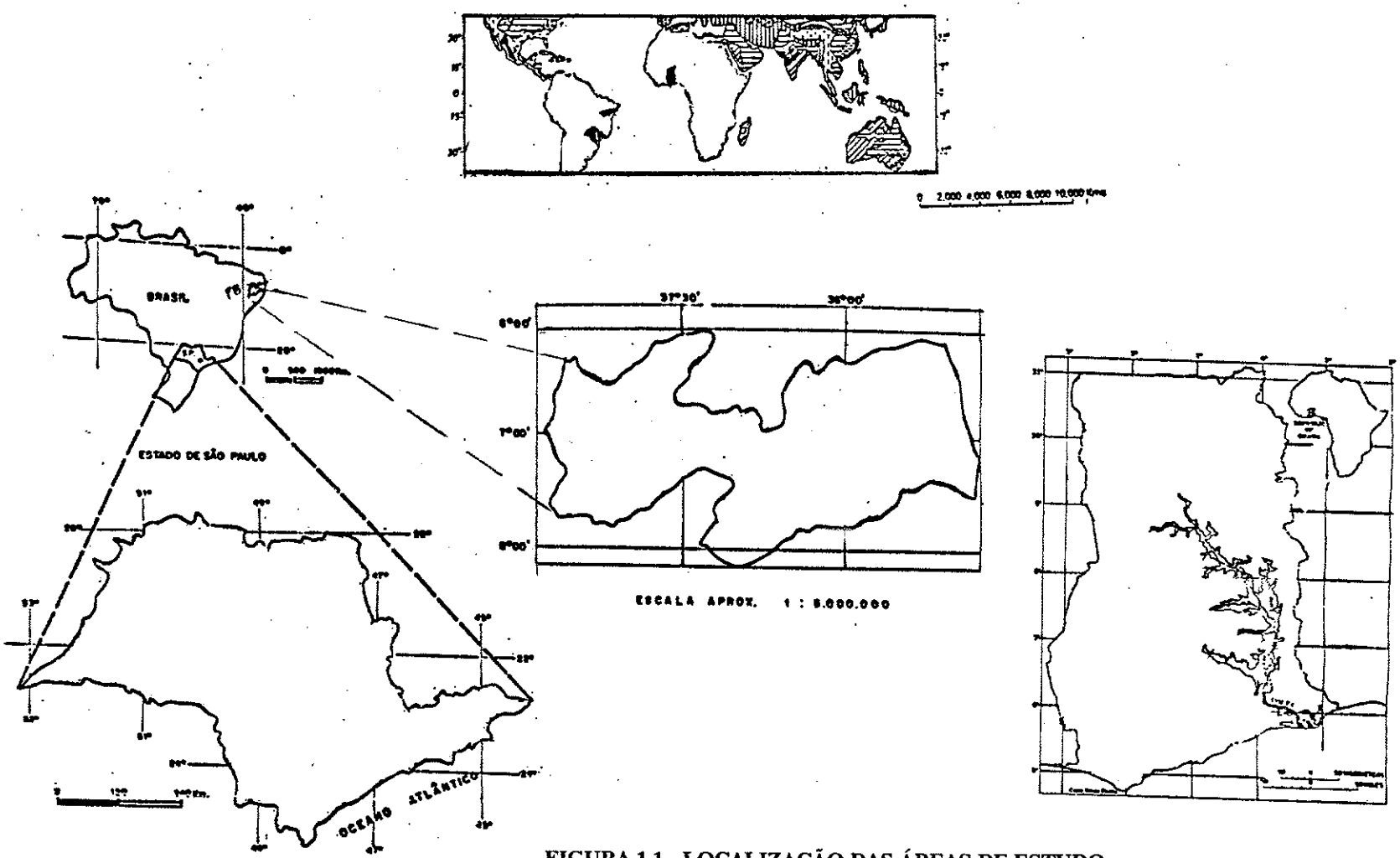


FIGURA 1.1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

1.4. METODOLOGIA :

Os seguintes procedimentos foram seguidos para avaliação qualitativa e quantitativa dos recursos de águas subterrâneas das áreas de estudo, nos Estados da Paraíba e São Paulo, no Brasil e Gana, na África Ocidental:

- Coleta e análise da bibliografia disponível para elaboração de sínteses das características climáticas e fisiográficas, incluíndo a geologia das áreas e as condições de ocorrência de água subterrânea.

- Consulta, análise e compilação de informações relevantes produzidas por organizações tais como: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais (CDRM) da Paraíba , Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de São Paulo e Ghana Water Sewerage Corporation (GWSC) de Gana.

- Consulta, análises e compilação de dados técnicos de poços, selecionados a partir dos boletins das companhias perfuradoras.

- Visitas as áreas de estudo para confirmar e coletar mais dados.

- Integração, tratamento e interpretação dos dados coletados.

2. CONTEXTOS HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS

2.1. PRINCIPAIS EVIDÊNCIAS E CONCLUSÕES DAS LIGAÇÕES GEOLÓGICAS BRASIL E ÁFRICA

Desde a publicação do trabalho de WAGNER (1912) "Hipótese da Migração dos Continentes" , várias evidências originadas em campos diferentes, como paleomagnetismo, geocronologia e outros, tem demonstrado a separação das massas continentais, com a concomitante formação das bacias oceânicas.

Dentre as interpretações de processos tectônicos de larga escala como reportadas em HURLEY (1968), destacaram-se os seguintes:

a) Interpretação das anomalias lineares magnéticas nas bacias oceânicas, em termos de inversão geomagnética e desenvolvimento do fundo marinho, desde a cadeia meso -oceânica.

b) O estabelecimento da precisa estratigrafia de sedimentos marinhos novos, correcionados através de perfuração profunda das bacias oceânicas

c) Interpretação de dados sismológicos dentro de zonas ativas, como arcos de ilhas meso-oceânicas e grandes falhas transcorrentes e transformantes.

d) Correlação geológica das regiões continentais, as quais podem ter sido adjacentes, de acordo com a reconstrução de características da América do Sul (Brasil) e África Ocidental.

Algumas das mais importantes evidências e conclusões sobre as ligações geológicas entre Brasil e África, e similaridades de evolução tectônicas de antes, durante e depois da separação continental, são aqui, sumarizados (Fig. 2.1).

a) Existem grandes similaridades entre a evolução geocronológica das rochas do embasamento da Serra Leoa e Libéria na África Ocidental e outras rochas análogas da Venezuela, Guiana e Suriname na América do Sul, HURLEY et al (1967). Além disso, essas duas regiões foram afetadas por um forte episódio orogênico no periódo precambriano médio, um evento chamado de Ebureano na África e Transamazônica na América do Sul.

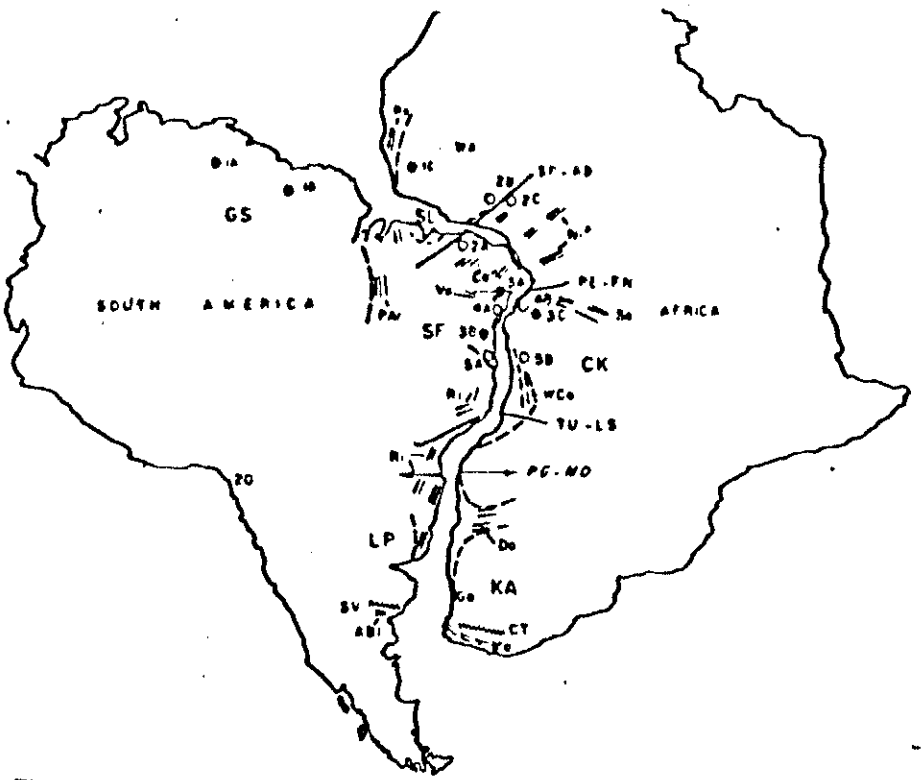


Fig. 7. Summary of the main Brazil—Africa geological links. Legend: *1A* = Imataca Complex; *1B* = Fallawatra Complex; *1C* = Liberian province; *2A* = Jaibaras Basin; *2B* = Voltaian Group; *2C* = Buem and Togo Formations; *3A* = Pernambuco—Alagos Massif; *3B* = Jequié Complex, *3C* = Chaillu massif; *4A* = Estancia Group; *4B* = Noya Series; *5A* = Rio Pardo Group; *5B* = Schisto-calcaire and Schisto-greseuse Series: *GS* = Guayana Shield; *SL* = São Luis cratonic area; *WA* = West African Craton; *SF* = São Francisco Craton; *CK* = Congo-Kasai Craton; *LP* = Rio de La Plata cratonic area; *KA* = Kalahari Craton; *PAr* = Paraguay—Araguaia Belt; *Ro* = Rockelide Belt; *Ca* = Caririan Fold Belt (Borborema Province); *Ni* = Pan African Province of Nigeria and Cameroon; *Va* = Vasa Barris Group; *Se* = Semba—Ouesso Series; *Ri* = Ribeira Belt; *WCo* = West Congo Belt; *Da* = Damara Belt; *ABl* = Aguas Blancas Formation; *Ma* = Malmesmury Group; *Ga* = Gariep Group; *SP—AB* = Sobral Pedro II and Alibory-Bifur lineaments; *PE—FN* = Pernambuco and Foumbam—Ngaurandere lineaments; *TU—LS* = Taxaquara—Ubatuba and Luanda—Salazar lineaments; *PG—MO* = Ponto Grossa—Moçamedes Geotumor; *SV—CT* = Sierra de La Ventana—Capetown Fold Belts.

(SEGUNDO TORQUATO et al, 1981)

FIGURA 2.1 - SUMÁRIO DAS PRINCIPAIS LIGAÇÕES GEOLOGICAS ENTRE BRASIL E ÁFRICA

b) Há uma ligação direta entre a zona de dobra de Rockelide na África Ocidental e a zona Paraguaia-Araguaia na América do Sul. A zona de dobra de Rockelide inclui uma série de rochas compostas por filitos, quartzitos, itabiritos e rochas metavulcânicas que cobrem o embasamento, no qual rochas Liberianas e Ebureanas foram rejuvenecidas por ciclos orogênicos Pan-Africanos (ALLEN 1969). A zona Paraguaia-Araguaia, em sua parte norte, mostra direções estruturais N-S, estando em ligação direta com a zona Rockelide na reconstituição da separação continental.

c) A área cratônica de São Luís (Brasil) parece ser um pedaço da craton da África Ocidental, que foi separada durante o episódio de deriva do Mesozóico. A craton da África Ocidental é uma grande unidade geotectônica a qual inclui o Escudo Liberiano que foi afetado pela orogênese Ebureana há cerca de 200 milhões de anos. Os limites das zonas orogênicas Pré-Cambrianas, em ambos os lados das áreas cratônicas, encaixam na reconstrução pre-deriva .

d) As similaridades geológicas indicadas por ALMEIDA (1968) e ALMEIDA e BLACK (1968) confirmam a correlação entre o cinturão de dobramentos Caririanos (Borborema, Nordeste do Brasil) e a zona Pan-Áfricana de Benin (Dahomey), Nigéria e Camarões. Nas duas regiões, um forte episódio orogênico, durante o Precambriano superior, produziu rochas meta-sedimentares, induzindo a granitização e rejuvenecimento de rochas cristalinas Pré-Brasilienses e Pré Pan-Africanas ALMEIDA (1967) , KENNEDY (1964), GRANT (1973).

NEVES (1975) identifica no Nordeste do Brasil zonas de dobramento alternado com maciços médios (ou altos tectônicos), constituindo um padrão estrutural que parece ser aplicável ao padrão da região Pan-Africana do Oeste da África. Por exemplo, o alto tectónico do Rio Piranhas NEVES (opt. cit), é correlativo com a região Ibadan da Nigéria. Na área do Rio Piranhas, os granítos, migmatitos e gnaísses do complexo São Vicente exibem idades isocrônicas (Rb-Sr) de cerca de 2.700 milhões de anos (PESSOA 1976). Na região de Ibadan GRANT (1970) e BURKE et al (1976) descrevem a existência de rochas gnaíssicas e graníticas de cerca de 2.200 milhões de anos, associadas com o embasamento de gnaisses bandeados.

e) No que concerne as estruturas sedimentares, litológia, conteúdos fósseis , assim como hiatos estratigráficos e não conformidades, BAR e RIEGEL, (1990), as evidências Paleozóicas nas Séries Sekondianas e Accraianas da seção da costa de Gana, Oeste Africano, são idênticas e diretamente

contínuas com a margem da costa norte da bacia do Maranhão- Parnaíba no Brasil.

f) No Brasil, as grandes áreas de granulítos do complexo de Jequié, leste da Bahia, tem idades de 2.600 a 2.900 milhões de anos aproximadamente CORDANI (1973), as quais estão relacionadas com as rochas granulíticas do Complexo de Ntem em Camarões e com o Maciço de Chailu na colina de Cuanza em Angola, onde as idades são de cerca de 2.850 milhões de anos, DELHAL et al (1976).

g) Na parte norte do cinturão da Ribeira (Província da Mantiqueira) no Brasil, a Formação Paraíba tem idade Transamazônica da mesma linha de Angola.

A separação entre a América do Sul e África foi gradual, e pode ser descrita em 3 fases históricas, cada uma delas relacionada com a evolução das regiões costeiras da América do Sul e África. A primeira fase, na qual as bacias marginais mostram uma sequência basal de sedimentos continentais, foi seguida por camadas marinhas, (Aptiano/Albiano); finalmente, formando-se "trend" estruturais rugosos, paralelos a presente costa.

Na América do Sul, o embasamento corresponde a costa do Atlântico Leste, sul do lineamento de Pernambuco. Na África, compreende a costa Sudoeste, zona de fraturamento sul de Camarões. Nesta área, de acordo com NORTHFLEET (1972), o ambiente marinho Albiano foi favorável à acumulação de sequências finais de evaporitos nas bacias marginais de Campos, Santos, Espirito Santo, Alagoas, Sergipe, Cuaza, Baixo Congo e Gabão. Na segunda fase, as estruturas do embasamento são oblíquas a linha da costa. No Brasil, isto inclui as bacias marginais ao longo da costa norte e nordeste, até o lineamento da Paraiba, enquanto na África incluem as bacias marginais localizadas entre a Costa do Marfim e a Nigéria. Eventos compressivos são evidenciados por dobras e falhas inversas afetando sedimentos Pré-Cambrianos no Ceará, e as bacias marginais de Barreirinhas, Gana e a Costa do Marfim.

A última fase de separação mostra um embasamento de rochas com "trend" estrutural praticamente ortogonal a linha costeira, Isto corresponde a maior parte do nordeste do Brasil, onde os lineamentos de Pernambuco e Paraiba estão localizados, e na África inclui a abertura do "rift" de Benue. As bacias marginais nestas áreas exibem uma evolução geológica na qual sua sedimentação continental começa no Aptiano/Albiano. A última cratonização do ciclo Brasiliano/Pan-Africano ocorreu há aproximadamente 450 milhões de

anos, perto do Ordoviciano/Siluriano, junto com o desaparecimento do último pulso tectônico pós-orogênico e vulcânico. Após este evento, a atividade magmática esteve praticamente ausente no oeste da África, antes do final do Paleozóico

2.2. OCORRÊNCIA DE ÁGUA NAS ROCHAS DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO PRÊCAMBRIANO

2.2.1. Aspectos Fundamentais

A formação de aqüíferos nas rochas cristalinas do embasamento geológico decorre do presença de fraturas e/ou de um manto de intemperismo.

O desenvolvimento e espessura do manto de rocha alterada é uma função do clima , topografia e tectonismo.

O manto de intemperismo é relativamente poroso e permeável, e, devido a sua facilidade de absorver precipitaçôes, atua como um meio de recarga para a zona de rocha fresca fraturada abaixo. Na faixa saturada do manto de intemperismo (rochas alteradas), a água subterrânea ocupa os interstícios entre as partículas de minerais e fragmentos rochosos alterados.

A rocha fresca ao contrário, possui pouca ou nenhuma porosidade primárias . A água subterrânea pode ser encontrada na rocha fresca, somente se ocorre o desenvolvimento de aberturas secundárias. Estas aberturas secundárias são causadas por tensões tectônicas e incluem aberturas ao longo dos planos das camadas, fendas, juntas e falhas. Comumente, estas aberturas alargam-se pelo processo intempérico. O número e tamanho das aberturas, determina a porosidade secundária da rocha fresca, e o grau de interconecção das aberturas determina sua permeabilidade secundária. O número, tamanho e interconecção das aberturas secundárias diferem com respeito a profundidade, a partir da superficie do terreno. Na verdade, a porosidade secundária e permeabilidade diminuem com a profundidade, devido conjuntamente ao aumento da pressão litostática e redução do intemperismo .

2.2.2. Processos de Intemperismo

Intemperismo é um processo de alteração física e química de rochas expostas na superfície terrestre. A idea de alteração, mais fácil de compreender, é dada por OLLIER (1975), como segue: Intemperismo envolve decomposição e alteração de materiais rochosos, perto da superfície terrestre,

para produtos que estão em maior equilíbrio com as condições físico químicas impostas pelo ambiente em geral.

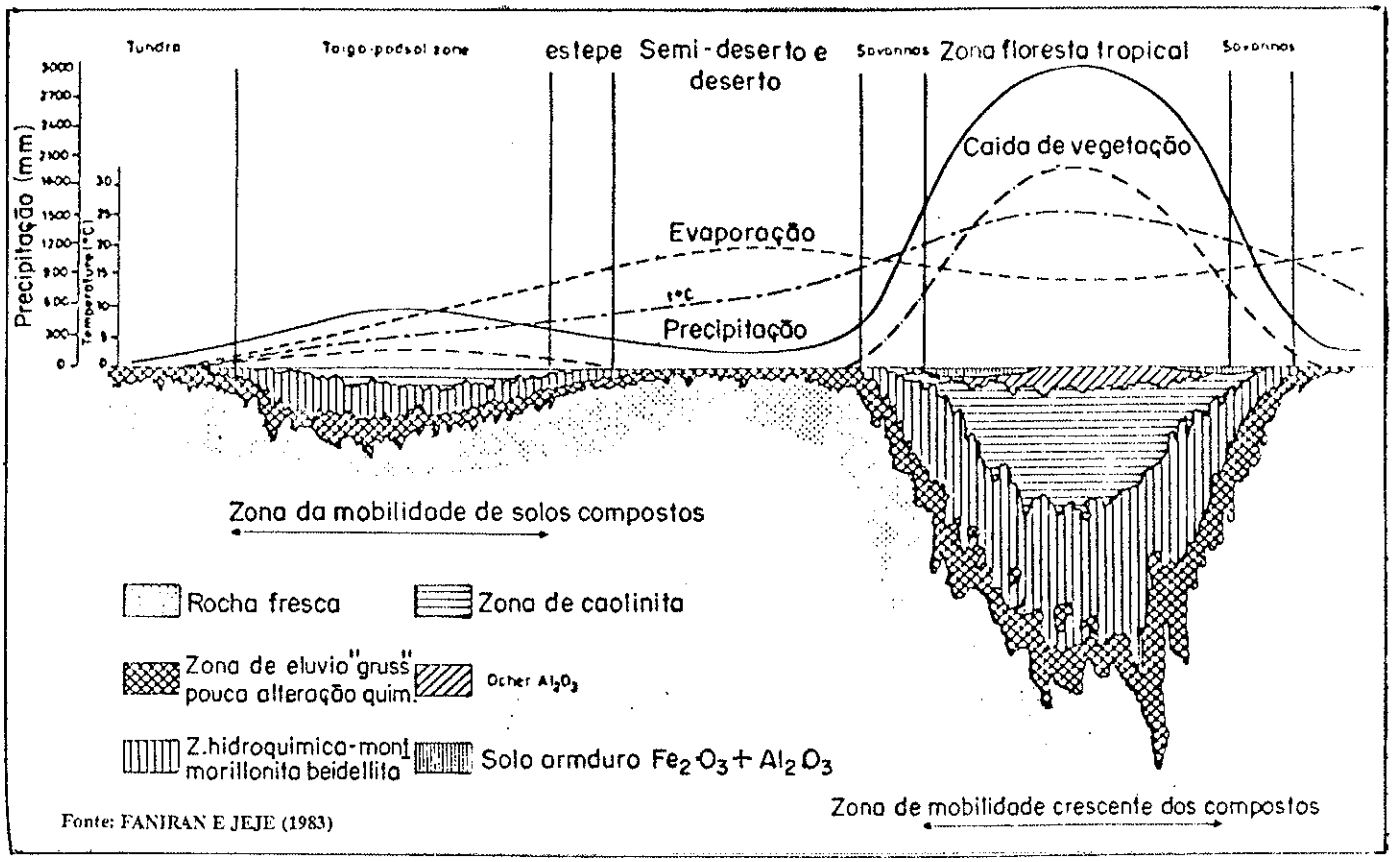
Muitas rochas foram originalmente formadas sob condições de temperatura e pressões altas, ausência de ar e água. Por outro lado, na grande maioria dos casos, os processos intempéricos ocorrem nas condições atuais de temperatura, e pressão baixas e presença de água e ar nas rochas. Sob um conjunto de condições, muitas formas de alterações são possíveis, resultando variados produtos finais de decomposição, os quais, podem diferenciar-se do conjunto de materiais primários do processo de intemperismo, se condições que determinaram a alteração mudam.

Os fatores principais que afetam a profundidade da decomposição, tão relevante no estudo de água subterrânea em rochas cristalinas, compreendem um conjunto ou combinações de condições do meio ambiente, incluindo fatores climáticos, biológicos, geológicos locais, e cronológicos, THOMAS (1974).

Existem duas categorias principais de processos que ocasionam o intemperismo das rochas: mecanismos físicos e químicos de decomposição. Porém, do ponto de vista prático, a distinção entre decomposição química e física torna-se artificial. Não somente porque os dois processos são governados pelo mesmo princípio de busca de equilíbrio sob diferentes condições ambientais, mas também porque os dois ocorrem juntos em vários lugares. O fraturamento mecânico das rochas em maior escala, ajuda a penetração de ar, água e ácidos orgânicos, que constituem os agentes da decomposição química simultânea. O modelo geotectônico tem seu papel muito importante. Com efeito, nas áreas submetidas aos movimentos eustaticos positivos a penetraçãodas águas de infiltração tendem a atingir grandes profundidades. ao contrario, nas áreas com euatatismo negativo, há afogamento dos niveis de base dos fluxos hídricos

O clima cumpre um importante papel na determinação dos tipos e intensidades dos processos de decomposição. Este controla diretamente o intemperismo, através da variação de temperatura e precipitação pluviometrica, e indiretamente, através da cobertura vegetal ,como pode-se verificar na (Fig. 2.2).

Nos trópicos, três ambientes de decomposição intempérica tem sido distinguidos PEDRO (1968) com base na precipitação anual, como seguem:



Fonte: FANIRAN E JEJE (1983)

FIGURA 2.2 - CLIMA E PROFUNDIDADE DO INTEMPERISMO DAS ROCHAS NAS ÁREAS TECTÓNICAMENTE INATIVO

i) Pluviometria sendo menor que 500 mm ao ano - ambiente de *bissialitização*, com a formação de minerais como sericita, vermiculita e montmorilonita.

ii) Pluviometria entre 500 e 1500 mm por ano - ambiente de *monossialização* ou caulinização, com remoção completa de cátions básicos acompanhados de remoção parcial de sílica. O resto do SiO_2 combina-se com a alumina para formar caulinita ($SiO_2 : Al_2O_2 = 3$).

iii) Pluviometria maior que 1.500 mm ao ano - ambiente de *alitização*, que resulta da liberação total de cátions básicos e sílica à solução, os quais podem ser encontrados nas mesmas proporções que na rocha paretal. Somente Al e Fe preservam-se , usualmente como hidróxidos de gipsita e geotita respectivamente.

A ordem em que os minerais primários decompõe-se pelos processos intempéricos aproxima-se do inverso das séries de Bowen, POLYNOV (1937). Desta maneira, temos as seguintes razões de $Si : O_2$

Olivina 1:4
Piroxênio
1:3
Hornblenda
4:11
Biotita
2:5
Ortoclásio;Qtz;Moscovita
3:8
Calcio-plagioclásio
1:4
Sódio-plagioclásio
3:8

< ---------- >
Menos estável
Mais estável

O avanço do intemperismo significa a facilidade com a qual um mineral primário é convertido em formas secundárias, relacionadas muitas vezes, com a mobilidade dos seus elementos.

A ordem de mobilidade é como segue :

i) Mais móveis Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}, K^{+}.

ii) Mobilidade intermediária K^{+}, Mg^{2+}, Si^{4+}, Fe^{2+}.

iii) Menos móveis Fe^{3+}, Al^{3+}.

A intensidade com que a decomposição se-desenvolve na superfície do solo depende também do tamanho dos cristais. A decomposição se desenvolve mais lentamente na medida em que os cristais são menores.

2.2.3. Perfis de Intemperismo

Os perfis intempéricos resultam quando ocorre intemperismo intenso . As varias zonas que caracterizam o perfil de intemperismo (alteração de rochas cristalinas frescas para solo) tem sido identificadas por muitos autores, RUXTON e BERRY (1957), THOMAS (1966), STOOPS (1968), DEARMAN et al (1978), OMORINBOLA (1982) e ACWORTH (1987).

Na maioria dos casos, os limites das zonas nos perfis de intemperismo tornam-se indefinidas . Subdivisões relevantes para estudos hidrogeológicos tem sido reconhecidas e propostas pela UNESCO (1984) e McFARLANE (1987a).

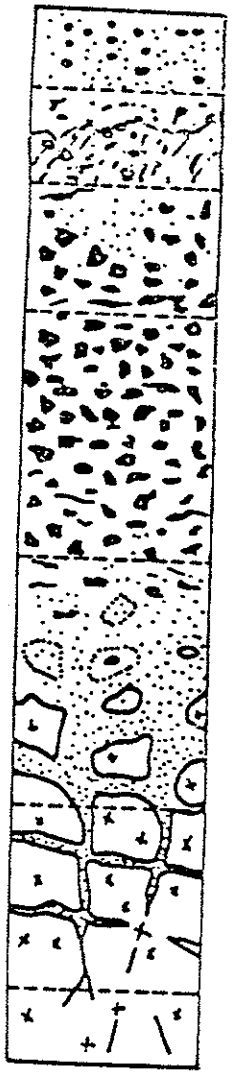
Quatro zonas principais e seus parâmetros primários são reconhecidos pela UNESCO (opt cit) conforme Fig. 2.3. Os termos *saprolito*, *colúvio*," *saprock*" e *regolito* são propostos pelo British Geological Survey (BGS) para as subdivisões do perfil de intemperismo, como são ilustrados na Fig. 2.4.

Estes termos são aqui definidos e comparados com as zonas da UNESCO, em relação à ocorrência e fluxo da água subterrânea no material intempérico do complexo do embasamento .

a) O SAPROLITO é formado por rochas decompostas " *in situ*". Vestígios das estruturas e texturas das rochas são preservados, mas a alteração prossegue até um grau de decomposição em que o material fica mole e muito fraco com formação de argilas, podendo ser desagregado a mão.

b) *COLÚVIO* é um estagio acima do saprolito, no qual não há mais vestígios de estruturas e texturas das rochas. É essencialmente um resíduo resultamte do saprolito que é debilitado pela lixiviação, a qual induz o colapso. O colúvio está mecânicamente misturado, pelo colapso vertical e movimento descendente, como arrasto pela gravidade, e também por atividade biológica. A parte superior do colúvio é o próprio solo . Pode-se salientar que, neste sentido solo não é sinônimo de colúvio. Este último é muito mais espesso e profundo do que no horizonte superficial, no qual muitos cientistas do solo reconheceriam processos pedogênicos.

PERFIL



DESCRIÇÃO

Horizonte de solo "A". Geralmente menor que 0,5m de espessura. Normalmente solo arenoso vermelho, alta porosidade, bem drenado e lixiviado.

Horizonte de solo "B". Zona deposicional com formação de laterita. Espessura varia até 15m.

Zona "a" (Zona de solo "C"): Pouco metros de espessura. Argila arenosa ou areia argilosa frequentemente concrecionada

Zona "b": 1m a 30m de espessura Acumulação massiva de minerais secundários (argilas), em que alguns minerais primários estáveis podem estar presentes na sua forma original. Baixa permeabilidade e porosidade.

Zona "c": 1m a 30m de espessura. Rocha progressivamente alterada na parte superior para uma camada granular friável de agregados de cristais desintergrados e fragmentos de rocha. Porosidade e Permeabilidade intermediária.

Zona "d": 1m a 20m de espessura. Rocha fraturada e fissurada. Baixa porosidade, mas moderada a alta permeabilidade nas fissuras.

Rocha Fresca.

(SEGUNDO UNESCO, 1984 In: ACWORTH, 1987)

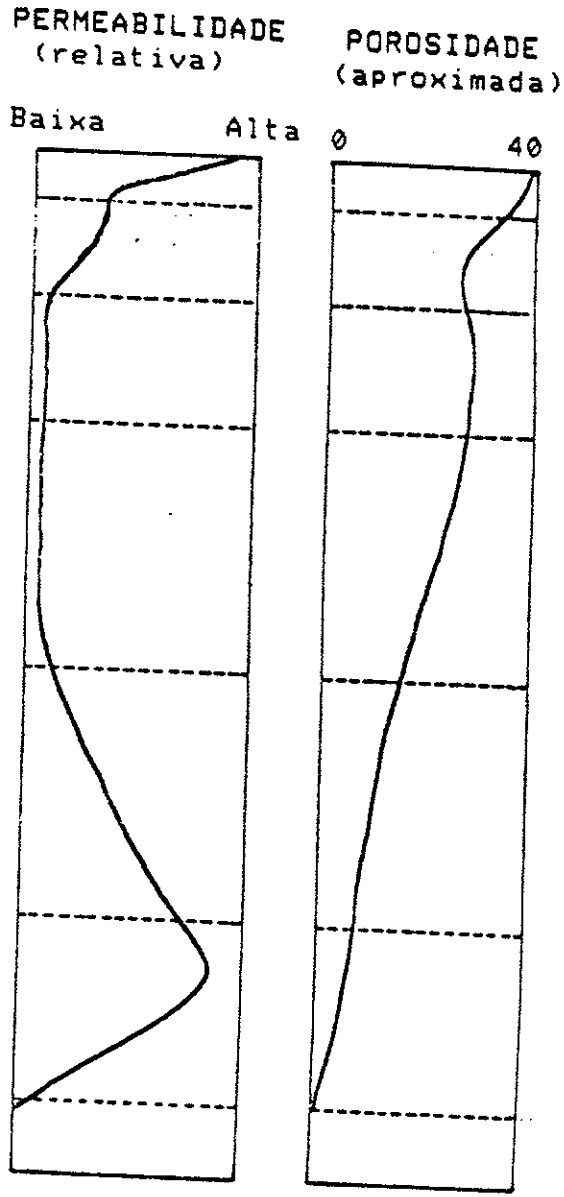
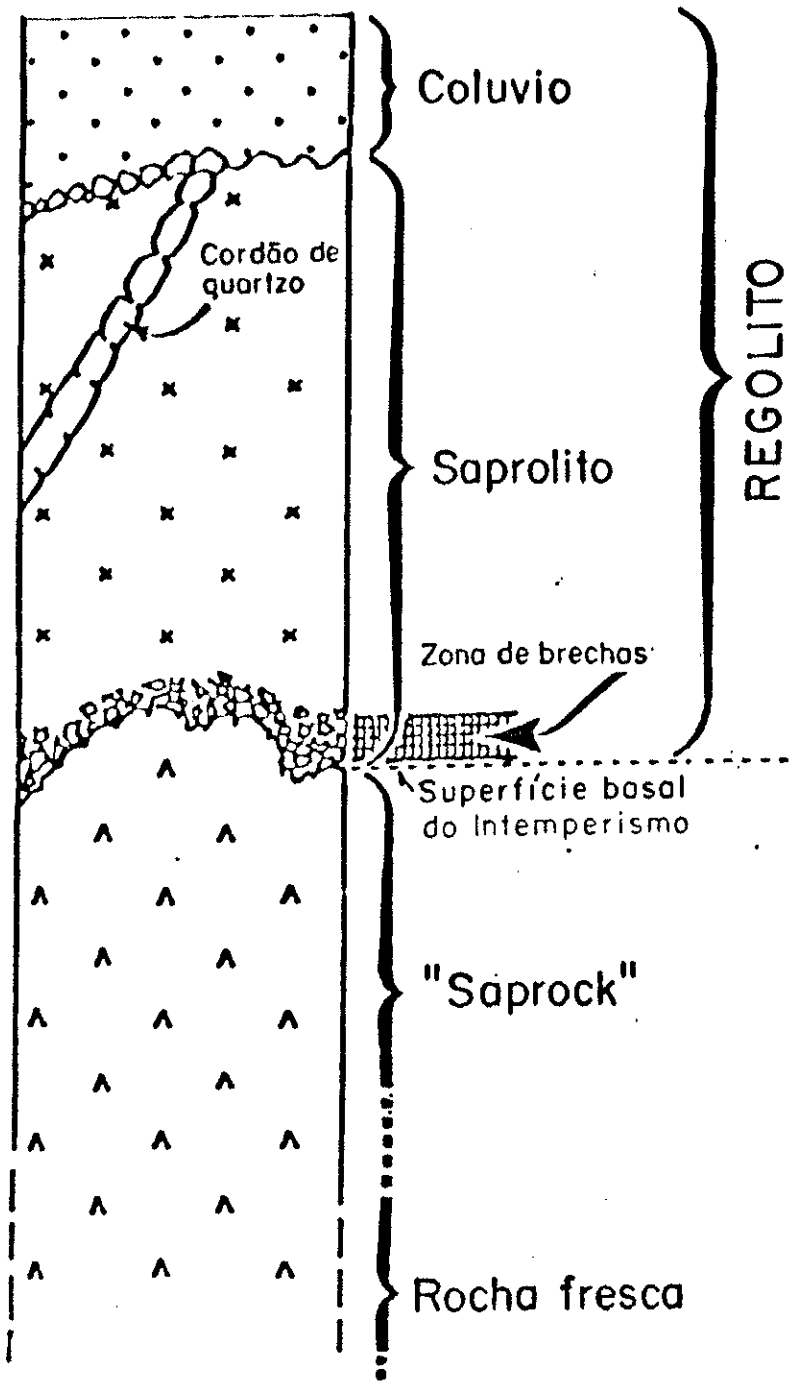


FIGURA 2.3 - PERFIL TIPICO DE ALTERAÇÃO INTEMPERICA DESENVOLVIDO SOBRE ROCHAS DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO NOS TRÓPICOS



(SEGUNDO BGS In: McFARLANE, 1987a)

FIGURA 2.4 - PRINCIPAIS SUBDIVISÕES DO PERFIL DO INTEMPRISMO SOBRE ROCHAS DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO NOS TRÓPICOS

Os limites entre o saprolito e o colúvio, podem ser bem definidos e marcados por uma linha de pedras ou um cordão de quartzo ou segregação secundária (por exemplo laterita pisolita), que ocorrem no saprolito subjacente. Na situação em que faltam pedras no saprolito os limites são pouco definidos e irregulares, muitas vezes com clastos do saprolito suspensos no colúvio acima do limite.

c) *"SAPROCK";* representa rochas no estado de leve e ma deterioração imtempérica. O "saprock" duro tem aparência rochosa, devido ao esqueleto de minerais primários resistentes que ainda persistem no contatos com a rocha sã. Os minerais das rochas mais susceptíveis ao intemperismo foram alterados para minerais argilosos. Os contatos entre o "saprock" e o saprolito podem ser formados por brechas, particularmente no caso de granitos ígneos, isto é provavelmente o resultado da liberação de pressão.

No caso de gnaisse granítico torna-se dificílimo determinar o contato entre o "saprock" e o saprolito, devido a maneira como as bandas ou zonas do saprolito ocorrem na forma de "sanduiche" entre as zonas do "saprock". Os contatos entre "saprock" e as rochas frescas são graduais, com pouco minerais primários sendo afetados pela decomposição (intemperismo químico).

d) *REGOLITO* : Este termo significa aquela parte friável e mole dos materiais do manto de intemperismo, incluíndo colúvio e o saprolito, porêm excluindo o *"saprock"*.

Numa análise comparativa dos perfis de intemperismo (Fig. 2.3 da UNESCO com Fig. 2.4 de BGS) verifica-se que na Fig 2.3 , os horizontes A e B do solo são equivalentes ao colúvio, enquanto as zonas *a, b* e c, representam os vários estágios de decomposição no saprolito da Fig. 2.4 . A zona d da Fig. 2.3 corresponde também ao *"saprock"* da Fig. 2.4.

2.2.4.Aqüíferosda Zona de Intemperismo

Para atuar como aqüíferos explotáveis, o perfil ou manto do intemperismo deve ocorrer sôbre uma área de suficiente extensão, atingir uma espessura considerável e possuir uma condutividade hidraúlica capaz de fornecer boa vazão aos poços . Essas condicões somente são encontradas nas zonas mais baixas do manto de intemperismo, isto é, zonas *c* e *d*.

Saliente-se que a zona *b* é dotada de materiais argilosos, e embora contenha água em quantidade suficiente , normalmente atua como um aquiclude. Neste caso, a água subterrânea das zonas *c* e *d* pode ser confinada pela zona *b*. Por outra lado , se o aqüífero da zona *c* for bombeado excessivamente, a água armazenada na zona *b* fluirá para a zona *c* abaixo, devido a redução de pressão nesta zona. De acordo com RUSHTON (1986) essa drenança de água desempenha um papel importante no aproveitamento da água subterrânea como recurso hídrico.

As reservas explotáveis de água subterrânea na zona c dependem da condutividade hidraúlica do material do intemperismo. Se esta é alta, como conseqência, a água subterrânea vai fluir rapidamente, a partir da zona c, a menos que a zona de intemperismo fique acima do nível do sistema de drenagem superficial local. Neste caso a zona aquifera tende a secar rapidamente, após o fim da estação úmida.

No caso de valores baixos de condutividade hidráulica, a transmissividade passa a ser reduzida e, desta forma o fluxo de água subterrânea deságua lentamente nos rios, mantendo o escoamento superficial do local .

Reservas significantes de água subterrânea podem ser encontradas em fraturas presentes na zona *d*, embora o posicionamento destas, em relação à drenagem superficial, também seja importante. As chances de obtenção de bons resultados, a partir de poços, são usualmente relacionadas com as espessuras da zona *c*, entre 10 e 15 metros e/ou que interceptem as fraturas na zona *d*. As fraturas possuem uma permeabilidade alta, enquanto os materiais desagregados da zona c promovem um armazenamento elevado .

2.2.5 Características das Zonas Fraturadas

As rochas cristalinas do embasamento, tais como granitos, gnaisses, xistos, apresentam problemas particulares no que concerne a ocorrência de água subterrânea, devido a ausência geral de porosidade primária intergranular, mas podem possuir uma porosidade secundária provida por fraturas (falhas ou juntas). .

Eventos tectónicos múltiplos têm afetado as áreas cratónicas, ao longo da história geológica (extendendo-se da Era Arqueozóica à Recente) de maneira que, as rochas assumem aspectos litícos e estruturais variados, em função dos diferentes processos a que foram submitidas. Consequêntemente, as

rochas exibem complexos padrões estrutruais como dobramento dúctil ou plástico e fraturamento rúptil .

Vários são os termos que descrevem os processos e produtos da deformação das rochas. O sistema de esforços que atúam numa massa rochosa resultante de esfoços tectónicos ou de afundamentos é referido como "stress" . Seu efeito é denominado deformação e inclui dobras e fraturas. Fratura é um termo não específico para descrever mais ou menos uma quebra planar, resultante do colapso mecânico devido a uma tensão aplicada.

As fraturas incluem: falhas, definidas como fraturas ao longo das quais deu-se um deslocamento paralelo (cisalhamento), relativo dos blocos contíguos, ruptura (fenda) e junta ou diáclase quando ocorrem apenas separação . Fissuras e rochas fissuradas são geralmente termos que descrevem juntas e quebraduras de rochas . O lineamento é usado como um termo genérico para descrever uma característica linear ou levemente curvilinear da rocha que aflora à superfície do terreno e que reflete uma característica estrutural O'LEARY et al (1976).

2.2.6. Mecanismos e Tipos de Fraturamento

Um meio rochoso, como qualquer meio sólido, está sujeito a diferentes tipos de deformação, em função das suas características elásticas e mecânicas, e do estado de tensões a que está submetido.

Esses fatores são extremamente condicionados pela variação de profundidade (temperatura e pressão), fluido nos poros, mineralogia, textura, homogeneidade, grau de deformação, entre outros.

Assim é que, à grande profundidade predominam os elevados estados de tensões compressivas e as altas temperaturas, condicionando uma plasticidade do meio, com deformação por dobramento e recristalização de minerais, sem contudo desenvolver a deformação ruptural. Já em pequenas profundidades, é menor o efeito do estado de tensões, permitindo a deformação ruptual dos maciços rochosos em diferentes estilos e direções .

O comportamento do meio rochoso sujeito as tensões compressivas está ilustrada na Fig. 2.5. A curva de deformação (curva"Stress-Strain"), mostra três regiões . Nos valores de baixa tensão, a relação é quase linear e elástica. No límite de resistência, a deformação muda para plástica, e

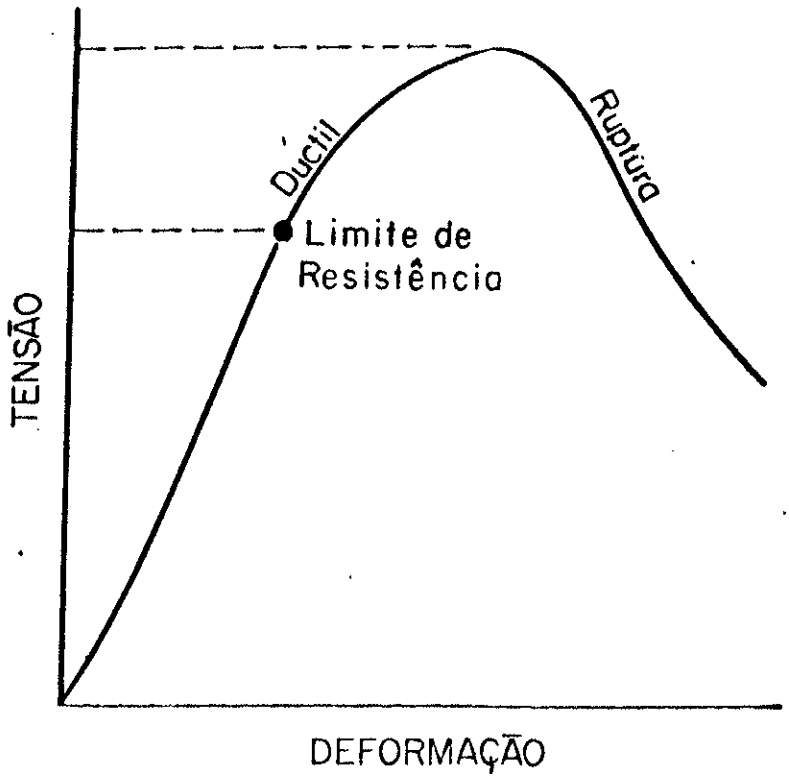


FIGURA 2.5 - COMPORTAMENTO TENSÃO vs DEFORMAÇÃO DAS ROCHAS

finalmente, em valores de tensão mais altos, a rocha se comporta como um corpo frágil, antes que a falha ocorra (por exemplo, cisalhamento).

Em geral, as dobras dúcteis ocorrem mais comumente nas regiões mais profundas da crosta terrestre, enquanto as fraturas (deformação rúptil) ocorrem em níveis menos profundos ou na superficie .

O esforço de tensão numa rocha pode ser descrito em termos de três direções mutuamente perpendiculares: o máximo (σ_1), intermediário (σ_2) e o mínimo (σ_3) representando as principais esforços que definem o elipsóide de tensão .

As falhas ocorrem ao longo de dois conjuntos de planos de cisalhamento, os quais contêm a tensão intermediária principal (σ_2) e fazem um ângulo θ com a tensão máxima principal (σ_1) Fig 2.6.

O valor téorico da fricção interna que ocorre a 45° (que é um tipo de propriedade intrínseca das rochas) atinge um valor intermediário a 30° aproximadamente. Dependendo da orientação do elipsóide de tensão reinante, a falha que resultará será normal, reversa ou transcorrente. Em cada caso, consequentemente, os planos de cisalhamento mostram feições de tensões compressivas. Isto ocorre, ainda, no caso de falhas normais, apesar de serem usualmente associadas com tensões laterais. Neste caso, as falhas e deslocamentos ocorrem por processos de cisalhamento puro.

Relações observadas de "stress-strain" em rochas indicam que, sob certas condições, estas podem se deformar por cisalhamento simples, durante o qual as tensões principais (mínima e máxima) se deslocam com o incremento do esforço (Fig 2.7). Por exemplo, em zonas subjacentes as maiores falhas de torção, um campo secundário de tensão é induzido, o qual pode resultar numa zona de falhas " en echélon", designada cisalhamento de Riedel ou par conjugado de Riedel. De maneira semelhante, a zona de cisalhamento simples pode se desenvolver como uma fase incipiente de uma fratura de cisalhamento puro. Estas diferentes fraturas têm sido referidas como falhas direcionais por JAROSZEWSKI (1984). Sua geometria pode ser similar àquela das fraturas conjugadas produzidas por cisalhamento puro; entretanto, a direção local de σ_1 e σ_3 não pode ser usada para deduzir as principais sistemas de tensões regionais.

Mudanças nos valores e direções de tensões primárias, induzidas através da presença de fratura, foram previstas por ANDERSON (1951) e depois, consideradas por MOODY (1956), o qual observou que, na possibilidade

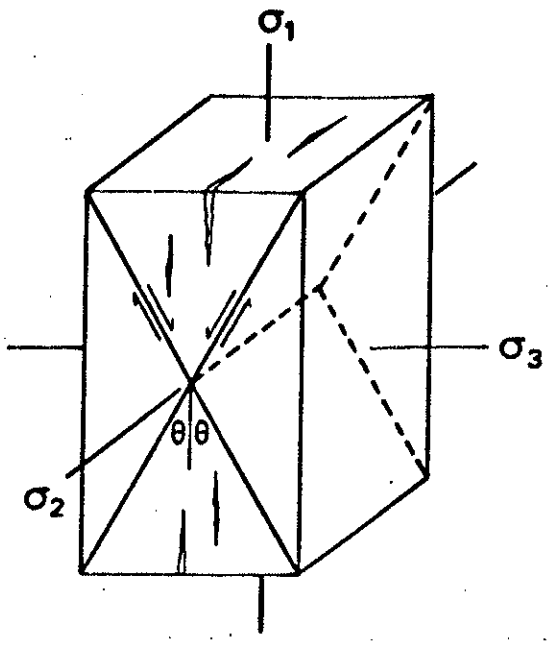


FIGURA 2.6 - DEFORMAÇÃO DA ROCHA SOB TENSÃO PURA.

OS PLANOS DE CISALHAMENTO CONTÊM A TENSÃO INTERMEDIÁRIA PRINCIPAL (σ_2) FAZENDO UM ANGULO (θ) COM A TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL (σ_1)

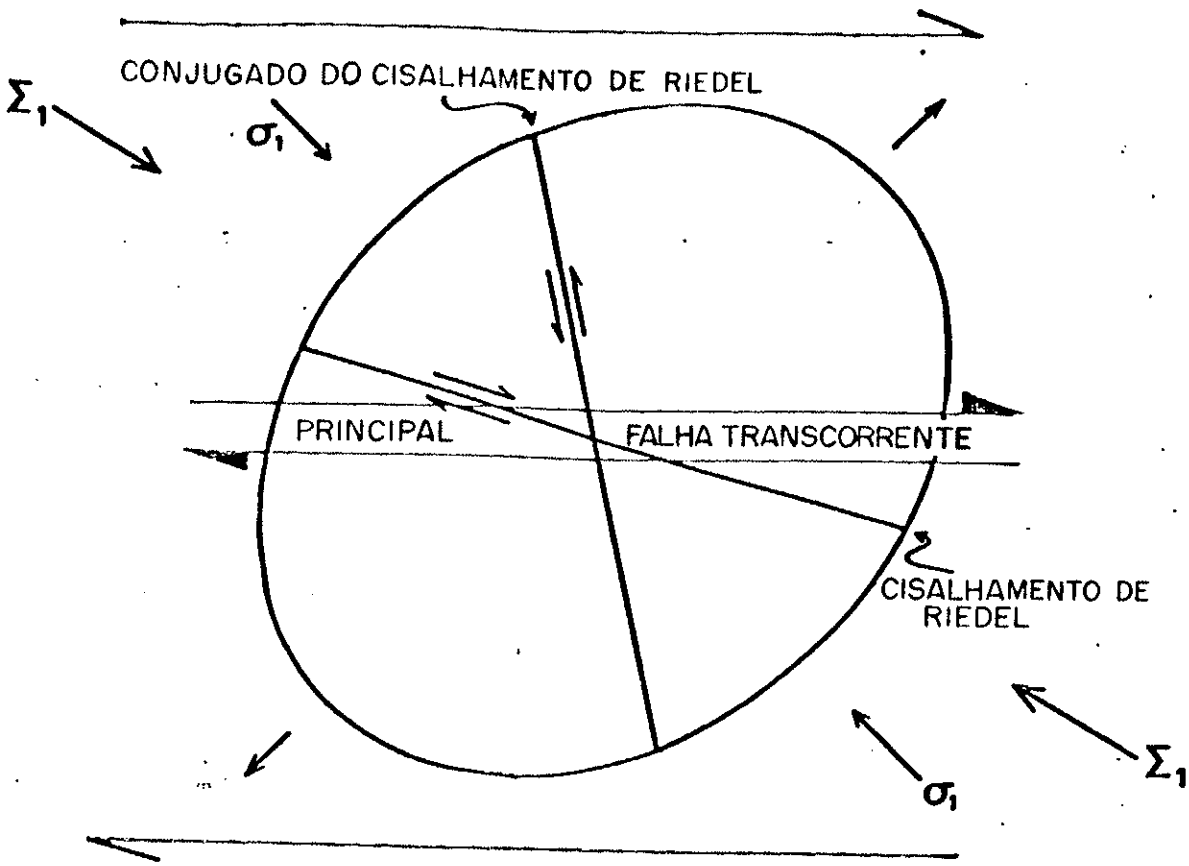


FIGURA 2.7 - DEFORMAÇÃO CISALHANTE SIMPLES ASSOCIADA A ZONA DE FALHA TRANSCORRENTE.

A TENSÃO REGIONAL HORIZONTAL PRINCIPAL (Σ_1) ENCONTRA-SE ROTACIONADA (σ_1)A MEDIDA QUE A DEFORMAÇÃO PROSSEGUE. NESTE CASO OS ESQUEMAS " EN ECHELON" DE RIEDEL E CONJUGADO DE CISALHAMENTO DE RIEDEL NÃO PODEM SER USADOS PARA ESTIMAR A TENSÃO REGIONAL DE CAMPO.

do desenvolvimento de uma falha de torção de segunda ordem, dobra de empurrão e falha subsdiária, originada por dobramento de segunda ordem, são produzidas falhas de empurrão e falhas de torção secundárias associadas. A extensão dos conceitos, em relação às estruturas de segunda ordem, sugere que haveria até oito direções de falhas de torção e quatro direções de dobramentos e/ou empurrão, sendo que, cada um deles resultaria com intensidade decrescente.Assim, a ocorrência de número quase ilimitado de direções de fraturas pode ser explicado em termos de tensões simples (Fig. 2.8).

Junta ou Diáclase é um plano que separa ou tende a separar em duas partes um bloco de rocha, primitivamente inteiro, ao longo do qual não se deu deslocamento, ou este deslocamento foi de reduzida amplitude.

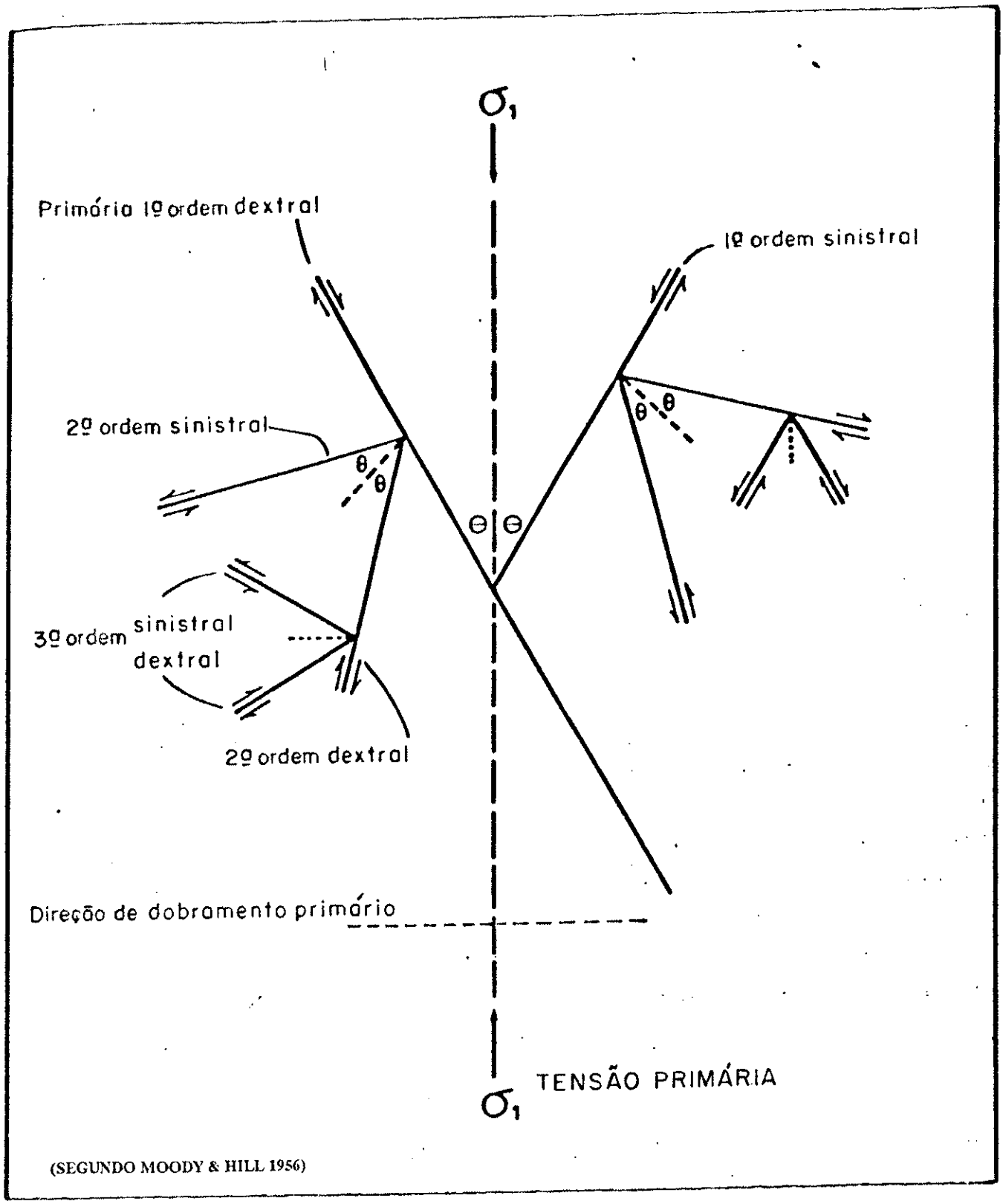
Há consenso de opiniões no que concerne as origens das juntas,ou as suas relações com as tensões que as geram. As juntas variam em tamanho, desde uns centímetros ou metros de comprimento, observados em afloramento das rochas, até lineamentos de alguns quilometros de extensão, observáveis sobretudo pelos métodos de sensoriamento remoto ou fotoanálise.

Conjunto de juntas , além daquelas relacionadas às dobras , são usualmente sub-verticais ou sub-horizontais, e ocorrem nos principais conjuntos que definem um paralelepípedo de juntas, KOHLBECK e (SCHEIDEGGER, 1977). Padrões regulares de juntas, indicam que as tensões envolvidas na suas formações não atuaram fortuitamente . Muitas juntas parecem imaturas ou de origem recente: aquelas vistas na superficie rochosa são típicamente fechadas, planares e quase não intemperizadas.

PRICE (1959,1966) considerou as juntas como resultado das baixas tensões laterais, relativas à tensões gravitacionais verticais, durante processos de sublevação e erosão. HANCOCK (1985) explicou, também, a origem das juntas verticais em termos de tensão pura, e reconheceu três tipos com base no ángulo do diedro (2θ) entre o par conjugado (Fig.2.8):

(i) Juntas de desenvolvimento paralelo
(ii) Juntas híbridas conjugadas
(iii) Juntas de cisalhamento conjugado ($2\theta > 60^o$).

Ele notou que conjuntos de juntas de cisalhamento conjugado eram mais variáveis na orientação de que as falhas de cisalhamento conjugado, reconhecendo a existência de um expectro de juntas, comprendendo um coaxial contínuo de extensão e fraturas híbridas, incluindo o ángulo diedro σ_1 de 45° . Ressalta que, visto o grande número de conjuntos de juntas possivelmente



(SEGUNDO MOODY & HILL 1956)

FIGURA 2.8 - FALHAS DE SEGUNDA ORDEM E SUBSIDIÁRIAS FORMADAS COMO CONSEQUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO DA TENSÃO PRIMÁRIA AO LONGO DA FALHA DE 1º ORDEM

representadas numa exposição simples, e pelo fato que 2θ pode ser tão pequeno quanto 10°, a relação de idade deve ser determinada no lugar do afloramento, em vez da análise de dados posteriormente.

2.2.7. Aqüíferos das rochas Fraturadas :

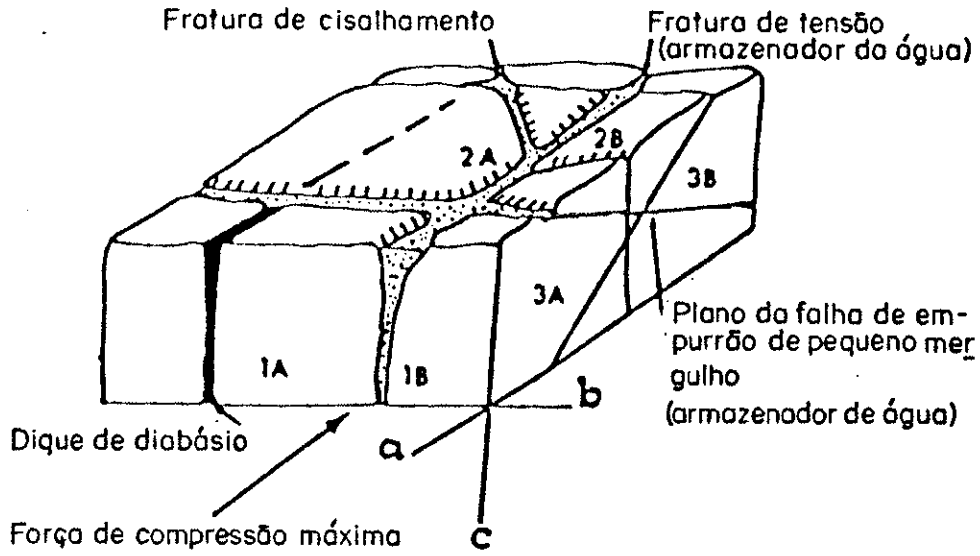
As zonas aqüíferas das rochas fraturadas ocorrem nos tipos ígneos e metamórficos e outras rochas de idade Précambriana, aflorantes ou com cobertura de detritos de menos de 10 metros.

Os padrões de fraturas das rochas criam um tipo de porosidade chamada *porosidadade de fratura*. Isto significa que, fraturas abertas existentes abaixo do nível fréatico podem armazenar água.

O modelo proposto por LARSSON (1984) é usado para ilustrar a possibilidade de se encontrar um padrão de fraturas com uma capacidade máxima de armazenamento (Fig 2.9).

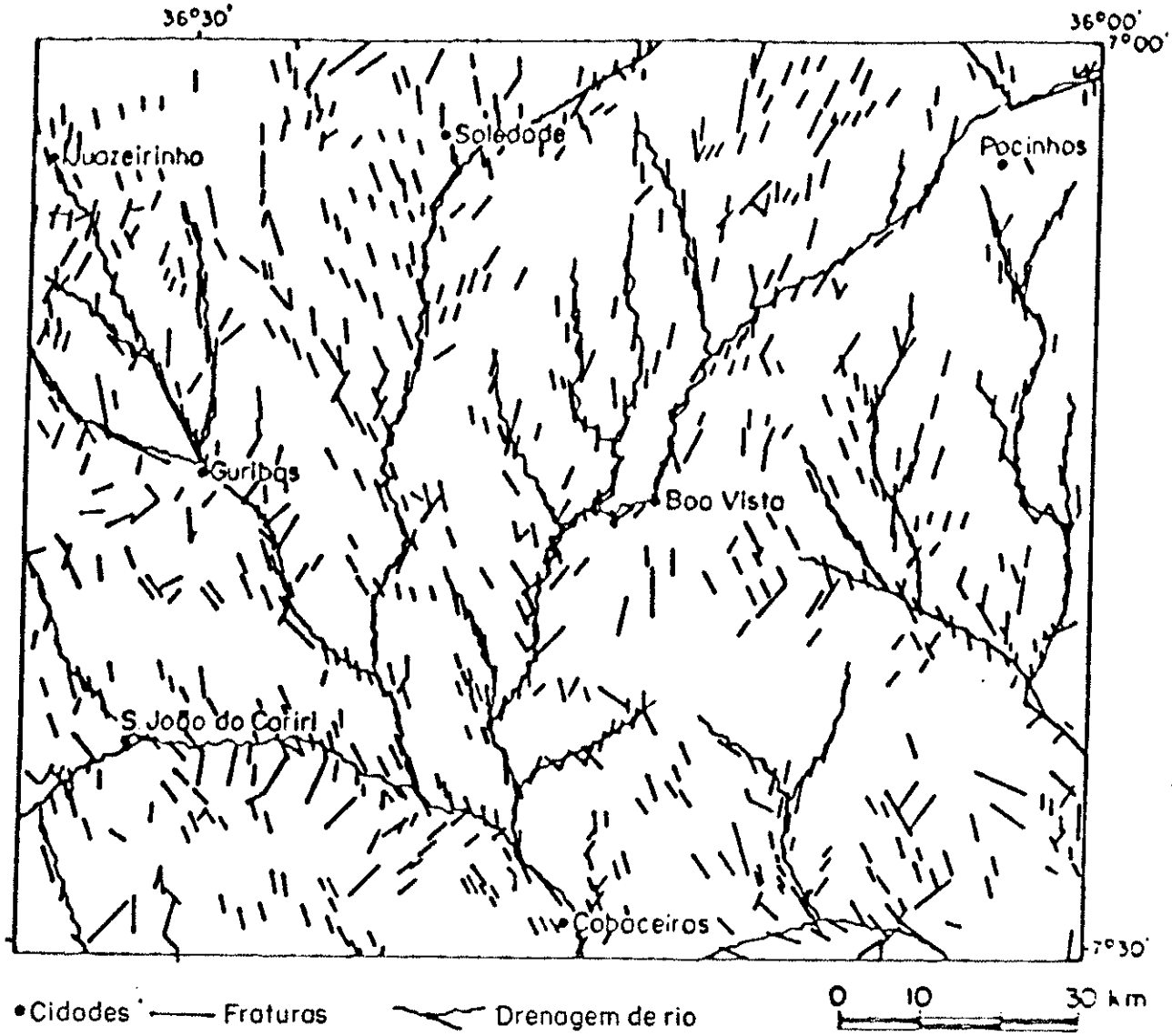
No modelo, o qual é resultado de multipla deformação rúptil , as fraturas 1A e 1B indicam os esforços de tensão. Os cisalhamentos 2A e 2B pertecem a uma fase de deformação rúptil e as fraturas 3A e 3B, provavelmente indicam uma fase posterior de empurrão .

Nas regiões semi-áridas, onde o manto de intemperismo é pouco espesso ou praticamente ausente, o movimento e acúmulo de água subterrânea ocorre em fraturas abertas. Também, em algumas regiões, a drenágem superficial está comumente sobreimposta ao sistema de fraturas, alimentando os aqüíferos situados abaixo, como ocorre no Estado da Paraíba (Fig. 2.10). Neste caso, a recarga de águas subterrâneas ocorre pela infiltração dos riachos que seguem estas zonas de fraturas e fissuras abertas. As corpos de água tendem a ser relativamente localizados e de pequenas dimensões, compreendendo áreas de dezenas a centenas de quilometros quadrados e profundidades que alcançam uma centenas de metros. Muitos corpos aqüíferos tornam-se descontinuos ao longo dos vales, nos quais fluem riachos que podem ser efémeros ou perenes. Isto divide os aqüíferos em pequenas células bem distintas, que funcionam como unidades hidrológicamente independentes em relação com condiçôes de recarga e descarga e de qualidade das águas.



(SEGUNDO LARSSON 1984)

FIGURA 2.9 - MODELO DE FRATURAMENTO DA ROCHA PELA DEFORMAÇÃO FRAGIL



FONTE: ALBUQUERQUE (1971)

FIGURA 2.10 - FRATURAMENTO TIPICO EM RELAÇÃO AOS RIACHOA FENDAS NAS DRENAGENS DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA PARAÍBA, BRASIL

O intemperismo produz uma zona de "saprock" ao redor das fraturas o qual serve para aumentar a vazão, como também prover o aumento no armazenamento e possível incremento na permeabilidade.

Portanto, o conhecimento das atividades tectônicas de uma região, junto com as estatísticas de vazões dos poços tubulares , formam a base do desenvolvimento de um modelo conceitual de fluxo de águas subterrâneas no meio fraturado.

O modelo, entretanto, é capaz de reproduzir as características mais significativas numa escala local, não sendo possivel extrapolar a nível regional .

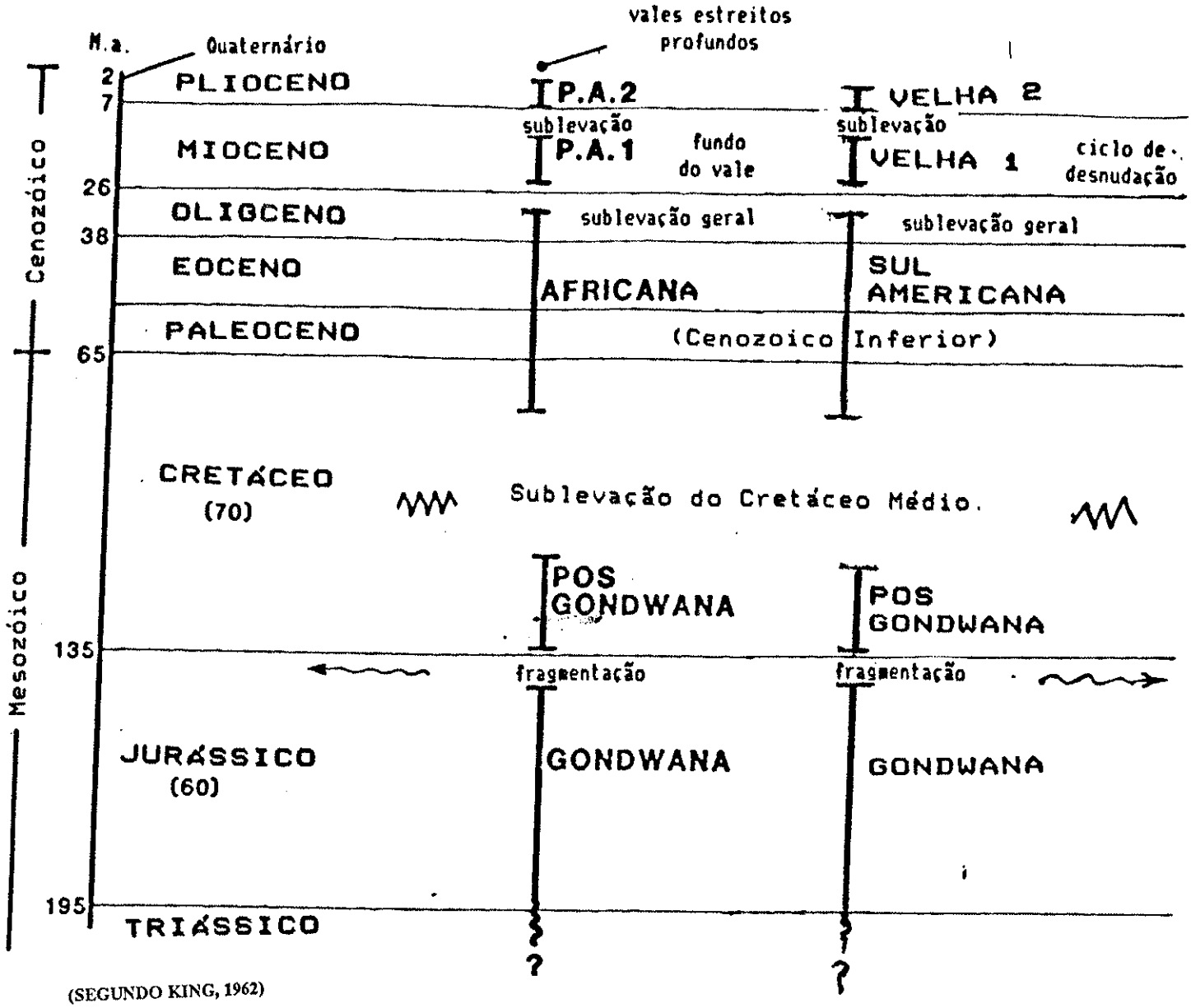
Contextos hidrogeológicos-tectônicos que dependem da detecção das fraturas individuais , as vezes requerem mais conhecimento da tectônica, particularmente por estudos através dos métodos do sensoriamento remoto. Um modelo tectônico não poderá ser generalizado como base para locação de poços, pois, mesmo quando se conhece a história de uma deformação não há garantias e certezas de que as características originais da falha ou junta tenham sido preservadas através de eventos repetitivos de deformação.

As demais incertezas se devem as diferentes posssibilidades de respostas das estruturas, devido ao intemperismo das falhas e juntas. As falhas estão associadas com a zona de desintegração/fissuramento e por isto, espera-se um maior grau de intemperismo do que nas juntas. Consequentemente, as zonas da falhas mostram em geral, maior permeabilidade que as das juntas . Por outro lado, o maior avanço de intemperismo nas falhas resulta na formação de produtos argilosos não solúveis que podem preencher estas falhas e assim reduzir a sua permeabilidade.

Por isto, o conhecimento sobre o sucesso e fracasso dos projetos de poços realizados nestas regiões devem ser integrados para desenvolvimento dos modelos hidrogeológicos.

2.3. INFLUÊNCIAS DOS CÍCLOS DE EROSÃO

Grandes exposições continentais das rochas précambrianas em áreas tropicais foram submetidas ao intemperismo e erosão por longos períodos de tempo geológico. A fase de erosão caracteriza-se por períodos de inatividade, durante os quais a superfície é aplainada, seguido-se períodos de atividade



(SEGUNDO KING, 1962)

FIGURA 2.11 - ESQUEMA GLOBAL DAS SUPERFÍCIES DE EROSÃO; BRASIL E ÁFRICA

tectônica (sobrelevação e retorno isostáticos). O resultado é uma sequência de superfícies escalonadas de relevo baixo separadas por zonas de declives abruptos .

KING (1962) propos um esquema global de superfícies de erosão, que pode servir de base ao mapeamento hidrogeológico. No esquema de desenvolvimento das superfícies, proposto por King (Fig 2.11), a superfície mais antiga (a superfície de Gondwana), desenvolveu-se principalmente durante o Jurássico, no tempo em que a América do Sul, África, Índia e Austrália eram uma unica massa territorial, "GONDWANALAND" . No final do Jurássico a fragmentação da "GONDWANALAND" formou as grandes massas continentais, e inicia a superfície da erosão Pos-Gondwana, essencialmente durante o Cretáceo Inferior . Distúrbios no Cretáceo Médio iniciaram a formação da superfície Africana e superfície Sul Americana, no Brasil, dando origem as maiores e principais superfícies, nas quais foi esculpida a maior parte da paisagem da atualidade. A sublevação limitada da crosta da terra, no começo e fim do Mioceno, produziu as superfícies Pós-Africanas e os mais recentes eventos erosionais quaternários. No Brasil, o equivalente a superfície Pós-Africana é a superficie Velhas, causada pela aplainação suave do antigo ciclo de erosão. As atividades erosionais da água, variando de atividade essencialmente mecânica (Pediplanação) à atividade essencialmente química (etchplanação), aplanaram as superfícies de erosão McFARLANCE (1987b).

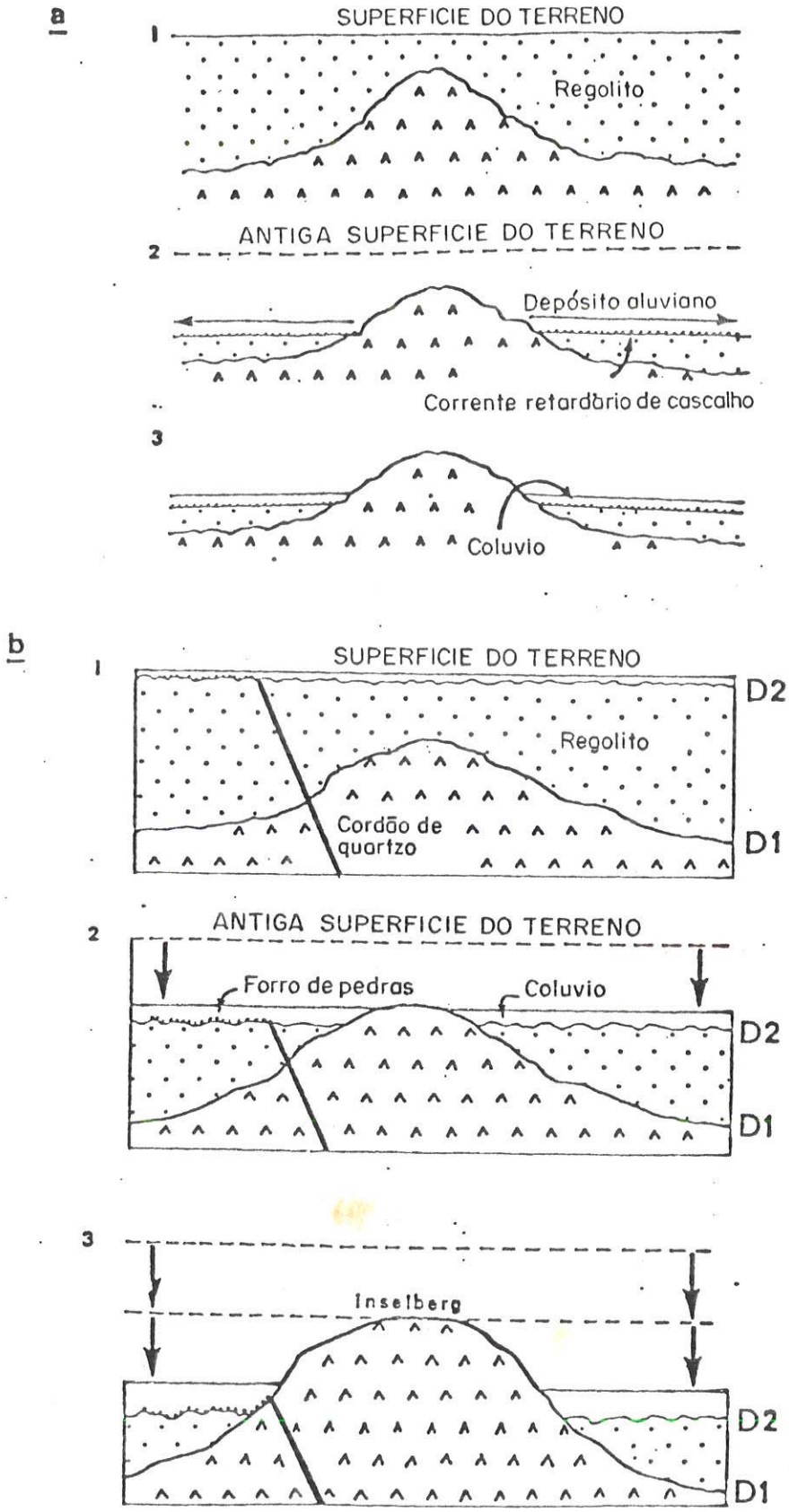
2.3.1. Contexto de Pediplanação :

A formação de pediplanos como ilustra Fig. 2.12a, compreende as fases seguintes:

a) - A alteração de uma superfície antiga, sob condições climáticas úmidas, resultando no desenvolvimento de um profundo regolito sobre uma superfície basal irregular de alteração.

b) - A desnudação deste manto de regolito, sendo retirado laminarmente sob condições áridas e semi-áridas, deixa um revestimento de pedregulho.

c) - Os pediplanos podem ficar cobertos por coluvio, quando as condições tornam-se mais úmidas, por exemplo, por atividade das termitas que expõe o saprolito à superfície.



Fonte:McFARLANE, (1987b)

FIGURA 2.12 - PROCESSOS DE PEDIPLNAÇÃO E ETCHPLANAÇÃO

(a) PEDIPLANAÇÃO (b) ETCHPLANAÇÃO

2.3.2. Contexto de Etchplanação:

Os processos de ecthplanação compreendem as estapas seguintes, comforme mostra a Fig. 2.12b.

a) - Há o desenvolvimento do perfil da alteração intempérica com rebaixamento da superfície basal desta alteração, por dissolução dos minerais (D1). A lixiviação torna-se progressivamente mais avançada na porção superior do perfil, até que a dissolução seja suficientemente agressiva perto do topo do perfil (D2), sendo capaz de causar colapso do saprolito (in situ), para formar um manto coluvial. Uma linha de pedras residuais se forma na base do coluvio, por colapso dos veios de quartzo do saprolito .

b) - Ambas as dissoluções (D1) e (D2) continuam a se aprofundar. Por isto a paisagem abaixa-se e a espessura do coluvio aumenta. Onde as rochas são particularmente resistentes à alteração, D2 ultrapassa D1, deixando rochas frescas aflorando .

c) - Os contínuos rebaixamentos das frentes de dissolução e superfície topográfica produzem progressivamente coluvios mais profundos. A rocha sã emerge como um "*INSELBERG*", aumentando o ângulo de declividade e eventualmente é erodida gravidativamente.

As consequências da pediplanação e etchplanação são distintas em termos hidrogeológicos. No modelo de pediplanação de áreas úmidas, a infiltração de água através da superfície do manto coluvial encontra uma interface ou superfície que pode impedir a infiltração e minimizar a recarga para o saprolito logo abaixo.

No caso do plano de etchplanação, a interface entre o saprolito e o coluvio foi criada pela água que se infiltrou, causando uma lixiviação diferencial, enfraquecendo e provocando o colapso do saprolito; à superfície coluvial é essencialmente saprolito arruinado. Portanto, em algumas situações onde existem tipos de rochas mais suscetiveis a alteração que outras, o avanço da infiltração e do colapso do saprolito varia em profundidade.

O resultado é uma interface em forma de bacia, entre o saprolito e o coluvio. Em função de ter sido produzida pela infiltração a recarga é mais favorável, alimentando o escoamento básico .

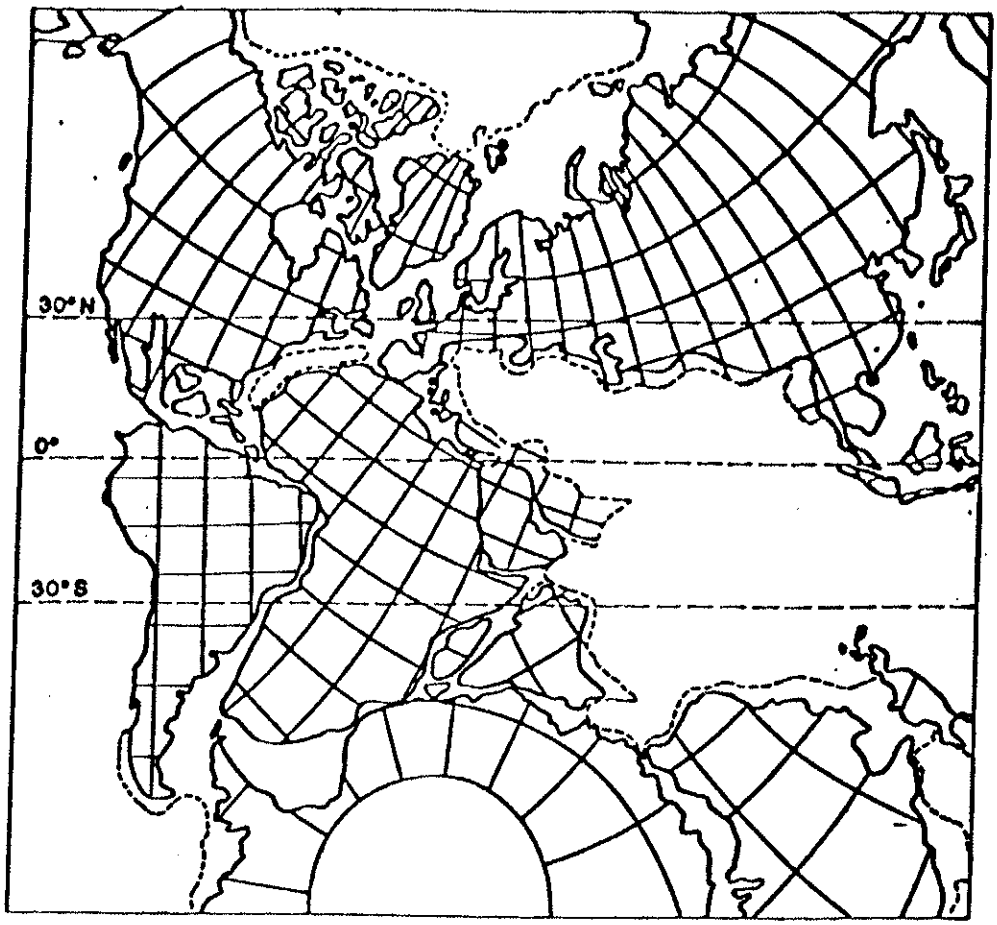
A segunda consequência é sobre a qualidade da água. No modelo de pediplanação, o mecanismo essencial é a evacuação de solutos pelo fluxo subterrâneo o qual ataca os minerais mais resistentes.

No caso de etchplanação , a maioria do material evacuado pela água subterrânea aparece numa forma que pode escapar a filtração, caso as partículas não excedam 0.45 microns. A filtraçao, em alguns casos, não é suficiente para garantir a potabilidade das fontes,especialmente, em áreas rurais.

O conhecimento sobre mudanças climáticas são de grande importância para definir o potêncial hidrogeológico de diferentes superfícies antigas de erosão. Isto porque, as grandes superfícies de erosão foram se formando durante um longo período de tempo, com seu desenvolvimento abrangendo mudanças climáticas, e por isso admite-se a possibilidade de que uma superfície possa ter sido desenvolvida sob diferentes condições, resultando ora de etchplanação (clima ümido) ora sob outras condições de clima seco, com intensas chuvas periódicas que conduzem a pediplanação (McFARLANE, 1987 b).

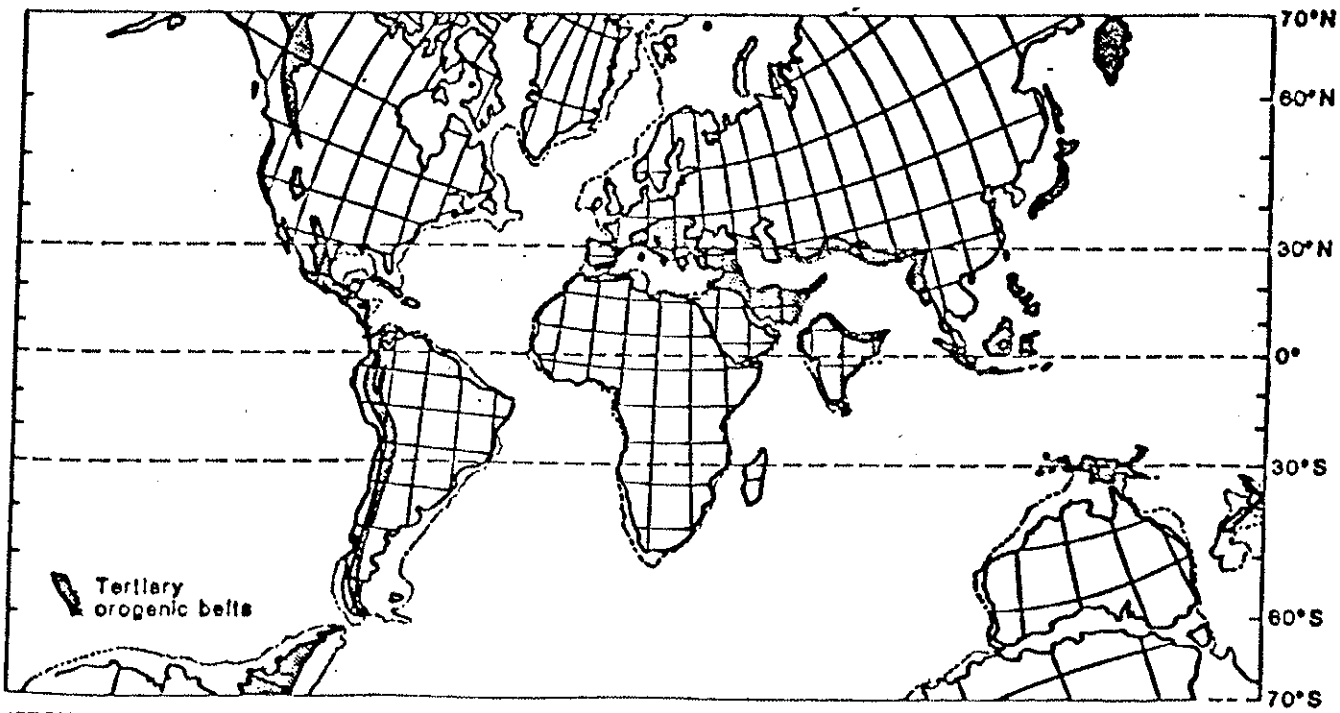
As Figuras 2.13 e 2.14 (BARDOSSY, 1981), mostram duas posições dos continentes, durante o período de formação das principais superfícies de erosão. Se compararmos estas com as posições continentais atuais, pode-se notar que as de Gondwana foram divididas na medida em que os continentes eram separados. A America do Sul ficou estável enquanto à África, Índia e Australia deslocaram-se no sentido antihorário, com movimento lateral progressivo (norte), ficando os demais continentes parados em relação ao ponto central da América do Sul. Assim, o efeito das mudanças climáticas, causados pela separação dos continentes, encontra-se mais marcado na Índia e Australia do que na África e América do Sul, e é maior na África do que na América do Sul.

Em poucas palavras, a deterioração intemperíca dos perfis das superfícies "Africana" ou " Sul Américana " e Pós-Africana" ou "Velha" refletem a variabilidade do intemperismo relacionado com as mudanças climáticas associadas aos processos da deriva.



(SEGUNDO BARDOSSY, 1981)

FIGURA 2.13 - POSIÇÃO DOS CONTINENTES NO JURÁSSICO MÉDIO



(SEGUNDO BARDOSSY, 1981)

FIGURA 2.14 - POSIÇÃO DOS CONTINENTES DURANTE O EOCENO MÉDIO

2.4. QUADRO HIDROGEOLÓGICOS DO BRASIL

O Brasil situa-se entre as latitudes 5° Norte e 34° Sul e entre as longitudes 35° Oeste e 74° Oeste e cobre uma superficie total de 8.511.000 Km^2, aproximadamente.

Com mais de 66% da sua população morando ao longo da faixa costeira , o Brasil é um país altamente urbanizado. Grandes potenciais de recursos hídricos de superfície ocorrem nesta área, além disso, aqüíferos sedimentares e rochas alteradas do embasamento fornecem recursos adicionais de água subterranea

Os problemas que se apresentam são mais propriamente de qualidade, devido a falta de saneamento básico nos centros urbanos , falta de uma política de uso e ocupação do meio fisico e a baixa qualidade tecnica dos poços.

A demanda total de água (consumo domestico, irrigação e industrias) corresponde a menos 1% do potêncial hidríco de superfície, além dos cerca de 200.000 poços já perfurado para abastecimento publico e industrial, REBOUÇAS (1988).

Os tipos climáticos sobre esta área variam desde equatorial úmido, semi-árido, semi-úmido e temperado. A temperatura média no país é de aproximadamente 20° C. A distribuição sazonal das precipitações varia grandemente, mas a maior parte do país recebe uma precipitação anual média entre 1.000 e 3.000 mm. Somente uma pequena parte da região Nordeste é deficiente em precipitações anuais, da ordem de 400 a 800 mm por ano, como mostrado na Fig. 2.15.

As cotas topográficas ultrapassam raramente os 800m e cobrem a metade do Brasil com um relevo pouco acidentado. Este contexto geográfico encerra uma densa rede fluvial, responsável pela média anual de vazão de 278.976 m^3/s (Quadro 2.1).

As rochas do embasamento ocorrem sobre cerca da metade do país, e fazem parte da plataforma Pré-Cambriana Sul-Américana; 36% do país são ocupados por bacias sedimentares. O embasamento e as bacias sedimentares são recobertos, localmente, por sedimentos superficiais, principalmente não consolidados.

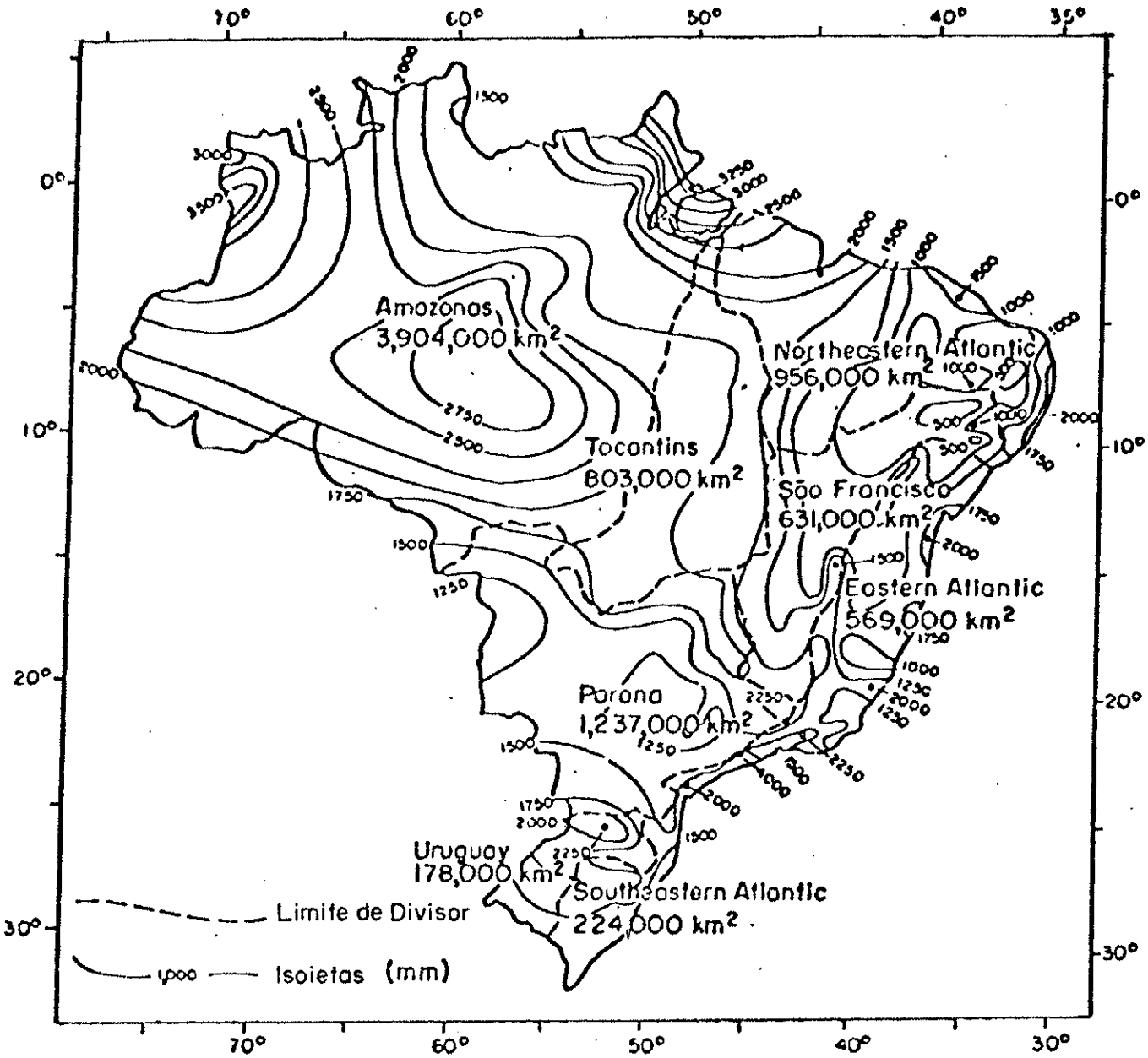


FIGURA 2.15 - PLUVIOMETRICA MÉDIA ANUAL NO BRASIL E BACIAS HIDROGRÂFICAS (MM/DNAEE 1980)

Principais Bacias	Área (10^3 Km^2) (m^3/seg.)	Vazão Específica (l/sec/Km^2)	Média de Descarga Anual
1 - Amazonas	6.112	37,5	229.200
2- Tocantins	803	13,6	10.921
3 - Atlântico Norte/ Nordeste	966	7,1	6.858
4 - São Francisco	631	5,3	3.344
5 - Atlântico Leste	569	6,5	3.690
6 - Paraná	1.237	13,6	16.823
7 - Uruguai	178	20,2	3.600
8 - Atlântico	224	20,3	4.540
BRASIL	8.512	15,3	278.976

QUADRO 2.1 - DESCARGA DOS RIOS DO BRASIL (DNAEE-1982)

Rebouças et al (1987).

A descrição e avaliação dos recursos de água subterrânea do Brasil estão tratados em REBOUÇAS (1979,1988) e REBOUÇAS e CAVALCANTE (1987). Quatro tipos principais de aqüíferos foram distingüidos: aqüíferos superficiais não confinados ; aqüíferos confinados e profundos; aqüíferos de rochas alteradas do embasamento e zonas aqüíferas de rochas fraturadas do embasamento (Figura 2.16).

Os aqüiféros superficiais não confinados, geralmente são formados por sedimentos clásticos não consolidados da Era Cenozóica. Correspondem às aluviões e áreas de dunas com espessura de menos de 100 m.

Os aqüíferos confinados e profundos ocorrem nas bacias sedimentares regionais (Quadro 2.2). As bacias sedimentares cobrem cerca de 36% do país e são formadas por sedimentos clásticos, com porosidade intergranular. Os aqüíferos confinados atingem dezenas ou centenas de metros de espessura, separados por camadas semi-permeáveis contínuas sobre grandes áreas .

A qualidade da água subterrânea é geralmente boa para abastecimento público, industrial e agrícola.

Em cerca de 63% do país (5.346.000 Km^2) ocorrem rochas cristalinas e metamórficas pre-cambrianas. Em geral, são deformadas e são constituidas por gnaisses, xistos, migmatitos e granitos.

Neste contexto, dois importantes domínios hidrogeológicos podem ser destacados : O manto de intemperismo (alteração das rochas cristalinas) e as rochas cristalinas duras (fraturadas) aflorantes .

Excluindo-se o Nordeste semi-árido , ou seja, sobre 90% da área de ocorrência do embasamento precambriano, as rochas cristalinas mostram um manto de intemperismo com 10 a 50 m de espessura, chegando a alcançar mais de 100 m em alguns lugares da região sudeste.

A vazão média de quase 2.000 poços é de 9 m^3/h. A capacidade específica situa-se entre 1,0 e 5,0 $m^3/h/m$, (Figura 2.17). Os totais de sólidos dissolvidos são inferiores a 500 mg/l, de maneira geral .

Na região semi-árida do Nordeste do Brasil ocorrem aproximadamente 400.000 de Km^2 de rochas cristalinas fraturadas sem manto de

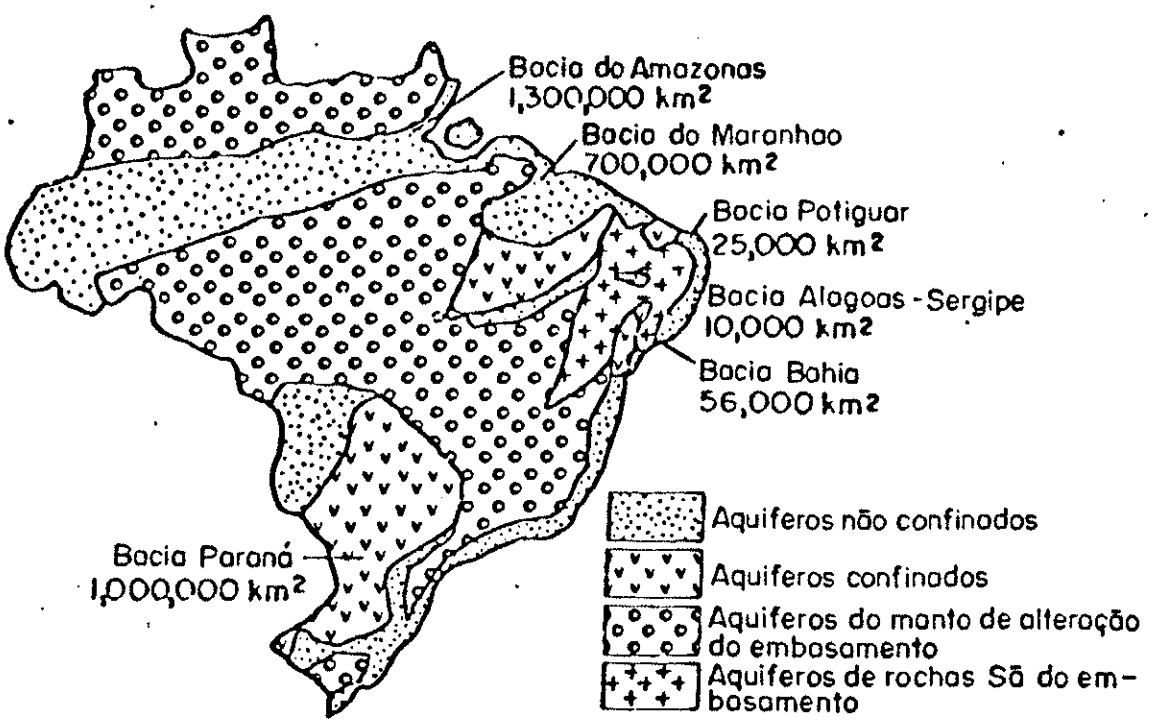
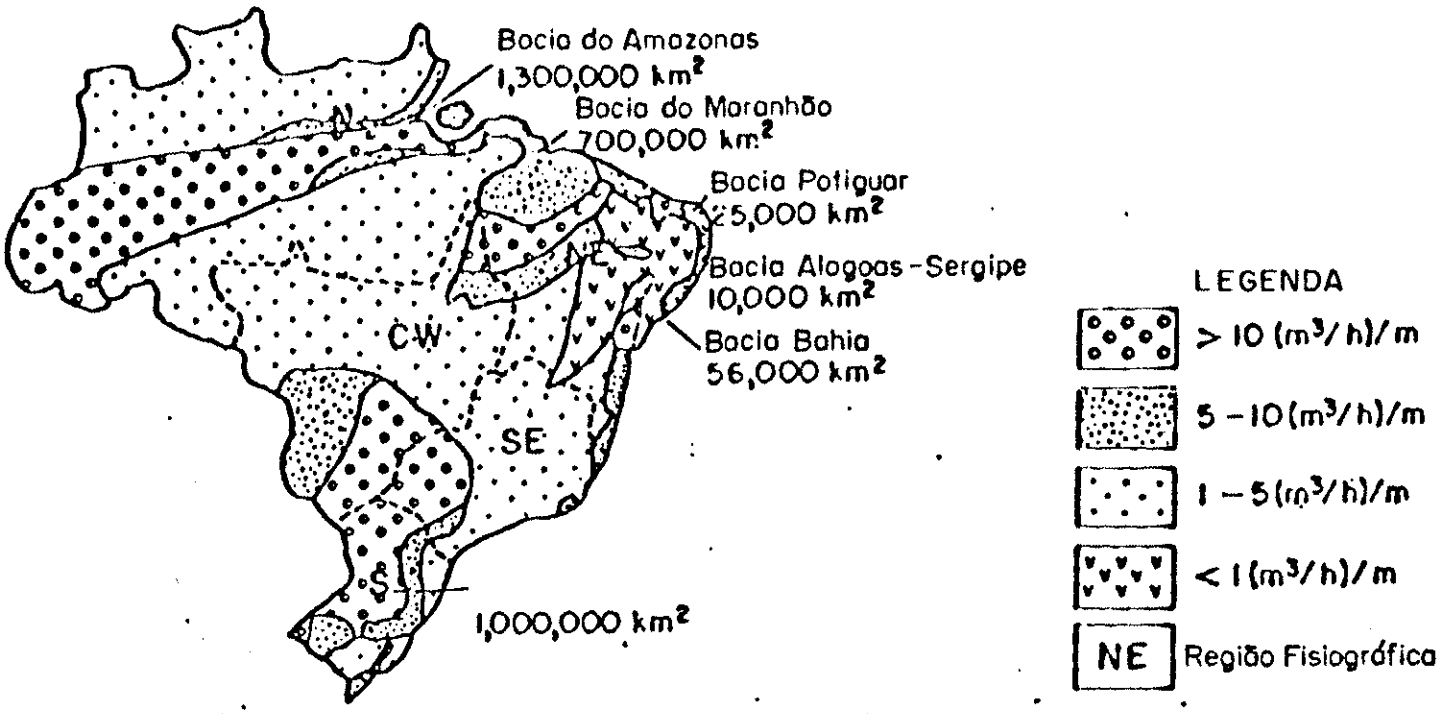


FIGURA 2.16 - POTÊNCIAL D'ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL

FONTE: REBOUÇAS et al (1987)

Formação Aquífera	Área (10^3 km^2)	Principias Sistemas Aquíferos	Volumes Armazenadas Km^3
Zonas Fraturadas do Embasamento	600	Zonas de Rochas Fraturadas	80
Manto de Alteração do Embasamento	4.000	Manto de Alteração e Fraturas Associadas	10.000
Bacia do Amazonas	1.300	Depositos Terciário	32.500
Bacia do Maranhão	700	Fm. Corda-Grajau	17.500
		Fm. Sambaiba	
		Fm. Poti-Piaui	
		Fm. Cabeças	
		Fm. Serra Grande	
Bacia Potiguar-Recife	23	Gr. Barreiras	230
		Fm. Jandaira	
		Gr. Acre-Berberibe	
Bacias Alagoa-Sergipe	10	Gr. Barreiras	100
		Fm. Marituba	
Bacia Bahia	56	Fm. Marizal	840
		Fm. São Sebastião	
Bacia do Paraná	1.000	Fm. Bauru	50.000
		Fm. Serral Geral	
		Fm. Botucatu	
Depósitos Superficiais		Alúvio	411
TOTAL		Dunas	111.661

QUADRO 2.2. - RESERVAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL (Rebouças et al 1987).



FONTE: REBOUÇAS et al (1987)

FIGURA 2.17 - PRINCIPAIS PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO BRASIL

intemperismo expressivo. Esta área está frequentemente sujeita a enchentes e períodos de seca . Somadas as dificuldades gerais de armazenamento subterrâneo, o problema de abastecimento é agravado pela ocorrência de água altamente mineralizada.

A capacidade específica média dos poços nos aqüíferos destas zonas fraturadas é inferior a 1,0 $m^3/h/m$. A profundidade otima na qual ocorre água nas fraturas das rochas é de 60 m. A água nas zonas fraturadas no Nordeste do Brasil têm sólidos totais dissolvidos com índices maiores que 2.000 mg/l REBOUÇAS e CAVALCANTE (opt. cit.).

2.5. QUADRO HIDROGEOLÓGICOS DA ÁFRICA OCIDENTAL

Com uma área de 4,20 x 10^6 Km^2 a Africa Ocidental ocupa 14% da superfície total da África , entre latitudes 25° 10' norte e 3° 50' sul.

Mais de 75% da população africana, cerca de 350 milhões, mora nas áreas rurais e cerca de 7.5% do total da população mora ao sul do Saara. Em 1973 foi estimada pela UNDESA que o embasamento geológicos cobre uma área habitada por mais de 50 milhões de pessoas. Prover adequados suprimentos de água para estas pessoas é o maior problema para os vários países africanos.

É importante notar, contudo, que tanto o uso atual, como a demanda total da população existente, são pequenos, em comparação com os recursos renováveis disponíveis. Assumindo o uso urbano de 100 litros por pessoa por dia e uso rural de 30 litros por pessoa por dia, para o consumo doméstico e serviços, o total do abastecimento deve ser equivalente entre 3.2 e 6.4 Km^3 por ano (WRIGHT 1985).

Portanto,no sentido global, a disponibilidade de água não é o problema na África, mas sim, o capital para cobrir os custos decorrentes para porpocionar abastecimento à uma população dispersa, sem acesso as formas rápidas de desenvolvimento.

A superfície topográfica é moderadamente rugosa com a parte central formada por planaltos e planícies, com altitudes entre 200 e 500 m. O planalto é bordejado por zonas montanhosas, tais como: as montanhas Futajalon (1.537 m) e Camarões (4.380 m) , enquanto as margens leste estão limitadas pelo oceano Atlantico .

O maior deserto do mundo, o Saara (7 x 10^6 Km^2) extende-se desde a Costa do Atlântico até o Mar Vermelho. A segunda maior área árida no continente é o deserto do Kalahari (0.9 x 10^6 Km^2) que se localiza ao Sul do continente Africano. Os dois desertos somados compõem cerca de 26% da área total da África.

Entre os maiores rios podem, ser mencionados o Niger , Senegal, Volta e Gambia (Fig. 2.18). O ECA (1976) estima a taxa anual da água da superfície de 2.481 Km^3.

Em geral , quatro zonas climáticas podem ser identificadas na região Africana como mostra Fig 2.19 :

I - Uma zona Sub-Tropical é encontrada nos extremos finais norte e sul do continente, onde a precipitação é máxima no inverno e mínima no verão. A taxa anual de precipitação varia de 100 mm a 510 mm. O mapa das precipitações anuais no continente é mostrado na Fig 2.20.

II - Uma zona árida geralmente situa-se entre as latitudes 10° e 30° norte, através da parte norte do continente, e entre 15° e 30° na costa Oeste e na região Sul. Os desertos do Saara e Kalahari estão nestas regiões. A taxa de precipitação varia de Zero a 100 mm/ano.

III - Uma zona Tropical encontra-se entre os latitudes 10° norte e 20° sul. Este tipo de regime tem duas precipitações maximas no ano. A média anual nesta região atinge de 1.200 mm a 2.000 mm.

IV - Uma zona Equatorial, localizada entre as latitudes 10° norte e 10° sul. Ali chove durante o ano todo, e são observadas duas precipitações máximas. A precipitação mais forte atinge 1.600 mm a 3.200 mm/ano.
Destes, regimes II, III e IV ocorrem na Áfica Ocidental.

Em termos geológicos a maioria da África compreende rochas do complexo cristalino Pré-Cambriano, constituído principalmente de gnaisses, xistos, filitos, migmatitos e granitos, os qais ocorrem principalmente no Leste e Oeste do continente . Sobre o resto ocorrem formações sedimentares compondo as áreas arenosas. Depósitos de aluviões e conglomerados são encontrados nas bacias do Chad, Niger e Volta.

Os maiores aqüiféros (Figura 2.21), ocorrem, em geral, nas grandes bacias sedimentares como a do Chad, Nilo e Congo. Na maior parte da

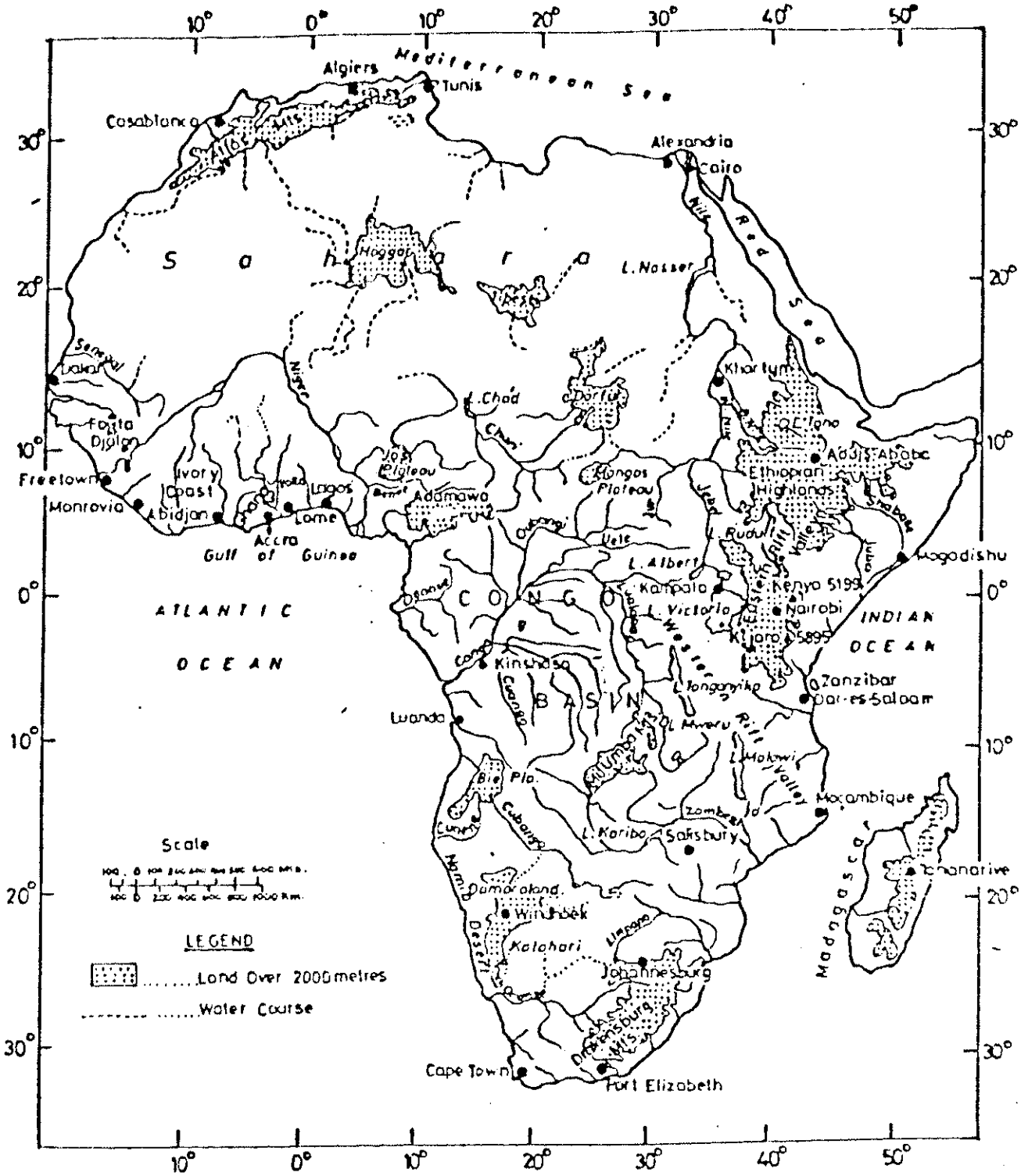


FIGURA 2.18 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ÁFRICA

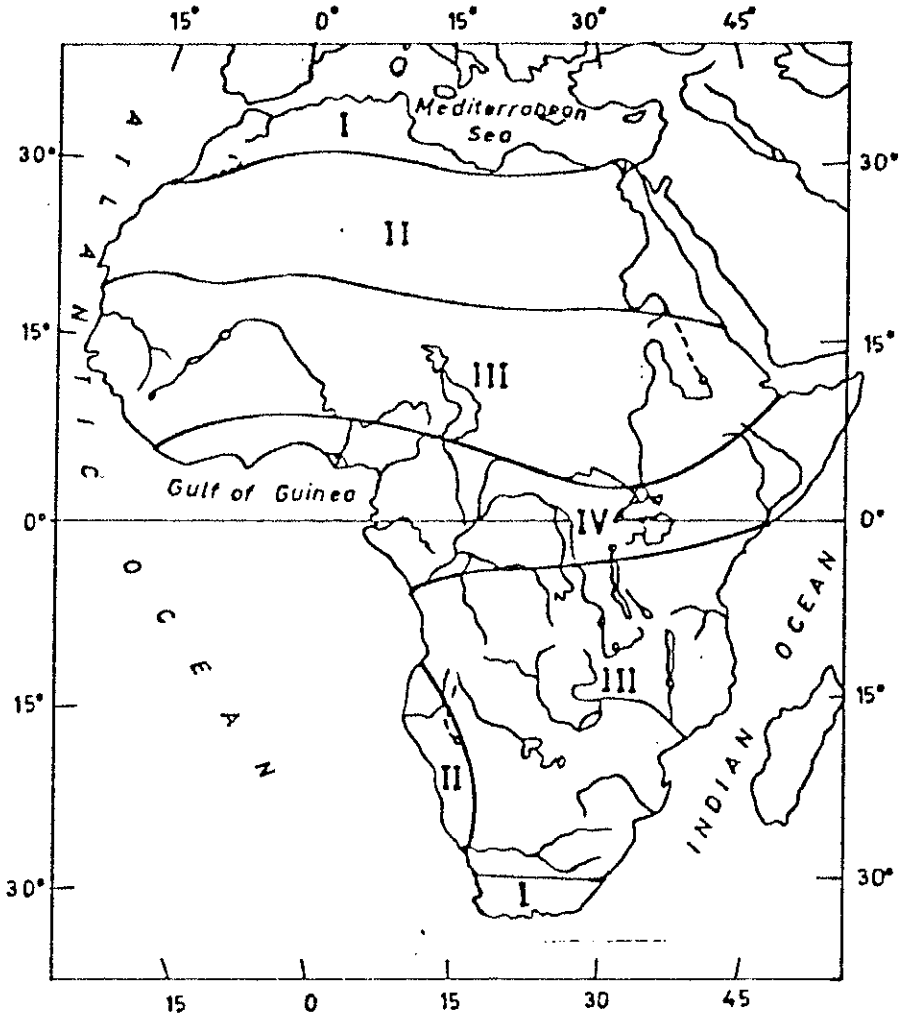


FIGURA 2.19 - VARIAÇÃO ANUAL DA PRECIPITAÇÃO NA ÁFRICA

1-Subtropical II-Saara III-Tropical IV-Equatorial
com duas máximas, em primavera e outono.

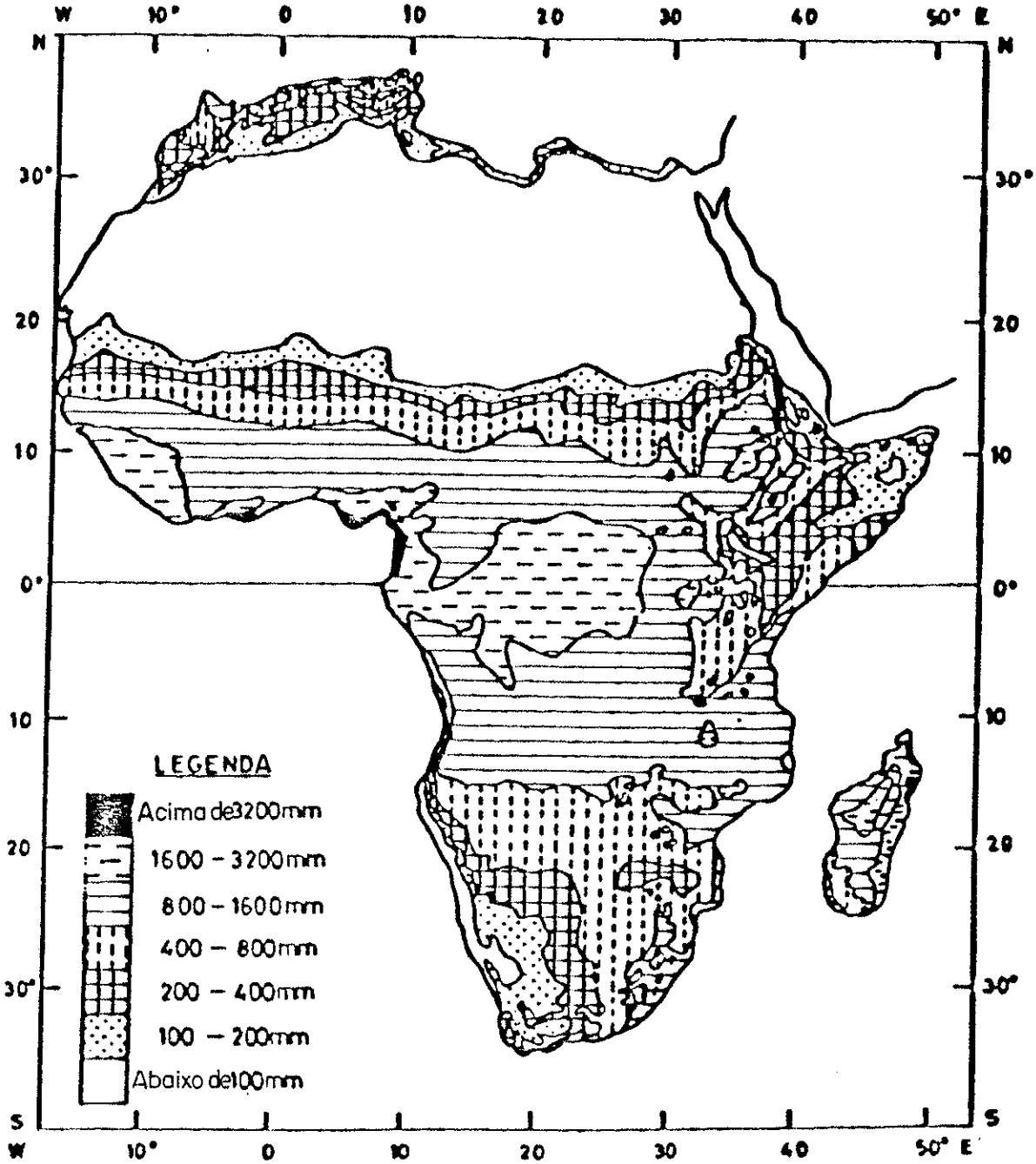
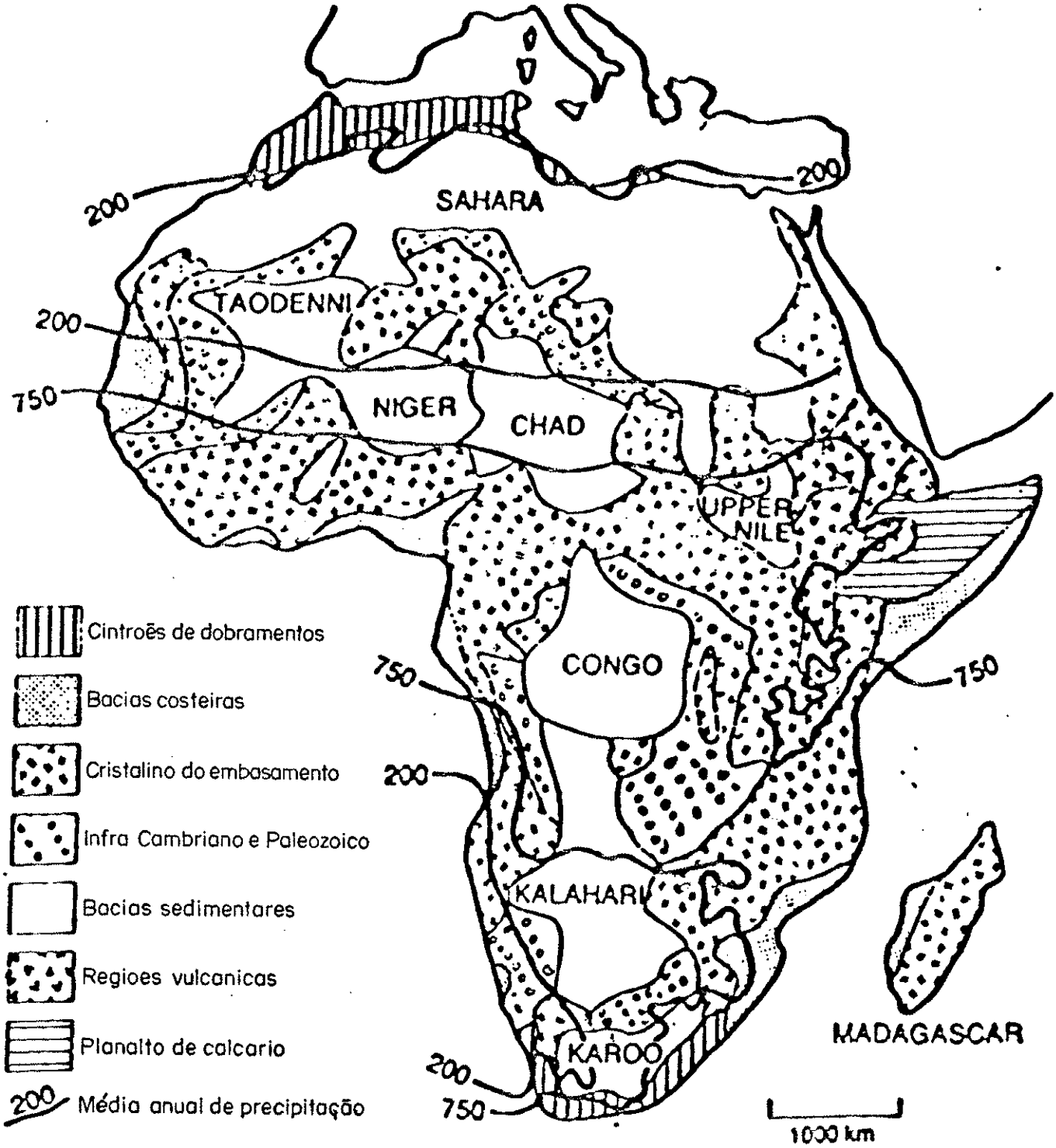


FIGURA 2.20 - PLUVIOMÉTRIA MÉDIA ANUAL NA ÁFRICA TROPICAL



FONTE: DIJON - (Les Eaux Souterraines de L'Afrique)

FIGURA 2.21 - PRINCIPAIS PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DA ÁFRICA

África Tropical ocorrem rochas pré-cambrianas relativamente impermeáveis. O complexo é constituido por uma mistura heterogênea de rochas cristalinas predominantemente graníticas, incluindo grandes áreas de meta-sedimentos. As rochas cristalinas afloram quase inteiramente na Costa do Marfim, Libéria e Serra Leoa e sobre cerca de 50% de Gana e Nigéria.

A água subterrânea ocorre em zonas de fissuras das rochas cristalinas e nos mantos intempéricos superficiais. As vazões de poços tubulares de embasamento variam bastante, mas tendem a ser baixas. Os registros da UNDESA (1973) mostram valores de 5 m^3/h obtidas de granitos e gnaisses, e somente 1 m^3/h nos xistos.

A capacidade específica dos poços situa-se entre 4.3 $m^3/h/m$ e 0.18 $m^3/h/m$. A capacidade específica dos poços também decresce marcadamente com a profundidade .

3. CARACTERÍSTICAS FISIOCLIMATICAS DAS ÁREAS DO ESTUDO

3.1. PARAÍBA

3.1.1. Elementos Do Clima

O clima predominante na Paraíba é do tipo tropical semi-arido. Existem três diferentes dominios climaticas no Estado (Fig. 3.1).

i) A orla litorânea que, juntamente com a região do brejo paraíbano apresenta precipitação pluviometrica anual superior a 900 mm/ano numa probabilidade de 75% e evapotranspiração potencial inferior à precipitação entre sete e quatro meses do ano.

ii) A região agudamente semi-arida, limitada aproximadamente, pelo meridianos 35° $50'$W e 57° $00'$ excetuando as áreas topograficas elevadas, caracterizada por precipitação pluviometrica inferior à 800 mm/ano ao numa probabilidade de 75%, e apresentando, em média, meno de dois meses com índice pluviometrico superior à evapotranspiração potencial.

iii) As regiões de transição entre as anteriores, ainda semi-aridas, com precipitação anual inferior à 800 mm/ano e superior à 300 mm/ano, a um taxa de probabilidade de 75%, apresentando, em média dois a quatro mese por ano com precipitação superior à evapotranspiração potencial ALBUQUERQUE (1984).

A distribuição da precipitação no tempo varia em função de localização geografica (latitude e longitude), da altitude, condições como ventos, úmidade, evapotranspiração etc.

Enquanto na região mais oriental as precipitações ocorrem no inverno, na parte ocidental da área as precipitações são mais intensa no outono.

O verão marca o começo das precipitações no sertão e no litoral, enquanto na primavera inexistem precpiptações em ambas regiões.

A temperatura média anual do ar tem uma variação relativamente pequena ao longo do ano sendo de 25° C e 21° C os valores médios extremos. Nas áreas mais secas do estado as temperaturas médias varia entre 24° C (média da bacia do rio Paraiba) e 26° C (demias bacias). In relação à média das

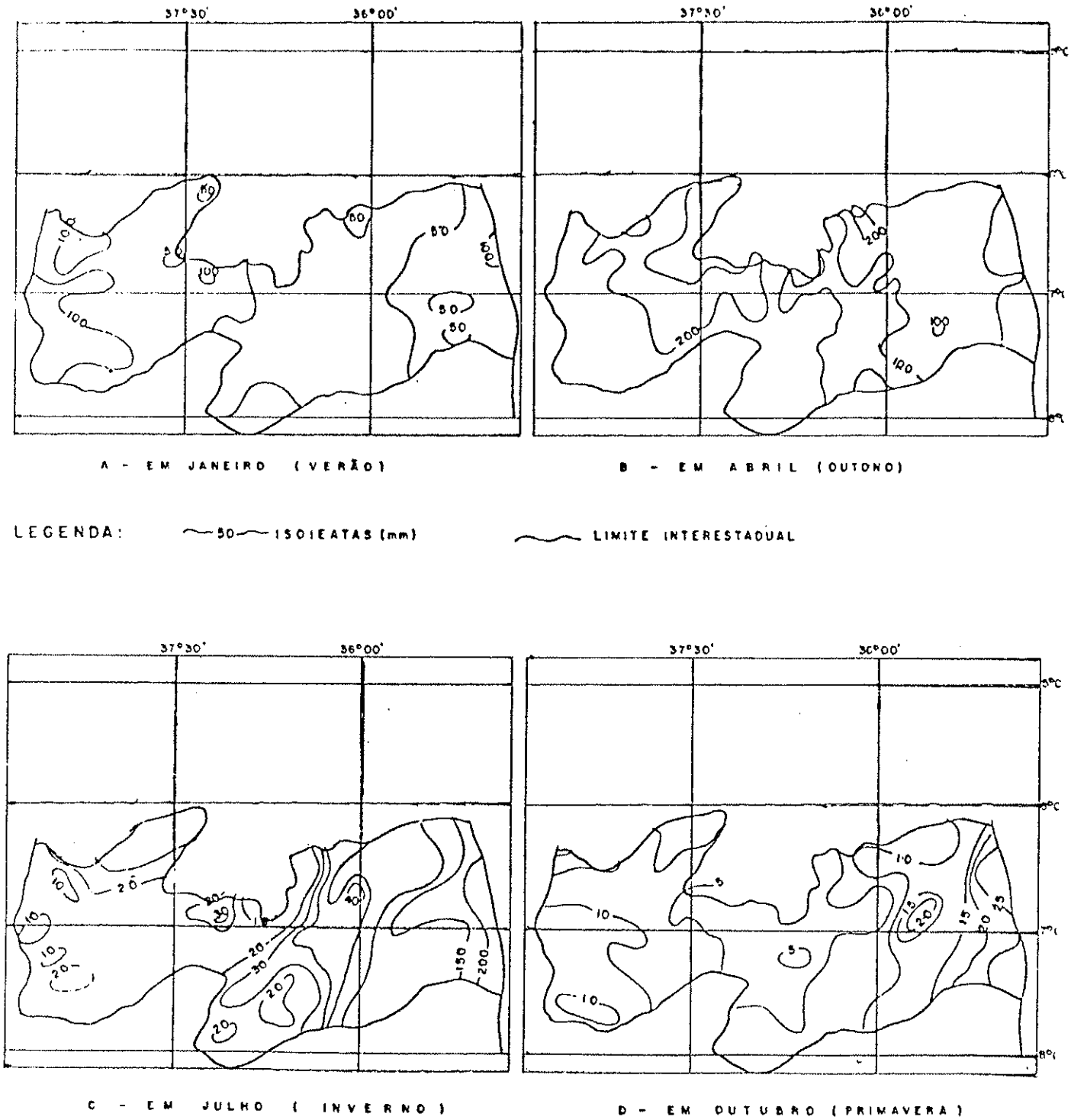


FIGURA 3.1 - PLUVIOMETRIA MÉDIA NA PARAíBA

temperaturas mínima a variação situa-se entre 18°C nos brejo de altitude e 22° C para outra áreas.

Para média das máxima a variação está compreendida entre 27° C (brejos) e 33° C (bacia do rio Piranhas), com um valor intermediário de 30° C no resto das bacias .

3.1.2. Balanço Hídrico

A Fig 3.2 mostra o balanço hídrico executado pela em três postos situados em três locais diferentes RADAMBASIL (1982).

Em Sapé, apresenta uma deficiência hídrica de 462 mm, distribuída nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro e dezembro, nos meses de abril e maio ocorre a reposição de 125 mm, enquanto que o exedente hídrico, que é de apenas 51 mm, vai ocorrer nos meses de junho e julho. Nos meses de agosto e setembro tem-se a retirada da água que atinge 125 mm.

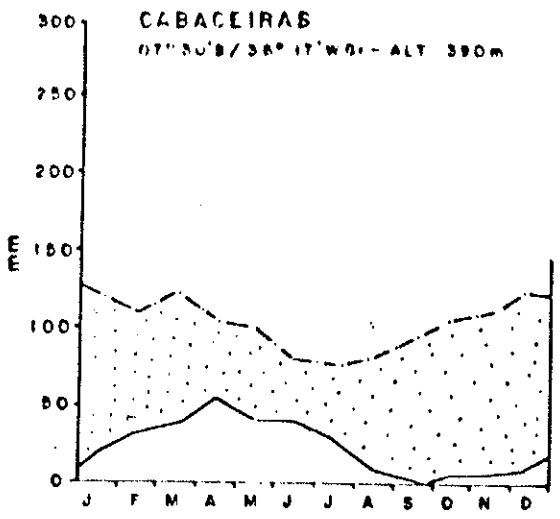
Em Cabeceira., apresenta-se com deficiência de 956 mm, distribuídos em todos os meses do ano, com maior concentração no período de outubro e janeiro.

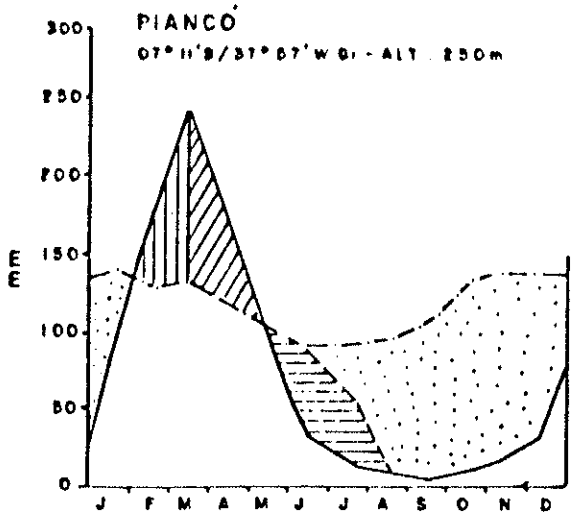
Enquanto em Piancó a deficiência é de 637 mm distribuída nos meses de janeiro, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. O exedente hídrico é de apenas 67 mm e ocorre nos meses de fevereiro e março.

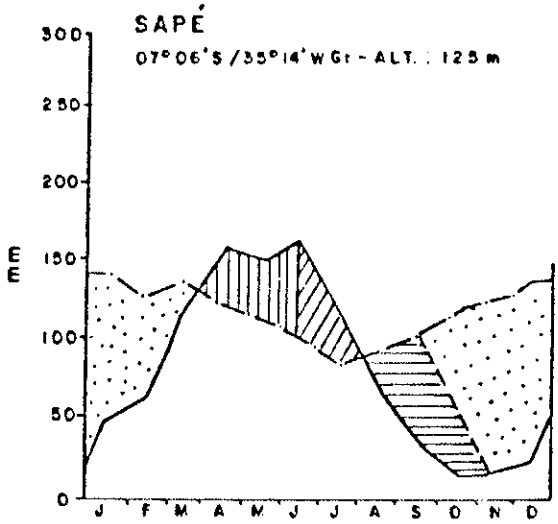
A úmidade apresenta uma grande diversificação. Da costa leste para o litoral oriental varia entre 80 e 85% e na vertente ocidental do planalto do Borborema, eleva-se no inverno até 90% no interior como na costa setentrional onde existe escacez de água e a porcentual de evaporação de 60 à 65%.

3.1.3. Aspectos Morfológicos

O relevo da área é relativamente monótono, representado na maior parte por pediplanos onde se assentam formas residuais (morros, serras e serrotões) e ainda, extensas chapadas delimitadas por escarpas relativamente abruptos.







FONTE: RADAMBRASIL LEVANTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS VOLUME 23

FIGURA 3.3 - BALANÇO HÍDRICO DE THORNWAITE PARA PARAÍBA

As elevações topográficos variam entre 100 e 1000 m acima do nível do mar. O ponto mais alto é o "Pico Jabre" localizado na Serra Teixeira a 1.197 m.

O limite sul da área corresponde a fronteira entre os Estados da Paraiba e Pernambuco, onde situam-se as Serras dos Teixeira, Cariris Velhos e Cariris Novos, com altitudes variáveis entre 800 a 1197m.

A Planalto da Borborema que se acha dissecado em vários patamares, revela a característica geomorfológica mais destacada da área. Destaca-se um conjunto de elevações na porção centro-sul cabeceiras do rio Paraíba, como na região de Campina Grande, Soledade e Juazeirinho, prolonga-se na direção norte até 06° 00'. Em cotas mais reduzidas, entre 300 e 500 m, esse dorsal morfológica estende se para o norte até a região Lajes e Pedro Avelino no Rio Grande do Norte.

Essa característica morfológica desempenha um papel importante na climatologia e hidrogafia e, por extenso, na hidrogeologia das rochas cristalinas. De acordo com ALBUQUERQUE (1971), distinguem-se três ou quatro patamares de pediplanos, resultantes dos sucessivos aprofundamentos do nível de base, causados por movimentos epirogenéticos que afetam a região, depois dos depósitos Cretáceos, e que se extendem durante o período Terciário.

A primeira superfície de aplanamento corresponde a superfície mais alta chamada Cimeira, a qual foi criada pelas sucessivas deposições dos sedimentos Cretáceos de origem fluvial predominante a base do precambriano.

A superfície Cimeira corresponde a superfície da Serra do Teixeira que foi identificada por KING (1956) como Pós-Gondwana.

A segunda superfície de aplanamento, abaixo da superfície somital, está representada na área por retalhos residuais, cujos elevações variam de 750 a 800 m, e estão relacionados também com os depositos de Teixeira (PB) e Porto Alegre (RN), João do Vale (RN), Santana dos Matos (RN) e Bom Bocadinho (PB). Esta superfície é identificada por KING como Sulamericana.

O terceiro degrau de escolamento geomorfológico é representado por elevações em torno de 550 m, que aparecem como um pediplano mais ou menos contínuo, com a coalescência dos detritos coluviais acumulados nas vertentes dos maciços residuais . Atualmente, essa superficie, junto com o quarto

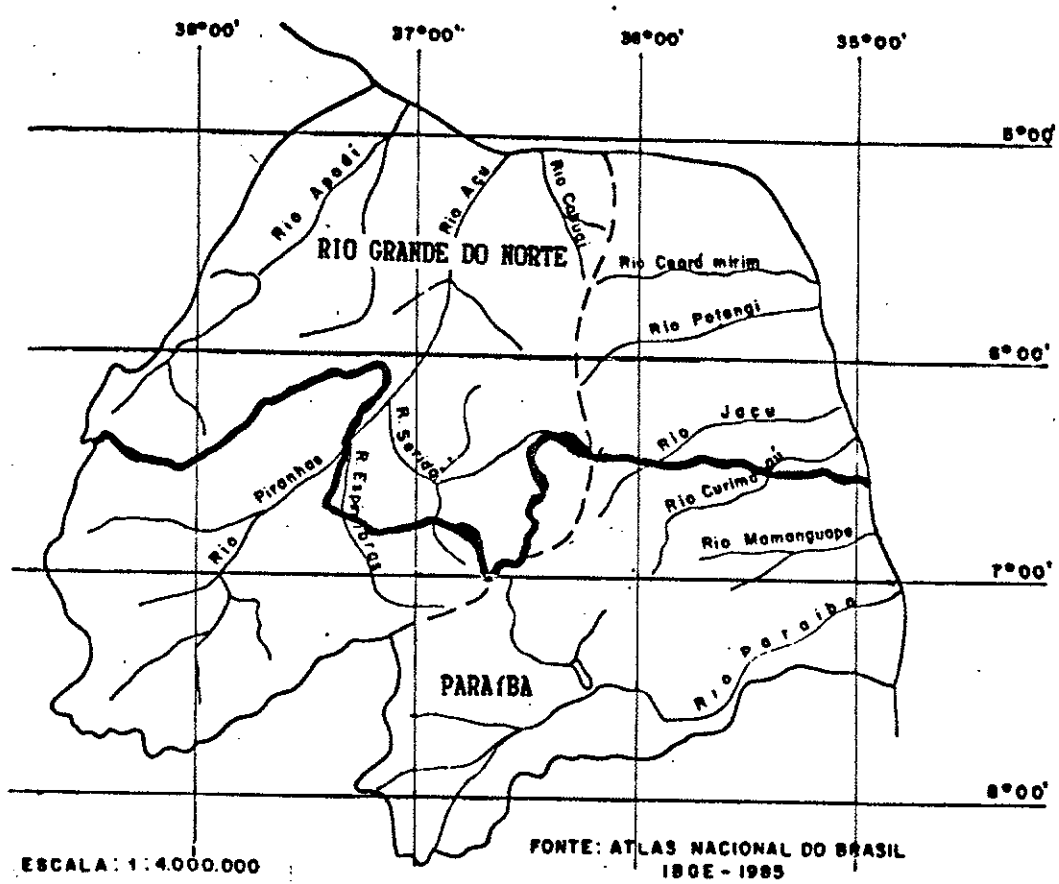


FIGURA 3.2 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA PARAIBA E RIO GRANDE DO NORTE.

patamar, com elevação de 250 m, está considerada como uma das unidades originalmente chamadas por KING (op cit) como a Superficie das Velhas .

Todas estas variações morfológicos e seus respectivos depósitos, mostram a existência de paleo-climas muito variados de úmido à sub-húmido e de semi-árido à árido.

O Estado da Paraíba está dividido, em duas regiões bem caracterizadas hidrográficamente : as bacias da vertentes leste, onde os rios drenam de oeste à leste, e as bacias da vertente oeste na qual os cursos de água são orientados de sul para norte Fig. 3 .3. O rio Piranhas e seus afluêntes sendo a única bacia hidrográfica da região oeste, cobre uma área de 38.393 Km^2. As bacias de região leste são Curimatão (5.150 Km^2), Mamanguape (5.081 Km^2) e Paraíba (20.128 Km^2).

3.2. SÃO PAULO

3.2.1. Elementos do Clima

O Estado é dividido em seis tipos climáticos, com base na classificação de Koppen: Deste destacam-se aqueles que ocorrem na área do embasamento geológicio.

Af - tropical úmido sem estiágem, com temperatura média do mês frio não inferior a 18 °C e precipitação média do mês mais seco superior a 60 mm. Cerca de 4000 Km^2 estão nestas condições, somente no litoral, representando 1.6% da área total do Estado.

Aw - complexo cristalino menos quente tropical úmido com inverno seco, recebendo menos de 30 mm de chuva no mês mais seco e mesmas características de temperatura do clima Af. Compreende as cabeceiras das bacias dos rios Atibaia e Jundiaí, São Bernardo do Campo, Sorocaba, até Apiaí, na parte mais setentrional e continental do Estado.

Cwa - complexo cristalino mais quente subtropical ou temperado quente, com inverno seco caracterizado pela temperatura média do mês mais frio inferior a 18 °C, enquanto que a do mês mais quente é superior a 18 °C. Quanto as chuvas do mês mais seco, as condições são similares às do tipo climático Aw. Ocorre na região a leste de uma linha imaginaria ligando Campinas, São João da Boa vista e Mococa.

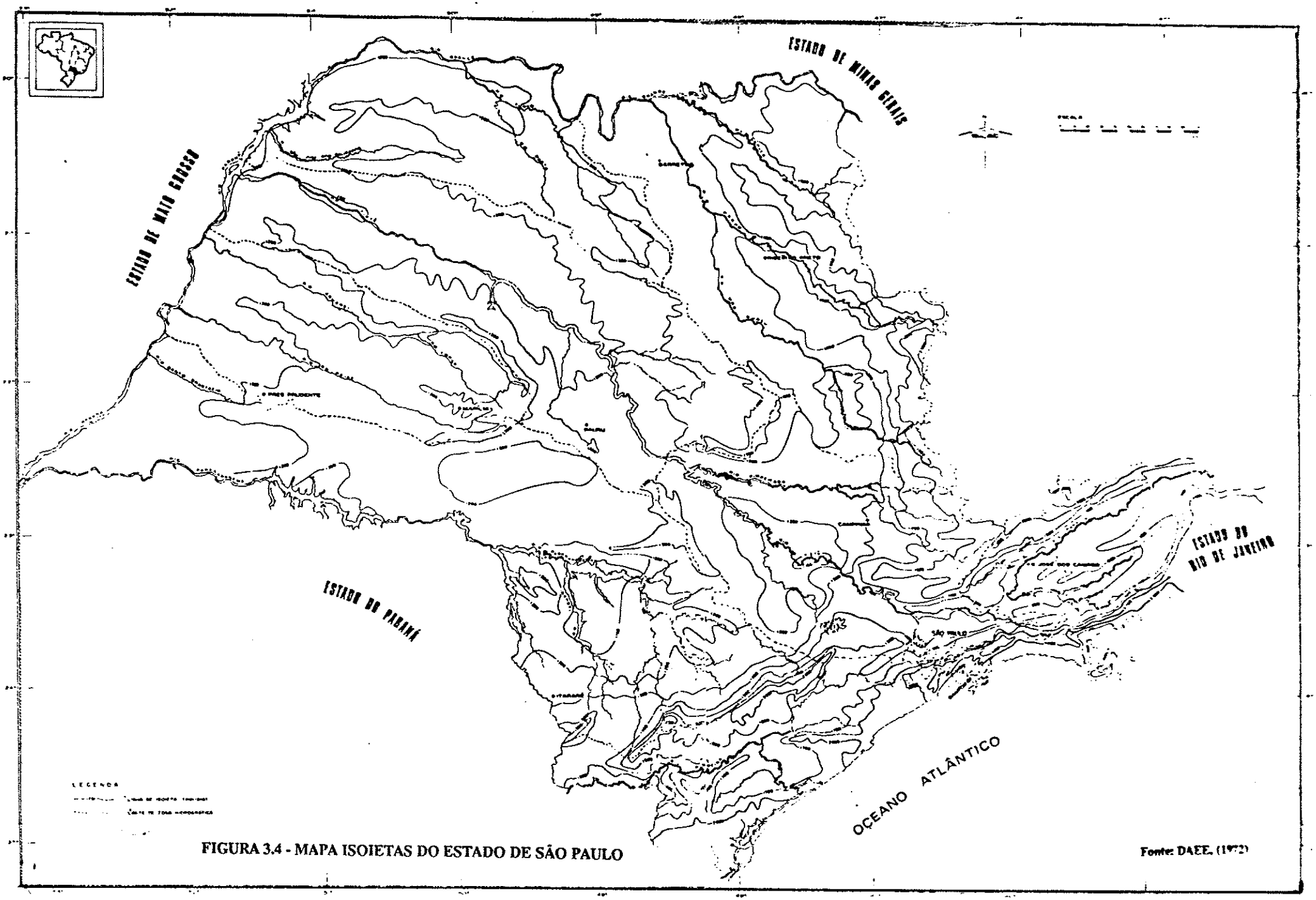


FIGURA 3.4 - MAPA ISOIETAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Fonte: DAEE. (1972)

O mapa de isoietas anuais para o Estado de São Paulo (Fig.3.4), mostra que as precipitações anuais são essencialm. :nte influenciadas pela cota e distância do oceano. As maiores quantidades anuais foram encontradas ao longo dos cumes de montanhas que correm mais ou menos paralelos à costa. A linha de contorno do máximo de chuva, que limita a área de precipitação anual - 4.000 mm - passa logo acima de Santos. A linha de 3.000 mm limita uma faixa estreita, correndo numa direção O - E, ao longo das montanhas costeiras, a oeste de Santos até o limite do Estado. Mais para o interior, as quantidades anuais de chuva decrescem drásticamente.

Em geral, 70 a 80 % da precipitação anual ocorre durante o período de novembro a março. Os meses mais secos são julho e agosto.

O mês mais frio é julho. Na parte NW do planalto ocidental, porém, os trinta dias mais frios compõem-se em média, da segunda metade de junho com a primeira de
agosto. O mês mais quente é o de fevereiro, mas na parte continental do Estado é o de janeiro.

A úmidade relativa média diária permanece elevada durante o ano , sendo acima de 80% durante a estação chuvosa, e atinge um mínimo de 50 % durante o período seco.

A evaporação anual mais baixa ocorre perto da costa, sendo de 1.000 mmm por ano. A mais alta evaporação anual ocorre na parte central do Estado, nas vizinhanças de Bauru e Lins, com valores acima de 2.000 mm/ano.

3.2.2. Aspectos Geomorfológicos

Existem cinco regiões naturais ou províncias geomorfológicas no Estado de São Paulo divididas de acordo com os seguintes aspectos : relevo, altitude, orientação das formas topográficas, processos de erosão e sedimentação. As províncias geomorfológicas são Planalto Atlantico, Província Costeira Depressão Periférica, Cuestas Basalticas e Planalto Ocidental. Destas destacam-se aqueles que são constituidas por rochas précambrianas:

i) Planalto Atlântico - é constituído por uma série de planaltos cristalinos e por duas depressões terciárias: São Paulo e Taubaté. A série de planaltos se estende entre Apiaí, Queluz e Poços de Caldas ao NE com linhas estruturais de

direção NESE. A altitude média varia entre 1.000 e 1.300 m. Sendo a máxima de 2.000 m em Campos do Jordão e a mínima de 700 m nas depressões.

ii) Província Costeira - A Província Costeira é composta por duas regiões diferentes : (a) região de serras cristalinas elevadas, com escarpas erosivas que drenam diretamente para o mar e (b) região de baixas litorâneas com cota máxima de 70 m. A baixada litorânea ocorre ao longo da costa, exceto no extremo NE, onde as serras ficam próximas ao mar.

A rede hidrográfica superficial, entre as bacias atlânticas e as bacias do rio Paraná, está situada ao longo do Planalto Atlântico em sua parte meridional.

Dos rios principais, somente dois correm para o oceano Atlântico, assim mesmo depois de um longo percurso paralelo à costa : Rio Ribeira, que corre nas serras e baixadas costeiras desaguando no oceano no extremo sul do Estado. O rio Paraíba do Sul, que começa a correr na direção SW, muda perto de Jacareí o seu percurso para a direção NE , com sua desembocadura formando o limite entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

O rio Paraná e seu afluente Rio Grande formam a base da drenagem de todos os outros rios importantes. Destes, o Paranapanenma, Tietê, Pardo e afluentes nascem no planalto cristalino atlântico.

O paralelismo foi facilitado pelo falhamento perpendicular à direção do embasamento cristalino. A característica mais destacada deste sistema paralelo é a forma retangular de cada rio com tributários bem curtos.

3.2.3 Balanço Hidrico

Encontram-se na Quadro 3.1 os resultados do balanço hídrico para médias multianuais para as sub-bacias tipicas dos terrenos cristalinos, obtidos pelo DAEE (1981) utilzando um modelo dterministico de simulação hidrológica; o **Modelo Mero** . O balanço hidríco calculou a evaperação rael escoamento total e escoamento básico relativos a cada sub-divisão. Também foram calculadas as relações entre escoamento total e precipitação, escoamento básico e precipitação e entre escoamento básico e total.

O escoamento básico o qual alimenta as reservas d'água subterrânea varia entre 160 e 330 mnm/ano, sendo mais alto nas sub-bacia de

RIO	Atibaia	Atibaia	Jundiaí	Jundiaí	Jacarezinho
Posto fluviométrico	Itatiba	Atibaia	Jundiaí	Itapeva	Itatiba
Prefixo de controle	3D-006	62670000	62390000	62395000	3D-019
Área de drenagem (Km^2)	775	420	269	358	95
Precipitação (P) - mm/ano	1.296	1.319	1.251	1.182	1.320
Evapotranspiração real - mm/ano	802,7	821,2	785	778	702
Escoamento total (QT) - mm/ano	492	497	465	404	618
Escoamento básico (Qb) - mm/ano	167	171	230	195	333
QT/P (%)	37,96	37,68	36	33	46
Qb/P (%)	12,88	12,96	18	16	25
Qb/Qt (%)	33,94	34,40	50	49	55

FONTE: DAEE 1981

QUADRO 3.1. - MÉDIAS MULTI-ANUAIS DO BALANÇO HIDRÍCO (SÃO PAULO)

Jundiaí/Jacarezinho (190-333 mm/ano) que sub-bacia de Atibaia (160-171 mm/ano).

Com relação aos índices indicadores do regime hidrológico, observa-se que a relação Q_t/P fica na faixa 33-46 %, que é a vazão fluvial que sai do volume precipitado sobre cada sub-bacia. A relação Q_b/P mostra que 13-25% da precipitação infiltra, fluindo pelos aqüíferos e/ou retornando aos rios sob a forma de vazão de base. Visto que a relação Q_b/Q_t é da ordem de 34% a 55%, uma boa capacidade de armzenamento d'água ocorre em sub-superfície.

3.3. GANA

3.3.1. Elementos do Clima

O clima predominante em Gana é do tipo tropical semi-úmido. A distribuição das precipitações durante o ano varia consideravelmente sobre a área WALKER (1962), (Fig.3.5). As características principais são:

i) Uma só estação chuvosa onde mensalmente os totais elevam-se gradualmente de março a julho, alcançando um valor máximo nos meses de agosto e setembro. Este tipo de precipitação ocorre ao norte e leste dos paralelos, nas regões de Wa (00° 04'N, 02° 30'W) e Salaga (08° 33'N 00° 31'W).

ii) Uma estação chuvosa entre março e outubro com poucas variações. Esta área está limitada ao norte pelo primeiro tipo e ao sul pela linha que liga Kintampo (08° 03'N, 01° 44'W), e Hohoe (07° 09'N, 00° 29'E).

iii) Duas estações chuvosas, com totais mensais atingindo seu máximo nos meses de maio, junho e outubro. Os totais em cada um destes meses são similares e os períodos de dezembro à fevereiro, julho, setembro são mais secos de que o resto do ano. Esta área é limitada ao norte pelo segundo tipo e ao sul pela linha que liga Wiawso (06° 12'N, 02° 29'W) e Keta (05° 55'N, 00° 59'E).

iv) Duas estações chuvosas com um máximo em maio e junho e subsidiariamente em outubro. Isto afeta toda o planície costeira ; existem duas subdivisões deste tipo : na região onde ocorre o máximo de precipitaão (associado com as precipitações mais acentuadas do pais) e no leste (associado

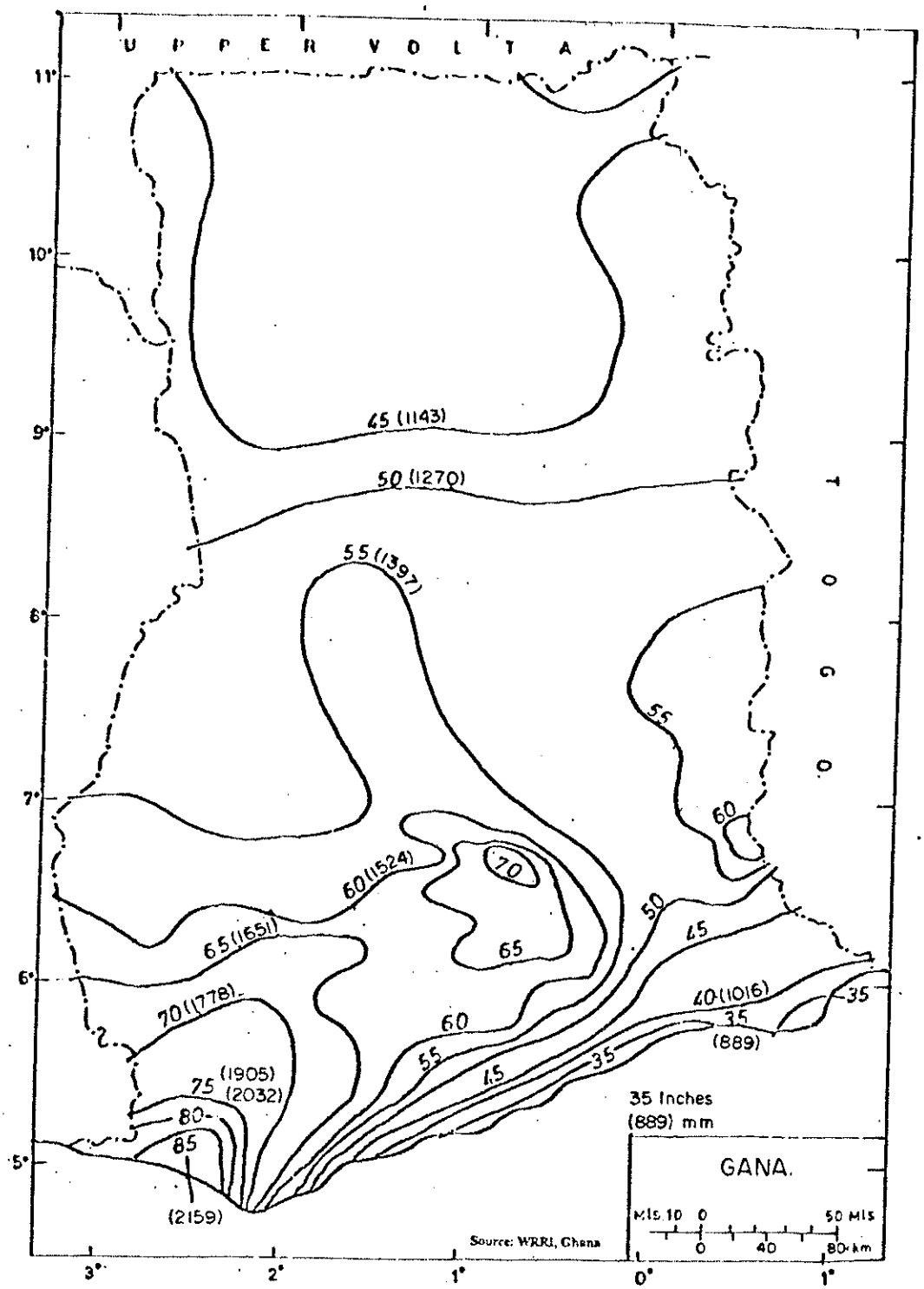


FIGURA 3.5- MAPA ISOIETAS DA GANA

com as menores precipitações do país) a incidência da estação subsidiaria é raremente evidente.

Janeiro é o mês mais seco no país, ainda que na região oriental o mês mais seco seja agosto.

Existem, ainda, variações bem notáveis com respeito ao tempo, duração e quantidade de chuvas entre as estações chuvosas. Em algumas áreas as precipitações são numerosas e em outras pouco frequêntes.

Com médias totais sobre grande parte do país entre 1.020 e 1.800 mm, Gana recebe a quantidade média típica das regiões tropicais.

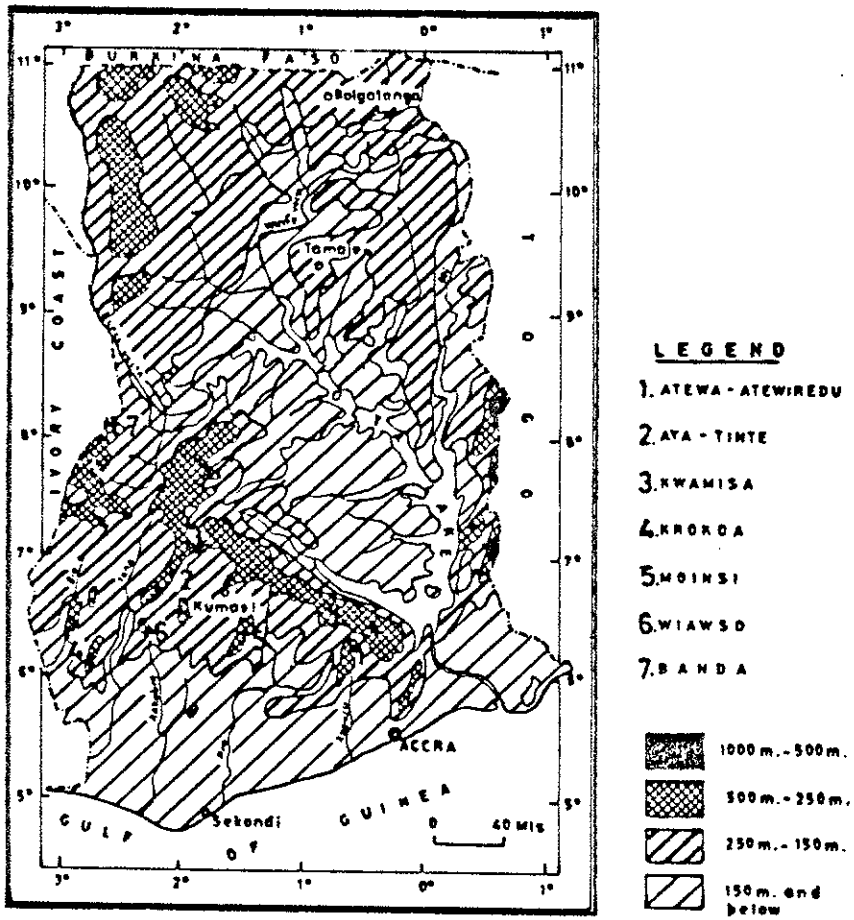
As temperaturas anuais mostram pequenas variações ao longo do país. A temperatura mais baixa anual é de 26 °C e encontra-se próxima da costa, e a mais alta 29 °C, entre 8° e 10° N. A média mais alta de temperatura ocorre no mês de março, a mais alta temperatura registrada em Gana é de 42,47 °C em Navorongo. A mais baixa ocorre em agosto em todo o país.

As umidades relativas no sul de Gana estão geralmente acima de 90% durante a noite e madrugada, subindo até 95% e 100% na costa. A umidade relativa se reduz ao mínimo à tarde. Na costa a umidade atinge 75% no sudoeste é de cerca de 65% no sudeste com uma variação de 15%. Períodos de baixa umidade relativa (50%) podem ocorrer durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

A evapotranspiração é de 1700 mm/ano para as áreas de savana do país e 1400 mm/ano para as áreas florestais, enquanto é 1900 mm/ano no extremo norte. A razão de evapotranspiração potencial e real varia consideravelmente em diferentes periodos do ano e em diferentes partes do país, mas o valor anual da taxa é provavelmente cerca de 2/3 na aréas de savana, com um valor ligeiramente maior nas áreas de florestas e um valor menor no extremo norte, WALKER (op. cit.).

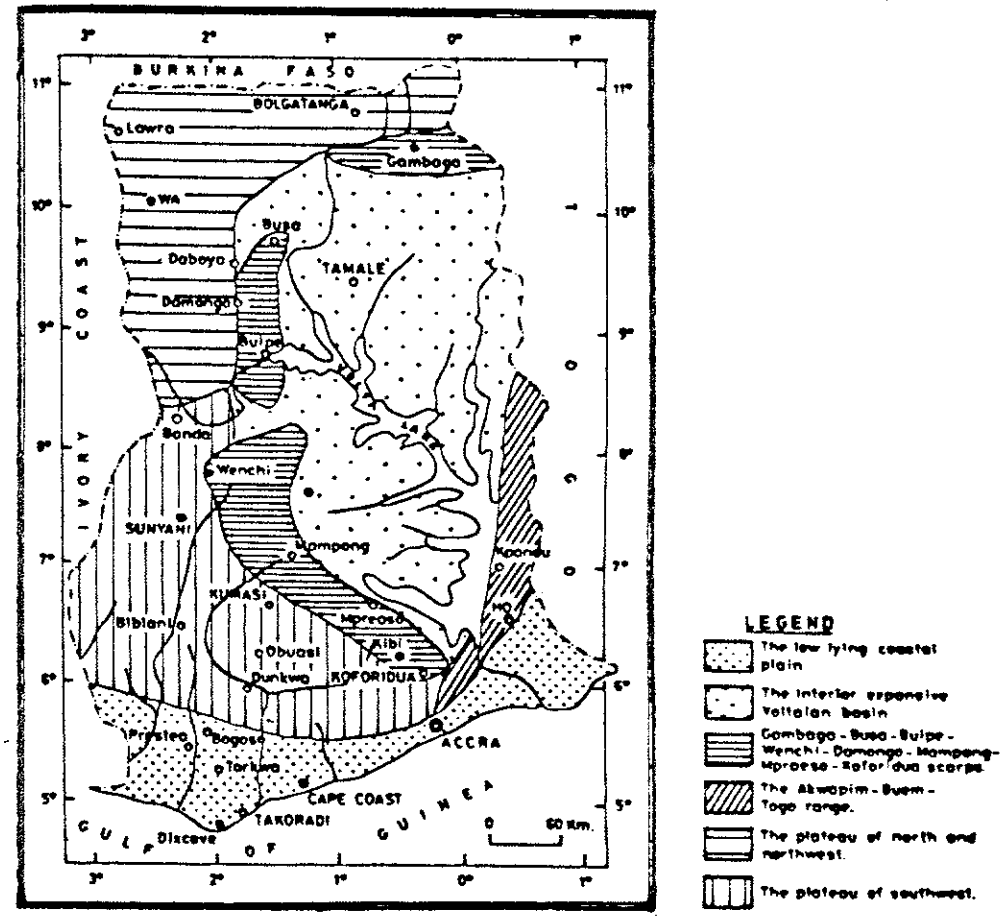
3.3.2. Aspectos Morfológicos

Seis tipos geomorfológicos são distinguidos (BOATENG,1960; KESSE,1985): planície costeira, bacia do Rio Volta, serra da Volta, serra de Akwapim-Buem-Togo. planalto de norte e nordeste e planalto de sudeste (Fig.3.6). Destes destacam-se aqueles que são constituidos por rochas précambrianas.



Physical map of Ghana

Fonte: KESSE, 1985.



The physiographic regions of Ghana.

FIGURA 3FIGURA 3.6 - MAPA DOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS DE GANA

i) Planície costeira situa-se na parte sul do pais extendendo entre as fronteiras do pais com as repúblicas de Togo e Costa da Marfim. A sua extensão da costa ao interior varia entre 24 e 100 kilometros e apresenta altitudes de 0 a 130 metros.

ii) Serra de Akwapim-Buem-Togo localize-se quase que totalmente na Série de Togo e Formação Buem composto de quarztitos, filitos, xistos e metasedimentos. Situa-se na parte sudeste da bacia da Rio Volta e extende-se na direção nordeste enrtando na República de Togo. A altitude máxima, é de 885 metros, ponto culminante do país.

iii) O planalto de Norte e Nordeste extende-se da Bamboi atravessa Bole, Wa, e Lawra na parte nordeste e Tumu e Bolgatanga, Bawku e Gambaga ao norte. As altitudes variam entre 152 e 305 metros. As rochas são predominantemente granitos pós-Birimianos, mas na área de Gambaga existe uma escarpa, a qual é um retalho do sistema Voltaiano, cujo pico atinge 426 metros.

iv) O planalto do Sudeste é limitado na parte leste pela serra de Volta, na parte norte pelo Rio Volta Negro e na parte oeste pela fronteira da Costa da Marfim. O relevo, representado por planícies a nível de base (peneplanos) com altitudes variando entre 152 e 305 metros, é interrompido pelas colinas e morros como; Atewa e Atweredu (753m), Aya-Tinte (700m), Kwamina (776m), Bonsa (643m), Krokoa (509m), Asuakaw (484m), Manso (417m), Wiawso (679m), e Banda (552m). As rochas do Sistema Birimiano e granitos afloram neste área.

Gana é drenada por uma vasto número de córregos e rios formando um rede fechada sobre todo o país. Além disso, existem várias lagoas costeiras e um grande lago natural no interior do páis, chamado Lake Bosumtwi, o qual não tem saída para o mar.

A rede de drenagem de Gana é dominada pelo sistema hidrográfico do Rio Volta. O rio Volta é um rio internacional drenando uma área de 388.500 Km^2 e corre um total extensão de 1600 Km . Cerca de 157.900 km^2 (42%) da area situa-se em Gana. Isto significa que 67% da área do país está localizada dentro da bacia do Rio Volta.

Praticamente todos os córregos e rios ao norte, leste e ao sul da serra de Volta, entre Sunyani e Koforidua formam parte do sistema de bacia hidrográfica do Rio Volta. Ao Sul da serra existem outros sistemas hidrográficos de pequeno porte, cujos rios correm e deságuam diretamente no Atlântico.

Os maiores destes sistemas incluem os Rios Bia, Tano, Ankobra, Pra, Ochi-Nakwa, Amisa, Ayensu Densu e Tordzi.

3.3.3. Balanço Hídrico

Não foi possível a estimação do balanço hídrico de Gana devido a falta de dados durante o estudo.

4. CONTEXTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS ESTUDADAS

4.1. PRECAMBRIANO DA PARAÍBA

Dantas et al (1982) estabeleceram um quadro estratigráfico geral para o Precambriano do Estado da Paraíba (Quadro 4.1). Os autores distinguiram duas unidades : a unidade inferior, considerada provisóriamente no Precambriano Indiviso, é representada pelos Complexos Migmátitico-Granitóides e Gnaissico-Migmátiticos, e a unidade superior, constituída por um conjunto de rochas metassedimentares dos Grupos Seridó e Cachoeirinha seguindo-se um cortejo de rochas plutônicas granulares (granitóides e gabróides) e filonianas (diques ácido e básico), cujo relacionamento de campo, associado às datações geocronológicas, permitem situá-las estratigraficamente acima.

O posicionamento no **Précambriano Indiviso** dos complexos Migmátitico-Granitóides e Gnaissico-Migmátiticos, e das rochas granulíticas e afins, prende-se ao fato de não se ter ainda uma real definição do comportamento estratigráfico, tectônico e estrutural destas unidades; bem como devido a inexistência de uma idéia concreta sobre as relações de contatos com a sequência supra-crustal que constitui os Grupos Seridó e Cachoeirinha, considerados do Precambriano Superior.

O tipo litológico mais frequênte do **Complexo Migmatitico-Granitoide** é o migmatito nebulítico, ocorrendo ainda, em menor escala, migmátitos e oftálmitos diadisíticos e flebíticos, todos, de um modo geral, com paleossoma rico em biotita e neossoma de natureza granulítica.

O Complexo Gnaisse-Migmátitico compreende os grupos São Vicente, Caicó, Uauá definidos por EBERT (1970), FERREIRA e ALBUQUERQUE (1969) e BARBOSA et al (1964/1970) e constitui a unidade precambriana de maior representação, estendendo-se por todos os quadrantes do Estado de Paraiba. Compreende um grupamento de litotipos de alto grau de metamórfismo, fáceis anfibolito e mais raramente granulito, predominando gnaisses, migmatitos e granitos.

As rochas granitóides atribuidas ao Precambriano Indiviso, ocorrem encaixadas no complexo gnaissico-migmatítico mostrando, na maior parte das vezes, um contato gradativo com os encaixantes e constituindo corpos elipsoidais de formas irregulares, com dimensões variadas.

Quadro 4.1 – Quadro Estratigráfico Geral do Precambriano no Estado da Paraíba

PRECAMBRIANO SUPERIOR	Rochas filonianas: sienitos, dacitos, riolitos, pegmatitos, etc.			
	Rochas plutônicas granulares:	Granitóides (granitos, granodioritos, tonalitos, monzonitos, sienitos); Gabróides (ultrabásicas serpentinizadas); Dioritóides (quartzo-dioritos)		
	Grupo Cachoeirinha – filitos, xistos de baixo grau metamórfico, metassiltitos, calcários cristalinos e quartzitos			
PRECAMBRIANO INDIVISO		Formação Seridó – biotita xistos granadíferos		Micaxisto tipo Caroalina; Gnaisses e Xistos Indiferenciados
		Formação Jucurutú	gnaisses diversos, calcário cristalino calcissilicáticas com scheelita	
		Formação Equador	quartzito muscovítico, quartzito feldspático, magnetita sillimanita quartzito e metaconglomerado	
		Complexo Gnáissico-Migmatítico	gnaisses, gnaisses migmatizados, migmatitos, rochas graníticas e afins, gabros; intercalações de calcário cristalino, anfibolitos e leptinitos	
		Complexo Migmatítico-Granitóide-migmatitos oftalmíticos e flebíticos com núcleos graníticos indiferenciados		

Segundo MEDEIROS LIMA et al (1980), o **Grupo Seridó** acha-se representado por uma sucessão lito-estratigrafica empilhada, englobando um conjunto de rochas metassedimentares e um cortejo de rochas plutônicas granulares (granitóides, gabróides e dioritóides) e filonianas (diques ácidos e básicos).

O conjunto metassedimentar é constituído, da base para o topo, por uma sequência clástica psamítica-psefítica basal (Formação Equador), uma sequência pelítica-quimica (carbonática) mediana (Formação Jucurutú) e uma sequência clástica-pelítica correspondente a (Formação Seridó).

No **Grupo Cachoeirinha** BARBOSA et al (1964,1970) reunem os filitos, micaxistos finos, clorita xistos, sericita xistos e metassiltitos, além dos argilitos variegados. Intercalados nesta sequência ocorrem lentes de calcáreos cristalinos, quartzitos micáceos e itabiritos.

As rochas plutônicas granulares e filonianas que ocorrem inseridas nos Grupos Seridó e Cachoeirinha, ou constituíndo a zona de contato entre estes e o complexo gnaissico-migmátitico, ocupam a parte mais superior do Precambriano da Paraíba, DANTAS (1982).

Na área de domínio do Grupo Seridó, MEDEIROS LIMA et al (op cit) individualizaram, dentro do conjunto das rochas plutônicas granulares, um grupo de rochas granitóides (granitos, granitos porforóides e granitos pegmatóides, granodioritos e granitos alcalinos) e um grupo de gabróides e dioritóides.

4.2. O PRECAMBRIANO DE SÃO PAULO

A Plataforma Sul Americana como exposta no Escudo Atlântico em território Paulista engloba diversas unidades, (Quadro 4.2) podendo sua distribuição ser visualizada na Fig 4.1

O **Arqueano** compreende o **Complexo Costeiro,** o **qual,** tal como definido por HASUI et al (In: SCHOBBENBAUS, 1981), abrange uma unidade bastante heterogênea, em que as litologias não tem ainda as suas relações bem esclarecidas

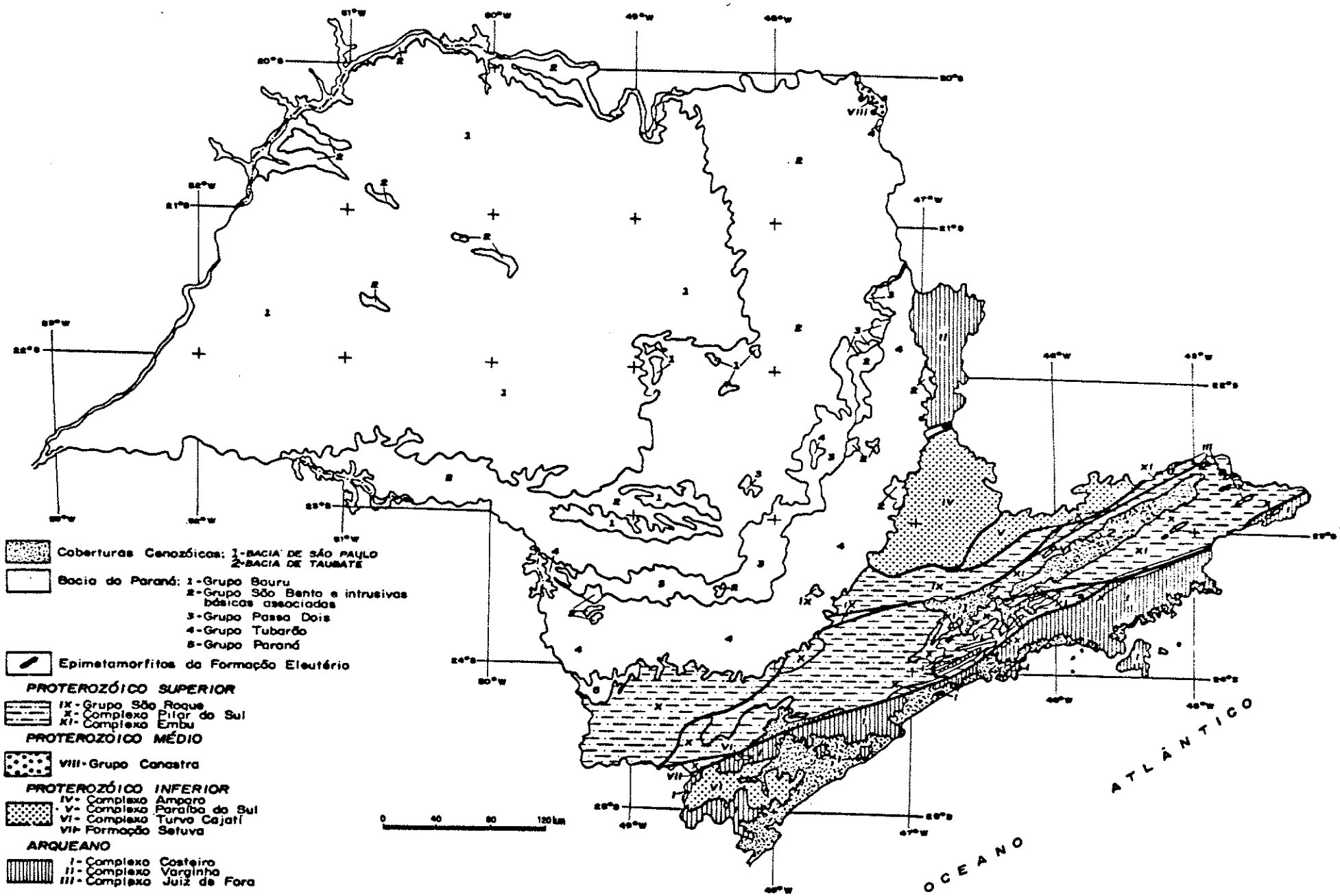
Dentre as litologias predominam as rochas migmátiticas , que ocorrem por toda a área de afloramento do complexo. Incluem metatexitos de

	EO PALEOZÓICO	Formação Eleutério (€Oe) Suítes graníticas postectônicas: Facies granofírico (€OγG); Facies Graciosa (€OγG) e Facies Itu (€Oγi) Suítes graníticas indiferenciadas (PS€Oγ)
PROTEROZÓICO	SUPERIOR	Suítes graníticas sintectônicas: Facies Cantareira (PSγc) e Facies migmatítico (PSγm) Complexo Pilar do Sul: PSpX, PSpF, PSpFC, PSpC, PSpQ, PSpS, PSpR, PSpB (PSp) Complexo Embu: PSeB, PSeM (PSe) Grupo São Roque: PSsX, PSsF, PSsQ, PSsC, PSsR, PSsD, PSsM (PSs)
	MÉDIO	Grupo Canastra: PMcQ (PMc)
	INFERIOR	Formação Setuva (PIs) Complexo Turvo-Cajati: PItG, PItX, PItC, PItQ, PItM (PIt) Complexo Amparo: PIaGM, PIaQ, PIaS, PIaX, PIaB, PIaHM, PIaH (PIa) Complexo Paraíba do Sul: PIpM, PIpD, PIpH (PIp)
ARQUEANO		Complexo Costeiro: AcB, AcD, AcHM, AcC, AcM, AcH, AcX (Ac) Complexo Juiz de Fora: AjM (Aj) Complexo Varginha: AvQ, AvM, AvH, AvHM, AvC, AvB (Av)

Obs.: Símbolos das litologias gerais: α - alcalinas, β - básicas; γ - granitos, B - metabásicas; C - calcários; D - metadioritos, F - filitos; FC - filitos e calcários; G - gnaisses; H - granulitos, HM - granulitos migmatizados; M - migmatitos; Q - quartzitos, R - metaconglomerados, S - calcossilicáticas; X - xistos.

Desenho Mirna M. Ferracini

QUADRO 4.2 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA SIMPLIFICADA



Fonte: BISTRICHI et al (1981)

FIGURA 4.1 - ESBOÇO DA DISTRIBUIÇÃO DAS LITOESTRTIGRÁFICA NO ESTADO DE SÃO PAULO

estruturas variadas e diatexitos com termos oftálmicos, facoidais e homofânicos, portando paleossoma de natureza diversa (xistoso, anfibolítico, gnaíssico, quartzítico, calcossilicático).

O **Complexo Juiz de Fora** forma pequenos núcleos expostos em meio ao Complexo Embú, no leste Paulista, nas proximidades do limite com o Estado de Minas Gerais. Constituem-se de migmatitos de estruturas complexas com peleossomas gnaissicos, xistos e quartzitos, oriundas de um desenvolvimento policíclico, HASUI et al (1978).

No **Complexo Varginha** as litologias predominantes são migmátitos diversos de paleossomas granuliticos, calcossilicáticos, anfibolíticos, xistosos, diorítos e quartzíticos, incluíndo ainda termos gnaíssicos a biotita e granada, já bastante migmatizados e conspícuos corpos anfibolíticos irregulares. Também são encontrados diversos núcleos, bolsões e faixas de rochas granulíticas básicas e ácidas, e piroxênios granulíticos tendo dimensões das mais variáveis.

O Complexo Varginha possui uma história deformacional ligada à atuação sucessiva de vários ciclos tectônicos (Jequié, Transamazônico, Uruguaiano e Brasiliano) ainda insuficientemente caracterizados na área.

O **Proterozóico Inferior** compreende a Formação Setuva, o Complexo Turvo-Cajati, o Complexo Paraíba do Sul e o Complexo Amparo (Fig 4.1).

A **Formação Setuva** no Estado de São Paulo constitui-se essencialmente de gnaisses ortometamórficos e parametamórficos a biotita e/ou hornblenda, portando subordinadamente micaxistos a biotita e muscovita quartzo xistos, anfibolio-xistos, anfibolitos, talco-xistos. Seus contatos ao sul, com as unidades adjacentes (migmátitos do Complexo Costeiro) tem natureza ainda indiscriminada, enquanto a norte, com xistos do Grupo Açungui, se fazem através da falha de Cubatão.

O **Complexo Turvo-Cajati**, tradicionalmente incluido no Grupo Açungui ou em seu embasamento, é indiferenciado por todos os autores. Este conjunto foi descrito por SILVA e ALGARTE (1981 a,b,) tendo recebido denominação informal de "Sequência Turvo-Cajatí".

Os autores descrevem uma associação ectinítica com feldspatização e migmatização incipiente e local, uma outra de natureza Gnaíssica migmatizada predominante, e finalmente reconhecida uma subsequência eminentemente migmática.

O Complexo Paraíba do Sul estende-se por toda porção ao norte da falha de Jundiuvira, desde a região de Campos do Jordão a E-NE, até a falha de Camanducaia onde se confronta com o complexo Amparo.

Litológicamente é formado por um conjunto predominante de rochas gnaíssicas e migmatíticas e de outras estruturas variadas, associadas a migmatitos complexos. Este conjunto inclui ainda algumas litológias não individualizadas como granulitos, leptinitos e intercalações subordinadas de xistos feldspáticos, quartzitos, marmores dolomíticos e rochas calcossilicáticas. Pertencem ainda ao complexo rochas basálticas e intermediárias metamorfizadas, com relações complexas entre si, que incluem metadioritos, metabasitos, granodioritos e monsonitos gnaissicos, quartzo-dioritos e dioritos, CAVALCANTE et al (1979).

Diversas descrições litológicas detalhadas são encontradas para o Complexo Amparo, destacando-se as de WERNICK (1978a,b), onde são descriminadas dez litológias.

Com ampla distribuição no dominio da unidade tem-se gnaisses a biotita, hornblenda e granada com grau variável de migmatização, associados a migmatitos de estruturas diversas com intercalações, não individualizadas, de quartzitos, xistos, anfibolitos e metaultrabasitos

O **Protozóico Médio** compreende o **Grupo Canastra, o qual ocorre** no extremo nordeste do Estado de São Paulo, formando uma pequena faixa metassedimentar de orientação NW-SE, BARBOSA (1955).

O **Proterozóico Superior** compreende os Grupos Açungui e São Roque. O **Grupos Açunguí** constitui a mais extensa unidade do precambriano paulista, e tem a forma de uma faixa alongada que ocorre desde o Paraná até o Rio de Janeiro e Espirito Santo (Fig 4.1).Atravessa todo o Estado de São Paulo, em sua porção E-SE, é limitada ao Sul pela falha de Cubatão e lineamento. Além-Paraíba e ao Norte pelas falhas de Taxaquara, Monteiro Lobato e Jundiuvira. Dentro do Açungui, distingue-se o Complexo Pilar, formado pelas rochas metassedimentares ectiníticas e o Complexo Embú, constituido pelos migmatítos e gnaisses migmatizados, HASUI e SADOWSKI (1976).

O Grupo São Roque configura uma faixa de orientação aproximadamente E-W, até a região ao Norte de São Paulo onde sofre uma suave inflexão para NE (Fig. 4.1). Inclui sequências rochosas tidas como mais

antigas, formadas por xistos, filitos, quartzitos e um substrato gnaissico-migmatíticos.

Os metapelítos incluem um conjunto de filitos, quartzo filitos e filitos grafitosos em sucessão rítmica, incluindo subordinadamente metassiltitos, quartzo-mica xistos e quartzitos.

4.3. O PRECAMBRIANO DE GANA

O embasamento geológico de Gana pode ser subdividido em dois domínios ou províncias, de acordo com a idade, características tectônicas e litológicas das rochas: A província oeste, que se estende na margem leste do escudo ou craton precambriano da Africa Ocidental, e a unidade sudeste, que se encontra na parte sudeste do país e pertence à faixa do Precambriano móvel.

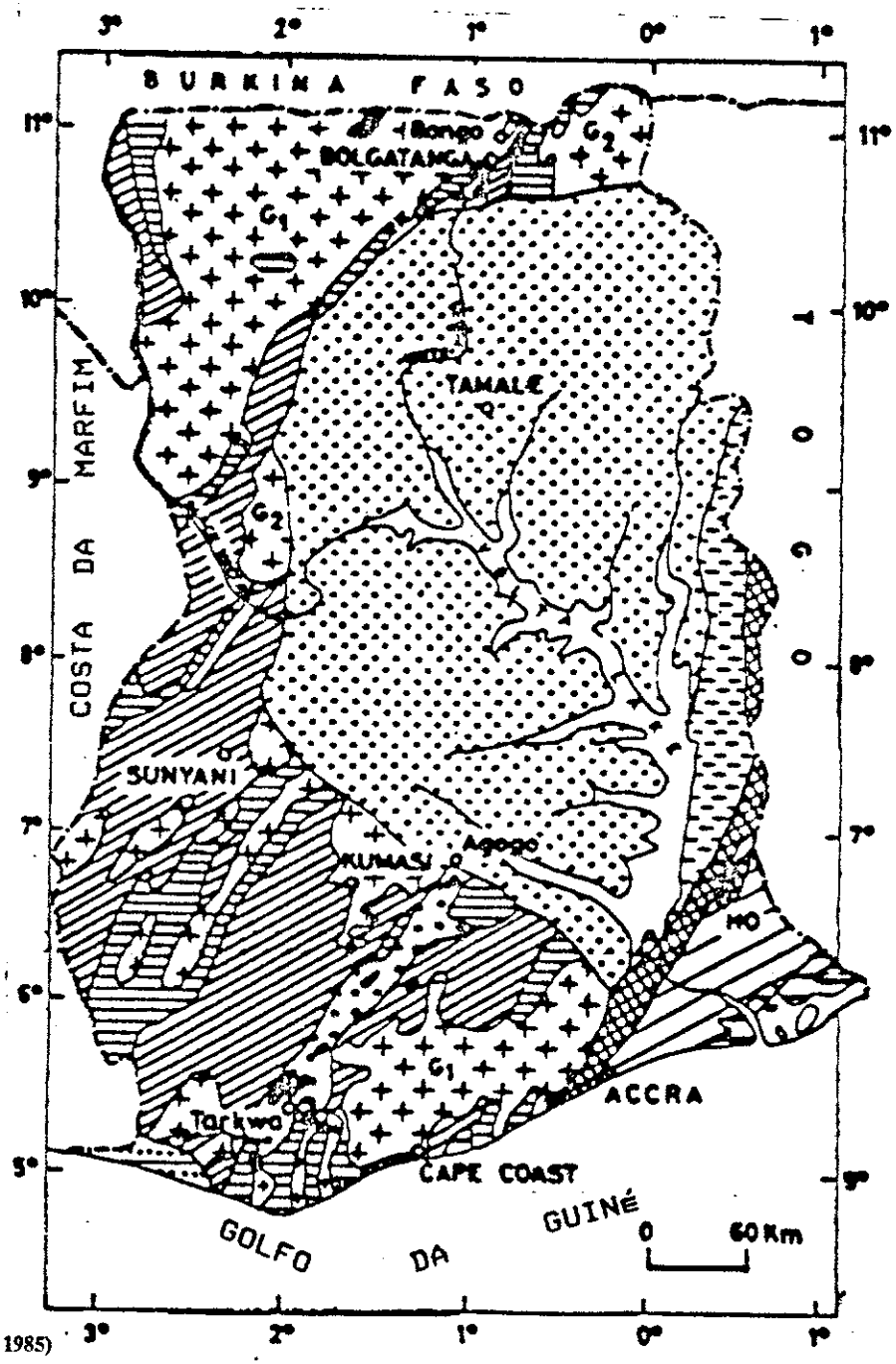
Cerca de 45% do território de Gana pertence ao escudo da unidade oeste. Esta consiste de vulcânicas do Proterozóico Inferior e metassedimentos do Precambiano Médio e Superior (Fig 4.2).

O **Precambriano Médio** compreende os Sistemas Birimiano e Tarkwaiano.

As rochas do **Sistema Birimiano** foram depositadas sobre um embasmento Arqueano e cobre perto de 1/6 da área total de Gana. Elas afloran em áreas ao norte, oeste e sul do país. Os metamorfismo destas rochas é de baixo grau, resultando facies "greenschist"

Em Gana o sistema Birimiano é subdividido em séries superior e inferior. Esta subdivisão baseia-se em associações litológicas ou tipos de rochas.

A Série de **Birimiano Inferior** representa o " facies flyschoide " e compõe 55% da área ocupada por todo o Sistema Birimiano. É predominantemente de origem pelítica, tendo lama e siltitos entremeados com camadas de sedimentos grosseiros. A série é caracterizada pela grande espessura, dobramento isoclinal, mergulho de alto angulo, camadas alternadas de filitos, grauvacas e camadas argilosas entremeadas de tufo e lavas. WOODFIELD (1966), MOON e MASON (1971) reportaram evidências de deposição sedimentar num ambiente fluvial, em condições de água rasa.



(SEGUNDO KESSE 1985)

FIGURA 4.2 - MAPA GEOLÓGICO DA GANA .

O Birimiano Inferior foi subdividido em cinco subséries por KESSE (1985) baseado na informação estratigráfica, fundamentada por TRASHLIEU (1972) e DABAWSKI (1972), ASIHENE e BARNING (1975).

O **Birimiano Superior** sobrepõe-se as séries Birimianas Inferiores em descordância, e cobre 20% da área ocupada por todo o sistema Birimiano.

O Birimiano Superior apresenta uma grande espessura de lavas basálticas e andesíticas, camadas de aglomerados de tufa e sedimentos tufáceos WOODFIELD (1966).

As séries Birimianas Superiores apresentam uma fase de deposição superior "eugeosinclinal", mas também é possível que algumas das subséries de vulcânicas ácidas estejam relacionadas com tipos de eventos vulcânicos, em associação com sedimentos de águas que incluem meta-conglomerados, quartzitos, calcáreos, xistos, cloritas xistos e xistos grafítosos.

De acordo com KESSE (1985), a Birimiano foi dobrado, metamorfisado e, em alguns locais, assimilado pelos corpos graníticos. O dobramento foi intenso com mergulhos de 30° - 90°, ao longo dos eixos NE-SO e de 70° - 90° mais comuns.

As falhas tendem a seguir o nível das dobras e também tendem a serem perpendiculares. As juntas nestas rochas tem várias orientações, as mais comuns são paralelas às falhas de direção norte/sul. Os estudos de BLAY (1977) mostram diaclases longitudinais de tração, com orientações 30°/120 °. Estes padrões são consistentes com as tensões principais WNW-ESE.

Há três tipos principais de grandes massas de granitóides que penetram o Birimiano : o tipo da Cape Coast e Winneba (granitóides velhos), pequenas massas granitóides, conhecidas como tipo Dixcove (granitóides jovens) e as granitóides potássicos de Bongo, ser encontradas principalmente na parte norte do pais.

As rochas do **Sistema Tarkwaiano** concentram-se principalmente na região sudoeste, no distrito Tarkwa, onde afloram numa faixa em sentido NW-SW.

O Tarkwaiano é considerado de origem fluvial continental de águas rasas, derivado do Birimiano e associado a granitóides, JUNNER (1935), MOON e MASON (1967), WOODFIELD (1966). As rochas do sistema consistem de séries espessas de sedimentos argilosos e arenosos, depositados em

bacias " rift valleys" intracratônicas, bordejadas pelas faixas de granfto e "greenstone" do sistema Birimiano.

Os sedimentos Tarkwaianos foram submetidos a um baixo grau de metamorfismo,isto é, de facies "greenschist" médio a facies anfibolítica almadina média, rochas nefríticas à anfibolitos médios. Os minerais comuns são clorita, sericita, zoisita, calcita, quartzo, limonita e cloritóide. Os sedimentos são passados integralmente do ciclo orogênico Eburean que representam o estágio final de facies molassica. JUNNER et al (1942) subdiviram o sistema Tarkwaiano em arenito de Huni, filitos de Tarkwa, série de Banket e grupo Kwawere

O sistema Tarkwaiano é associado à rochas ígneas hipoabissais ácidas que perfazem aproximadamente 20% da espesssura total do sistema. A maioria constitue capas intrusivas concordantes ou sill e diques .

O Precambriano Superior compreende o Sistema Dahomeano, Série Togo e a Formação Buem.

O **Sistema Dahomeano** ocupa a sudeste de Gana, aproximadamente a parte da linha norte-nordeste de Accra que atravessa os limites Gana-Togo perto de Agome, na República de Togo, com uma área total de aproximadamente 7.000 Km^2.

O sistema Dahomeano consiste principalmente de hornblenda e biotita gnaisses , migmatitos, granulitos, xistos, alguns dos quais, são ricos em granada. Penetrando no Dahomeano ocorrem granitos, sienitos e nefelinas e diques de porfirinas, aplitos e doleritos. A sucessão litoéstratigráfica do Sistema Dahomeano tem sido considerada por MANI (1978) como um sistema alternado de quatro faixas de gnaisses ácidos e básicos.

As rochas têm sofrido ao menos duas fases de metamorfismo e milonitização. Foram intensamente dobradas com eixos de dobra de direção S-SO e N-NE .

As rochas da **Série Togo** foram descritas primeiramente por KOERT (1910), KITSON (1928). A série Togo consiste de quartzitos, quartzo-xistos, quartzo-sericita-xistos, sericita-xistos e filitos, jaspes e xisto quartzo hematitas (JUNNER e SERVICE 1936).

BLAY (1978), considera que o contato entre as Séries Togo e a subjacente Dahomeana, foram originalmente sedimentares. Cerca de 1,5 m de

espessura de conglomerado e arenito foi observado em várias localidades. Fora isso o contato é tectônico e é representado por falha na parte leste. As camadas da Série Togo estão sujeitas a intensa pressão e metamorfismo resultando drobramentos intensos, fraturamentos e falhamentos. Dobras isoclinais, com planos axiais inclinados para sudoeste à 30 ° - 60 °.

A **Formação Buem** aflora na parte norte e nordeste da Série Togo. Consiste de calcáreos, argilitos, arenitos ferruginosos, folhelhos , arenitos arcoseanos, grauvacas e conglomerados, com aglomerados basálticos, andesíticos e lavas traquíticas, tufas e jaspes.

O grupo vulcânico ocupa o topo da formação (BATES 1954). Normalmente a Formação Buem não sofreu metamorfismo , mas, nas zonas de falha ao longo do contato Buem-Togo é frequentemente xistosa.

A formação é altamente dobrada ao longo da linha norte-sul e as camadas tem geralmente direção leste de 10° a 50°, com mergulho aproximado de 60 ° - 65 °.

5. CONTEXTOS HIDROGEOLÓGICOS DAS ÁREAS ESTUDADS

5.1. INTRODUÇÃO

Das informações específicas que podem ser utilizadas neste estudo, incluem as seguintes categorias :

- Informações geológicas compreendendo a litologia, o tipo de material da cobertura, a espessura total e saturada do manto de alteração, os tipos de fraturas que ocorrem na superficie, as profundidades em que foram encontradas estas fraturas no poço, e ainda, o tipo de relevo associado a drenagem superficial.

- Dados técnicos dos poços, englobando parâmetros tais como: profundidade, nível estático. nível dinâmico, vazão e capacidade específica.

- E finalmente, incluem-se os dados de qualidade química de água com base nos seguintes parâmetros: teores de Ca^{++}, $Mg^{2}+$, Cl^{+}, SO_4^{2-} HCO_3^{-}, sólidos totais dissolvidos (STD), pH, e conditividade elétrica específica.

Inicialmente foi procedida uma homogeneização das unidades de medidas, variáveis segundo as áreas, para o sistema métrico. Nos dados de vazão e capacidade específica, os tempos foram mantidos em horas, tendo em vista a obtenção de valores mais significativos.

As análises estatísticas dos dados foram realizadas usando programas desenvolvidos pelo United States Geological Survey (USGS) Reston Va, modificados pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), Brasil 1980, com o diretório principal chamado de GEOQUANT, e programas do Institute of Statistical Analysis System (SAS), usados em IBM PC's do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS) da Universidade de São Paulo.

Os procedimentos do GEOQUANT mais comumente usados neste trabalho foram os programas ENTCHR, CHRBIN, PTILES1, PROB, CURVES, STATCOR, ANOVA.

Os ENDCHR e CHRBIN são programas do GEOQUANT que classificam observações de uma série de dados com base em uma ou mais variáveis. Neste trabalho foram usadas variáveis hidrogeoquímicas, e de produção dos poços .

O PITLES1 fornece a porcentagem das variáveis. O programa PROB produz uma estatística simples descritiva, incluindo o significado, classe, desvío padrão e distribuição de freqüências.

O programa CURVES foi usado para a análise de regressão. Este permite que as várias regressões possíveis sejam sistemáticamente analisadas para identificar as combinações de variáveis que explicam melhor as variações dos dados. Utiliza o método que determina coeficientes de regressão utilizando mínimos quadrados.

O Programa STATCOR do GEOQUANT e o programa PROCC CORR do Instituto SAS foram utilizados para obter a matriz triangular de coeficientes de ordem - correlação entre as variáveis dependentes hidrogeoquímicas.

A análise de teste de variânça usando os procedimentos ANOV1 e ANOV2 do GEOQUANT facilitou a classificação dos dados das variáveis hidrogeológicas e hidrogeoquímicas para determinar valores médios válidos estatisticamente (DAVIS 1986).

5.2. PARÂMETROS HIDROGEOLÓGOCOS DA PARAÍBA

Foram levantados dados de 750 poços no Estado da Paraíba para análises e interpretação neste estudo.

Os dados foram obtidos, principalmente, das publicações da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Companhia de Sondagens e Perfurações (CONESP), Companhia de Desenvolvimento dos Recursos Minerais (CDRM), da Paraíba e companhias privadas, cobrindo o periódo 1963 a 1985.

Os poços foram agrupados com base nas características de qualidade das águas, tendo em vista que existe na Paraíba uma variação distinta da qualidade da água entre as bacias dos rios que drenam para o leste, desaguando na costa oriental do Nordeste e aqueles que drenam para o norte, desaguando na costa setentrional.

Assim,as bacias hidrográficas como a dos rios Paraíba, Jacú e Curimataú possuem água com elevados teores de salinidade (costa leste),

enquanto, os rios que correm de sul à norte, como o Piranhas tem menor nível de salinidade COSTA (1986).

No *Setor Leste* foram levantados 328 poços correspondente o 44% do total desta área de estudo. No *Setor Oeste* tem-se 422 poços.

Os tipos de informações incluem: Número de ordem do poço, companhia perfuradora, data da perfuração, localização dos poços em termos de local e município, e as coordenadas em graus de latitudes e longitudes, profundidade do poço (m), diâmetro do poço (polegadas), nível estático (m), vazão (m^3/h) e capacidade específica ($m^3/h/m$).

Os poços perfurados de 1980 a 1985 tem dados de profundidade de entrada de água. O resto das informações compreende o tipo de rocha e a espessura da cobertura.

No tocante a construção dos poços a maioria está revestida na parte superior, corespondente a cobertura, até o teto da rocha sã. Os poços dentro das rochas duras não têm revestimento.

Os valores estatísticos dos principais parâmetros analisados são mostrados na Tabela 5.1 cujas interpretaçôes serão abordadas a seguir.

Os tipos de rocha nas quais os poços são perfurados constituem uma base de classificação da unidade hidrogeológica. A distribuição dos poços, de acordo com a litologia, é mostrada na Tabela 5.2.

A análise das características das coberturas desenvolvida tem por base dados de 610 poços. As coberturas compreendem dois tipos geneticos principais: Materiais autóctones originados pela decomposição das rochas no mesmo lugar e materiais alóctones tais como: aluviões dos rios ou coluviões .

As espessuras do capeamento são praticamente as mesmas, segundo as setores leste ou oeste. A espessura média atravessada pelo total de poços é de 2,4 m, com um valor máximo de 12,0 m. Dos 750 poços examinados, 90 (12%) não apresentavam manto de corbertura, isto é, foram implantados em rocha totalmente aflorante.

As caracteristicas faciológicas são muito variadas, desde areias grossas até siltes argilosos, ricos em materia orgânica.

	Número das Amostras		Mínima			Máxima			Média			Desv.Padrão		Coef.Var(%)	
	Setor leste	Setor oeste	Setor leste	Setor oeste	Total	Setor leste	Setor oeste	Total	Setor leste	Setor oeste	Total	Setor leste	Setor oeste	Setor leste	Setor oeste
Espessura Capeamento (m)	262	348	0	0	0	12,00	11,80	12,00	2,29	2,55	2,42	1,810	2,016	78,95	78,06
Profundidade (m)	328	422	22,0	20,0	20,0	78,00	70,00	78,00	43,72	48,40	46,06	6,39	7,36	14,62	15,21
Nível Estático (m)	325	417	+0,80	1,00	+0,80	18,7	24,24	24,24	5,55	4,56	5,00	3,75	3,26	68,91	71,47
Nível Dinâmico (m)	240	336	3,91	4,48	3,91	33,04	46,00	46,00	15,54	16,04	15,79	6,66	7,87	42,84	44,61
Vazão (m3/h)	338	422	0,09	0,06	0,06	13,09	12,31	13,09	1,71	2,61	2,16	1,90	2,82	107,17	108,11
Capacidade Especifica (m3/h/m)	240	336	0,01	0,02	0,01	5,95	3,75	3,80	0,30	0,40	0,35	0,54	0,70	184,71	185,92

TABELA 5.1. - VALORES MÉDIOS REPRESENTATIVOS DOS PARAMETROS DOS POÇOS NO ESTADO DA PARAÍBA.

	SETOR LESTE		SETOR OESTE		TOTAL	
Rocha	Nº. de Poços	% do Setor	Nº. de Poços	% do Setor	Nº. de Poços	% do Total
Gnaiss	205	62,4	240	56,9	445	59,3
Micaxisto	43	13,2	54	12,8	97	12,9
Granito	38	11,5	44	10,4	81	10,80
Migmatito	17	5,1	29	6,9	46	6,2
Filito	13	4,2	39	9,2	52	6,9
Quartzito	8	2,4	8	1,9	17	2,3
Outras Rochas	4	1,2	8	1,9	12	1,6
TOTAL	328	100	422	100	750	100

TABELA 5.2. - DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS SEGUNDO TIPO LITOLÓGICOS (PARAÍBA).

A importância hidrogeológica destas coberturas é limitada, com excessão dos domínios de ocorrência dos aluviões mais espessos.

Todos os poços cadastrados (750) mostram registros de profundidade. As profundidades dos poços variam entre um minimo de 20,00m um máximo de 78,00 m, com uma média de 46,06 m. Os poços de setor leste tem profundidades máximas e minimas, cerca de 10% superiores, porém com média ligeiramente inferior,em relação ao setor oeste.

O coeficiente de variação da profundidade dos poços é praticamente o mesmo nos setores leste e oeste, sendo a média de 14,91%. Este valor de dispersão é, relativamente, o mais baixo, dentre os demais parâmetros analisados e decorre,certamente, da prática contratual que limita a profundidade de perfuração em torno do valor médio de
50,00 m.

Os dados de nível estático são disponíveis sobre 98% dos poços. A profundidade do nível estático varia entre jorante (+0.80) m e um máximo de 24,42 metro, tendo como valor médio, 5.00 m. Estes valores apresentam pequenas variações segundo os setores hidrográficas considerados sendo, em geral, ligeiramente superiores no setor leste, em cerca de 10%. Os coeficientes de variação são relativamente elevados e praticamente idênticos nos dois setores considerados, respectivamente 68,91% no setor leste e 71,47% no setor oeste. Esta variabilidade é característica de meios aqüíferos extremamente heterogeneo e anisotropico como é o caso do meio fraturado.

Os níveis dinâmicos apresentam poucas diferenças segundo os setores e atingindo valor médio de 16,59 m. Os coeficientes de variações são 42,84% no setor leste e de 44,61% no setor oeste.

Todos os poços considerados (750) tem dados de vazão. O valor médio é de 2,19 m^3/h, sendo as vazões mínimas e máximas de 0,06 m^3/h e 13,09 m^3/h respectivamente. O coeficiente de variação superior a 100% revela uma ampla dispersão refletindo, certamente, as grandes heterogeneidades das condiçôes hidrogeológicas dos meios aqüíferos fraturados.

A capacidade específica sendo a relação entre a vazão e o respectivo rebaixamento, é o parâmetro mais seguro usado para avaliar a produtividade de um poço em aqüíferos de porosidade intersticial, homogêneo e isotrópico. O seu significado no caso de aqüíferos fraturados é pouco consistente, como alias, se comprova pelos dados obtidos. Com efeito, as

capacidades específicas dos poços na Paraíba são muito variáveis tanto no setor leste como oeste.

Os valores máximos e mínimos são respectivamente de 3,80 e 0,01 $m^3/h/m$, sendo a média de 0,34 $m^3/h/m$. Os coeficientes de variações são extremamente elevados, com valores médios de 185 e 186%, respectivamente, nos setores leste e oeste.

As associações litologia e as estruturas são fatores relevantes que afetam a produtividade do poço. As rochas com baixo e médio grau de metamorfismo são consideradas como favoráveis para a perfuração do poços na Paraíba, SOUZA et al (1984). Estas rochas, representadas por gnaisses, xistos e filitos; os gnaisses apresentam 59,3% dos poços perfurados (Tabela 5.2.).

O segundo tipo litológico mais perfurado é o micaxisto (13%), seguindo o granito (11%).

5.3. PARAMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE SÃO PAULO

Dados de 1725 poços perfurados em rochas cristalinas no Estado de São Paulo estiveram disponíveis para análise,os qais foram obtidos a partir dos registros das principais companhias perfuradoras e/ou publicados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) 1972. O DAEE divide o Estado em onze regiões administrativas; destas somente cinco regiões administrativas : Região 1, São Paulo; Região 2, Santos, Região 3, São Bernado dos Campo; Região 4, Sorocaba, Região 5, Campinas, apresentam aqüíferos de rochas cristalinas do embasamento.

A maioria das informações sobre os poços disponíveis para análise neste trabalho foram extraidas dos dados oriundo das regiões 1 e 5, porque estas regiões contêm o maior número de dados dos poços nas rochas cristalinas do Estado.

Considera-se insuficiente as vazões nas rochas cristalinas do embasamento neste Estado, em comparação com outros aquíferos sedimentares que ocorrem na mesma região.

Durante o trabalho, viagens ao campo foram realizadas na Bacia de Piracicaba na Região 5 (Campinas) para inspecionar e obter precisa localização e as características dos poços. As características dos parâmêtros dos

	Espessura do Manto de Intemperismo (m)					Profundidade de Poços (m)					Nível Estático (m)				
	1	2	4	5	TOTAL	1	2	4	5	TOTAL	1	2	4	5	TOTAL
Minima	2,00	6,00	10,00	2,00	2,00	20,00	20,00	20,00	36,00	20,00	0,20	0,5	0,3	0,20	0,20
Máxima	74,00	88,00	60,00	59,00	88,00	300,00	284,00	200,00	343,00	343,00	47,00	38	45	50	50,00
Média	45,58	41,74	46,93	35,62	42,47	130,00	98,00	100,00	132,83	115,37	10,60	9,80	10,14	13,18	10,93
Desv. Padrão	26,68	21,54	23,34	20.04		46,00	33,82	32,98	50,71		11,43	10,15	9,84	12,41	
Coef.Var. (%)	52,52	51,60	49,73	59,60		34,95	34,50	32,98	38,19		10 7,85	103,36	97,00	94,00	
N^{o} Amostras	546,00	46,00	58,00	210,00	860,00	546,00	46,00	58,00	210,00	860,00	546,00	46,00	58,00	210,00	860,00

Região Admistrativo: 1 = São Paulo, 2 = Santos, 4 = Sorocaba, 5 = Campinas.

	Nível Dinâmico (m)					Vazão m^3/h					Capacidade Específica ($m^3/h/m$)				
	1	2	4	5	TOTAL	1	2	4	5	TOTAL	1	2	4	5	TOTAL
Minima	5,30	4,76	8,00	19,00	5,3	1,70	0,15	0,50	0,60	0,15	0,02	0,03	0,018	0,002	0,002
Máxima	130,00	123,00	137	150,00	150	150,00	41,00	60,00	50,00	150,00	66,70	0,62	0,38	0,93	66,70
Média	58,54	66,12	76,01	83,57.	71,06	28,31	11,24	10,00	13,28	15,70	4,35	0,17	0,10	0,14	1,19
Desv.Padrão	35,83	42,57	45,51	36,70		36,85	12,95	12,26	12,14		11,92	0,22	0,15	0,18	
Coef. Var.(%)	61,20	64,38	59,87	43,92		128,00	115,17	121,38	91,34		274,00	127,00	150,00	136,00	
N^{o} Amostras	546,00	46,00	58,00	210,00	860,00	546,00	46,00	58,00	210,00	860,00	546,00	46,00	58,00	210,00	850,00

TABELA 5.3. - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PARAMETROS DOS POÇOS NO ESTADO DE SÃO PAULO.

poços leventadas no Estado de São Paulo são geralmente as seguintes : data de perfuração, situação topográfica, tipo de vale, relevo, coordenadas geográficas, elevação, profundidade do poço, nível estático , espessura do manto de alteração total e saturada, vazão, capacidade específica e litológia.

Na Tabela 5.3 são mostrados os valores das estatísticas descritivas dos principais parâmetros dos poços. Na maioria dos casos, a litologia em que os poços são perfurados tem sido designadas simplesmente como rocha cristalina, entretanto em alguns casos, descreve-se a litologia como gnaisse, xisto, migmatito, granito, filito e quartzo.

A espessura do manto de intemperismo no estado de São Paulo varia entre 2 e 88 metros com coeficiente de variação em torno de 58%. Na Região 5 (Campinas) 4% dos poços não possuem qualquer manto do intemperismo. A espessura média do manto é de 42,47 metros.

A profundidade média dos poços em São Paulo é de 115 m com o coeficiente de variação de 48%. As profundidades oscilam entre 20 e 343 metros.

Além das vazões surgentes com alturas de nível piezometrico de 1,5 m, os níveis estáticos da água nos poços situam entre 0,2 e 50 metros. A média é de 10,93 metros.

O mínimo valor de nível dinâmico é de 1,76 metros enquanto o máximo atinge 76,75 metros tendo o valor médio de 25,75 metros.

A média de vazão é de 15,70 m^3/h e flutua entre 0,15 m^3/h e um máximo de 150 m^3/h na área Metropolitana de São Paulo MENEGASSE (1991). O coeficiente de variação está em torno de 114%.

Os valores de capacidade específica oscilam entre 2.0×10^{-3} e 66.70 $m^3/h/m$ com o valor médio de 1,19 $m^3/h/m$ e tendo um coeficiente de variação de cerca de 170% .

5.4. PARAMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE GANA

Os poços perfurados em Ghana no embasamento de rochas cristalinas constituem um total de 89% do total de poços do país. O total de poços perfurados nestas rochas até o ano de 1986 foi de 6.920, sendo que 2.500

deles foram perfurados entre 1974 a 1981 mediante um projeto de abastecimento de água para região Norte Superior do pais (Upper Region Water Supply Project, (UPRWSP) realizado pela assistência financeira do Governo Canadense.

A profundidade dos poços deste projeto oscila de 9 a 67 m com variação de diametros de 100, 150 e 200 mm e a média geral de nivel estático de 10 m.

Outros 3.000 poços foram perfurados entre 1981 - 1983 com a assistência financeira de República Federal da Alemanha na área abragendo as rochas cristalinas do embasamento no sul de Ghana

A profundidade destes poços varia entre 25 e 80 m e têm como diametro, 100 mm. O resto dos poços no pais, ao redor de 632, foram perfurados pela secção de perfuração da (GWSC) e o Instituto de Pesquisa de Recursos Hídricos (Water Resources Research Institute, WRRI).

Os dados dos poços perfurados pelo Projeto Alemão e pela GWSC foram disponiveis para ser analisados, mas os dados do projeto canadense (UWRSP) não foram disponíveis para avaliação . Aquíferos de rochas cristalinas nas regiões Norte e Norte Superior do país foram estudados somente como dados da GWSC.

As informações (variáveis) do banco de dados do projeto Alemão incluem data de perfuração, codigo do poço, profundidade total do poço , nível estático vazão, zona de alteração total e saturada, rebaixamento, comprimento do revestimento e do filtro e o tipo da rocha.

Os cadastros dos poços tabulares perfurados pelo GWSC abrangem dados tais como localização de poços, profundidade total, diâmetro do poço, comprimento de revestimento e filtro, níveis estático e dinâmico, vazão, rebaixamento, altitude do local do poço, espessura da zona alterada total e saturada, tipo de rocha, tipo de formação.

As estatísticas descritivas dos parâmetros principais dos poços são também dados nas Tabela 5.4.

O valor médio da espessura do manto de intemperismo é de 23,71 metros, variando entre 1,0 e 75 metros.

PARAMETROS	ESPESSURA DO MANTO DE ALTERAÇÃO (m)								PROFUNDIDADE DO POLO (m)							
Estatisticas	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL
Mínima	7,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1	27,0	17,0	16,0	21,0	20	22	18,3	16,00
Máxima	75,0	72,0	62,0	60,0	69,0	60,0	63,0	75	80,0	122,00	76,25	125,00	121,00	146,00	91,50	125,00
Média	40,0	26,25	22,58	19,6	20,7	13,15	13,15	23,71	52,23	42,68	39,12	39,43	39,14	467	43,17	42,50
D. Padrão	13,63	11,49	12,33	11,57	9,76	6,88	4,47	-	10,62	12,54	7,88	7,74	7,59	10,57	9,97	-
Coef.Var.%	34,08	43,79	54,61	59,03	47,15	42,30	33,97	-	20,33	29,38	20,09	19,60	19,40	25,34	33,91	-
N^{o} Amostra	26	151	112	67	106	63	35	560	26	151	112	67	106	63	35	560

	NÍVEL ESTÁTICO (m)								NÍVEL DINÂMICO (m)							
	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL
Mínima	1,5	0,1	0,6	0,0	0,6	0,4	0,3	0	7,33	4,27	1,76	3,02	4,26	9,32	6,40	1,76
Máxima	37,11	46,7	41,3	21,2	20,9	32,9	18,3	46,7	76,01	67,1	63,99	82,80	55,06	73,21	76,75	76,75
Médio	13,6	9,00	7,2	4,9	5,5	9,1	8,69	8,28	27,45	23,42	35,00	14,86	23,53	28,16	27,81	25,75
D.Padrão	9,62	5,11	2,88	4,03	3,07	4,64	5,33	-	19,97	12,06	28,33	9,04	7,53	12,30	15,06	-
Coef/Var.%	7,79	67,00	39,99	52,33	55,82	51,04	64,31	-	72,75	51,49	80,94	60,83	31,96	43,68	54,15	-
N^{o} Amostras	26	151	112	67	106	63	35	560	18	120	84	51	74	32	20	399

	VAZAO (m^3/h)								CAPACIDADE ESPECIFICA ($m^3/h/m$)							
	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL	BA	ASH	WR	CR	ER	VR	N/UR	TOTAL
Mínima	0,30	0,18	0,24	0,30	0,30	0,24	0,34	0,18	0,01	0,01	0,013	0,010	0,008	0,008	0,011	0,08
Máxima	23,85	15,39	19,49	30,41	27,00	15,16	21,96	36,46	1,95	1,25	1,53	1,62	2,34	1,19	1,43	2,34
Média	1,38	2,04	4,98	2,31	3,25	2,82	3,88	4,52	0,192	0,29	0,181	0,238	0,199	0,141	0,116	0,193
D. Padrão	2,92	3,72	2,18	2,74	4,49	4,50	3,33	-	0,22	0,37	0,14	0,19	0,217	0,135	0,121	-
Coef.Var.%	64,44	92,16	54,94	59,33	78,09	93,34	85,79	-	114,58	128,00	77,90	78,79	109,04	95,74	104,31	-
N^{o} Amostras	26	151	112	67	106	63	35	560	18	120	84	51	74	32	20	399

REGIÃO: BA = BRONG-AHAFO, ASH = ASHANTI, WR = WESTERN, CR = CENTRAL, ER = EASTERN, VR = VOLTA, N/UR = NORTHERN/UPPER

TABELA 5.4 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PARAMETROS DOS POÇOS EM GANA.

A profundidade tem mínimo e máximo valores de 16 e 125 metros respectivamente com o valor médio de 42,50 metros.

O nível estático varia entre 0,1 e 47,0 metros além da superfície piezometrico das vazões surgentes. O valor média de nível estático é de 8,28.

Os limites dos valores de nível dinâmico variam de 1,76m a 76,75m tendo um valor médio de 25,75 metros. O coeficiente de variação situa em torno de 56,5 % .

O valor médio de vazão é de 4,52 m^3/h variando entre um mínimo de 0,18 m^3/h até um máximo de 36 m^3/h com coeficiente de variaçào de cerca de 75% .

A capacidade específica possue valores oscilando entre 0.008 e 2,34 $m^3/h/m$, com o valor médio de 0,193 $m^3/h/m$.

6. ESTUDO COMPARATIVO DAS CARTACTERISTICAS HIDROGEOLÓGICAS E HIDROQUÍMICAS

6.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, serão discutidas comparativamente, as cracterísticas hidrogeológicas, os diversos parâmetros dos poços, e os parâmetros de qualidade da água das rochas cristalinas precambrianas dos Estados da Paraiba e São Paulo, Brasil e de Gana, África Ocidental.

As carcterísticas hidrogeológicas compreendem: espessura do manto, espessura intemperizada saturada, relevo, tipos de rochas, fraturas, e fissuras e o clima. Os parâmetros dos poços são: nível, estático, profundidade do poços, vazões, e capacidades específicas.

As características hidroquímicas incluem as principais variáveis dos constituintes químicos, em especial, os sólidos totais dissolvidos, e os elementos químicos maiores que afetam a composição e a qualidade da água.

6.2. MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEITUAIS.

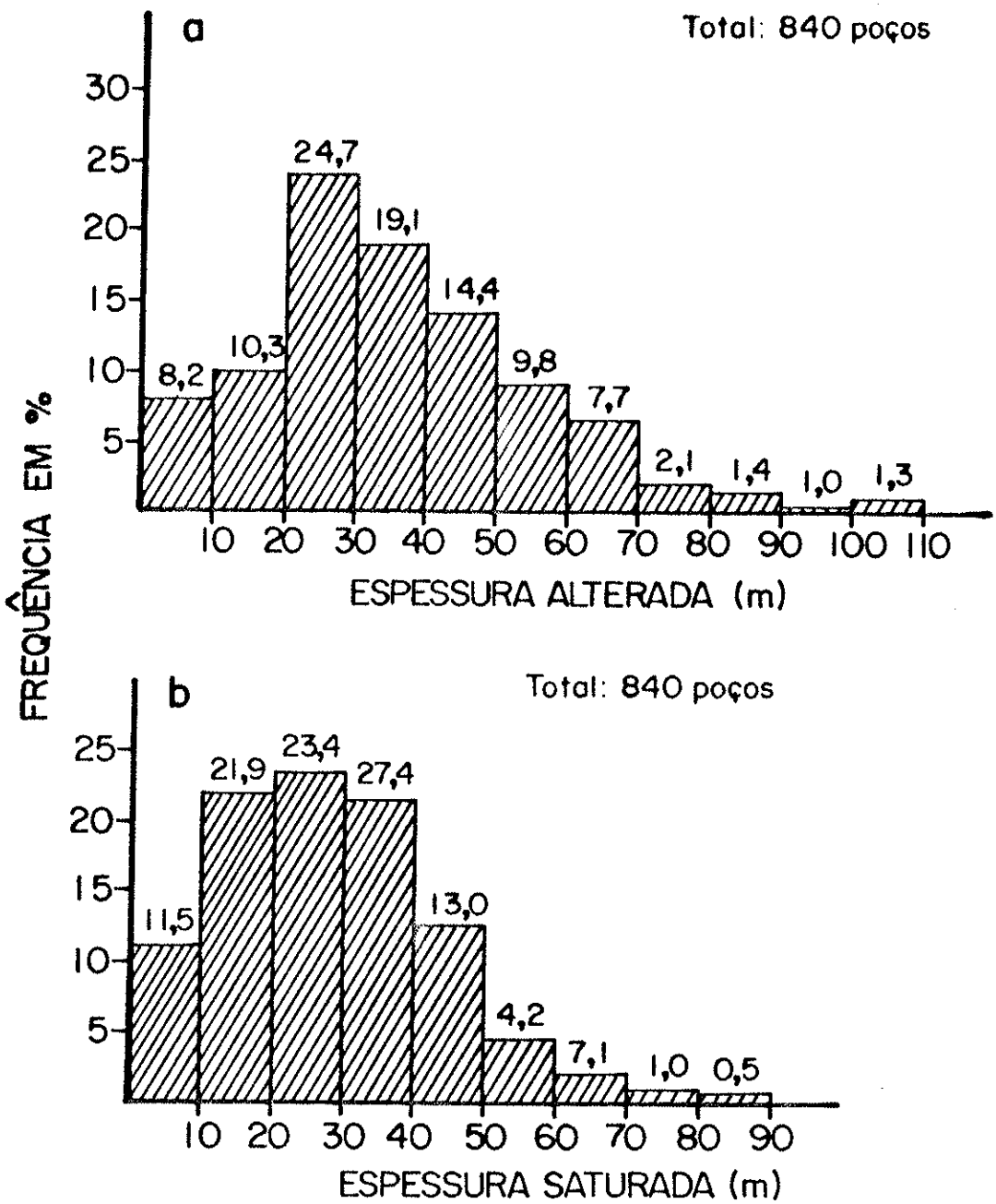
6.2.1. Aqüífero do Manto de Intemperismo

Neste sentido, foi utilizado o conjunto de dados englobando 610 poços na Paraíba; 840 em São Paulo e 560 em Gana.

A distribuição de freqüência da profundidade da zona alterada total e a espessura da zona saturada revelou que o conjunto de amostras de dados para São Paulo e Gana concordam aproximadamente com a distribuição normal, (Figs 6.1 e 6.2).

Ao contrário, a distribuição dos dados de profundidade da zona de alteração na Paraiba não é normal (Fig. 6.3). Com efeito, mais de 80% dos dados mostram uma profundidade de alteração entre 0,00 e 5,00 metros, e efetivamente nenhum poço tem profundidade de alteração maior que 12,5 metros.

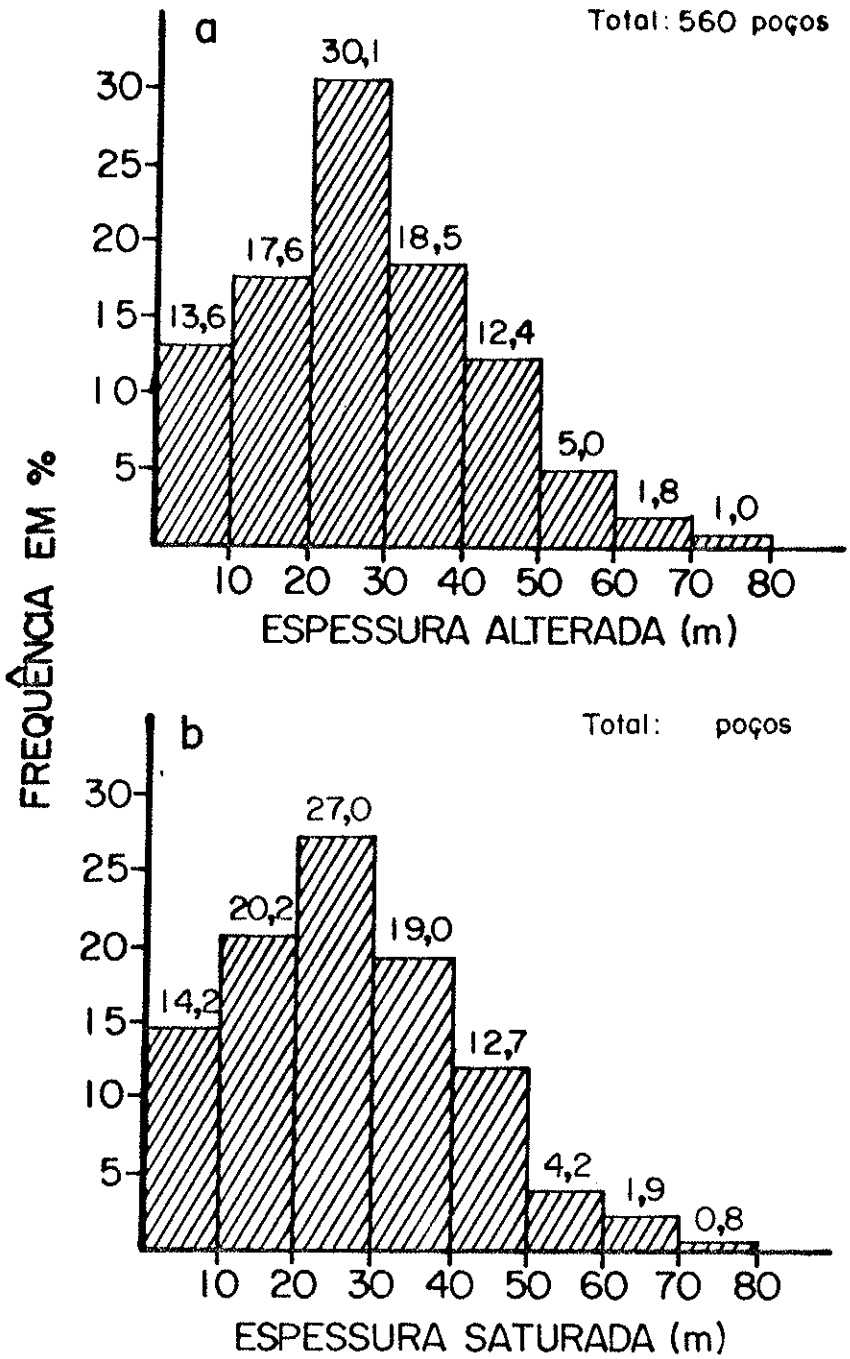
Na Tabela 6.1, destacam-se, comparativamente as características do manto do intemperismo.



a) Frequencia da espessura total

b) Frequencia da espessura saturada

6.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS FREQÜÊNCIAS DAS ESPESSURAS DO MANTO DE ALTERÇÃO E ZONA SATURADA DO MANTO - ESTADO DE SÃO PAULO



a) Frequência da espessura total

b) Frequência da espessura saturada

FIGURA 6.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS FREQÜÊNCIAS DAS ESPESSURAS DO MANTO DE ALTERAÇÃO E ZONA SATURADA DO MANTO - GANA

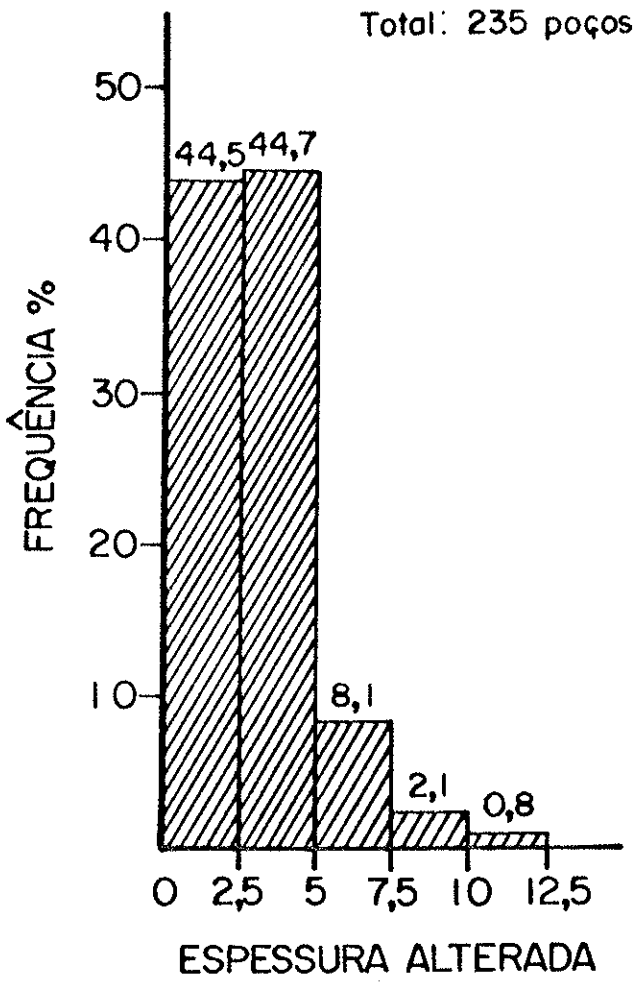


FIGURA 6.3 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA DA ESPESSURA DE ALTERAÇÃO (CAPEAMENTO) - ESTADO DA PARAÍBA

Variável	Área de Estudo	N^{o} Amostras	Média (m)	Desv. Padrão (m)	Coef.Var. (%)
Profundidade/ou	Paraíba	610	2,42	1,91	78.93
Espessura Total	São Paulo	840	42,22	22,53	53,36
da Zona Alterada	Gana	560	23,71	10,74	45,36
Espessura da	Paraíba	610	1,87	0,4	19.42
Zona Alterada	São Paulo	840	27,78	15,82	56.95
Saturada	Gana	560	16,11	7,76	48.14

TABELA 6.1. - MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA ZONA ALTERADA TOTAL E SATURADA NAS ÁREAS ESTUDANTES.

i) A profundidade da alteração (espessura total da zona de alteração) atinge valores médios de 42,22 metros e 2,24 metros, em São Paulo e Paraíba respectivamente. Na Paraíba, o coeficiente de variação é de 78%, e em São Paulo dito coeficiente é de 53,36%. A profundidade da alteração em Gana é de 23,71 metros tendo um coeficiente de variação de 45,35% .

ii) A espessura da zona saturada do manto de alteração tem, em média, um valor de 27,78 metros na área de São Paulo, e de apenas de 0,5 metros na Paraiba. O coeficiente de variação médio da espessura saturada é maior em São Paulo (57%) e menor na Paraiba (19%). Em Gana, a espessura média da zona saturada é de 18,75 metros com um coeficiente de variação de 48% .

A relação entre a espessura da zona saturada e a profundidade total da alteração intempérica, em cada uma das áreas pesquisadas, foi feita mediante uma análise de regressão linear e uso das técnicas de correlação (com especial cautela no caso dos dados obtidos da Paraíba, conforme já ressaltado. Designou-se como variável independente (Ea), a espessura total ou a profundidade de alteração, e como variável dependente a espessura da zona saturada (Es). Os dados das amostras para as diversas áreas foram utilizados para calcular a equação pelos mínimos quadrados e os coeficientes de correlação do produto-momento e outros parâmetros estatísticos (Tabela 6.2).

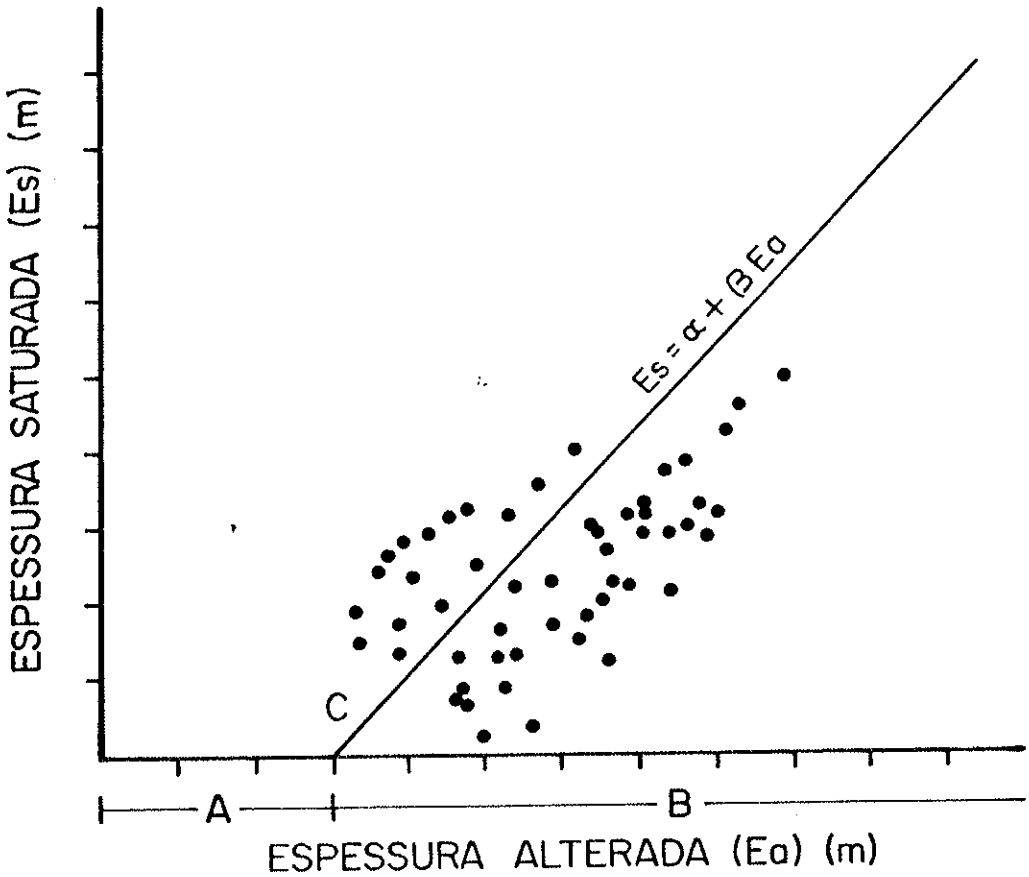
Todos os coeficientes de correlação das amostras são significativos, com um nível de significância de 0,01, o que indica que existe uma boa relação entre a espessura da zona saturada e a profundidade de intemperismo, no caso de São Paulo e Gana

Os coeficientes de regressão indicam as taxas nas quais o aumento da espessura da zona saturada, também eleva o índice incremento de vazão por unidade (metro) da espessura saturada da alteração, enquanto o coeficiente de determinação simples (R^2), mostra a proporção da variança total da variável independente, explicada pela profundidade da alteração intempérica .

O conjunto de equações de regressão foi aplicado sobre os dados, para calcular em cada área (São Paulo, Paraíba e Gana), os valores que a profundidade de intemperismo deve atingir para que a zona de saturação possa influenciar a vazão . Estas *"Condições Limites "* estão enumeradas na última coluna da Tabela 6.2.

Área de Estudo	Equação de Regressão (Es e Ea metros)	Coeficiente de correlação R	Coeficiente de Determinação simples (R^2)x100%	% de Variança Total de Es não explicado pelo modelo de Regressão	Condição limite para formação de zona saturada no regolito (m)
PARAÍBA	Es = -4,0145+0,767 Ea	0,7766	60	40	5,23
SÃO PAULO	Es = -1,964 +0,735 Ea	0,8607	74	26	2,67
GANA	Es = -2, 995+1,021 Ea	0,8326	69	31	2,93

TABELA 6.2. - ANALISE DE REGRESSÃO E CORRELAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE INTEMPERISMO E SUA ESPESSURA SATURADA NAS ÁREAS ESTUDADAS.



A: Profundidade de zona de alteração muito raso para a formação de zona saturada

B: Profundidade na qual a formação de zona saturada é possivel

C: "Condição limite" de profundidade para a formação de zona saturada

FIGURA 6.4 - CONCEITO DO CONDIÇÃO LIMITE DE PROFUNDIDADE DA ZONA ALTERADA PARA FORMAÇÃO DE ZONA SATURADA NO MANTO DO INTEMPERISMO

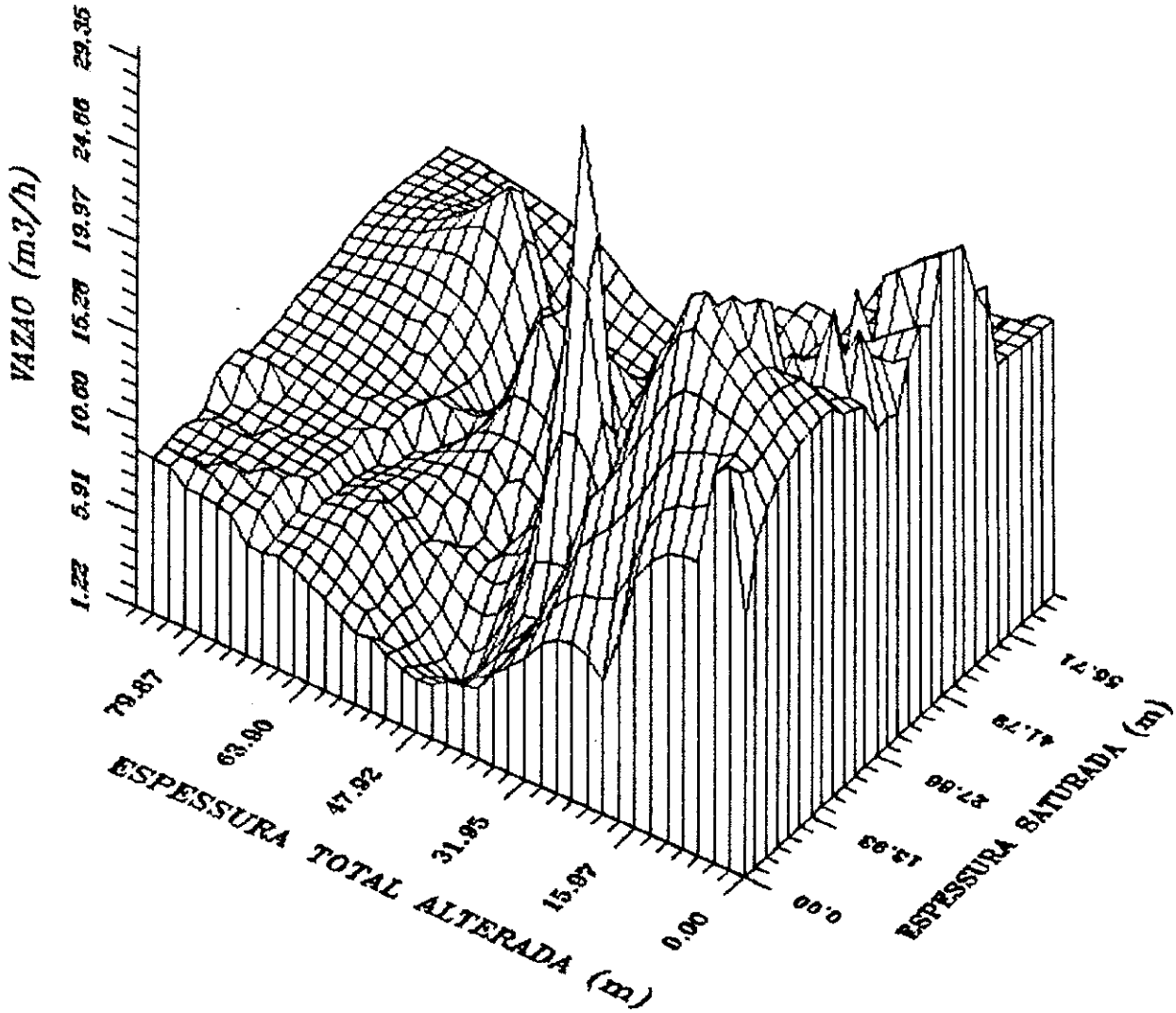


FIGURA 6.5 - RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA ALTERAÇÃO INTEMPERICA, ESPESSURA DA ZONA SATURADA E VAZÃO - SÃO PAULO

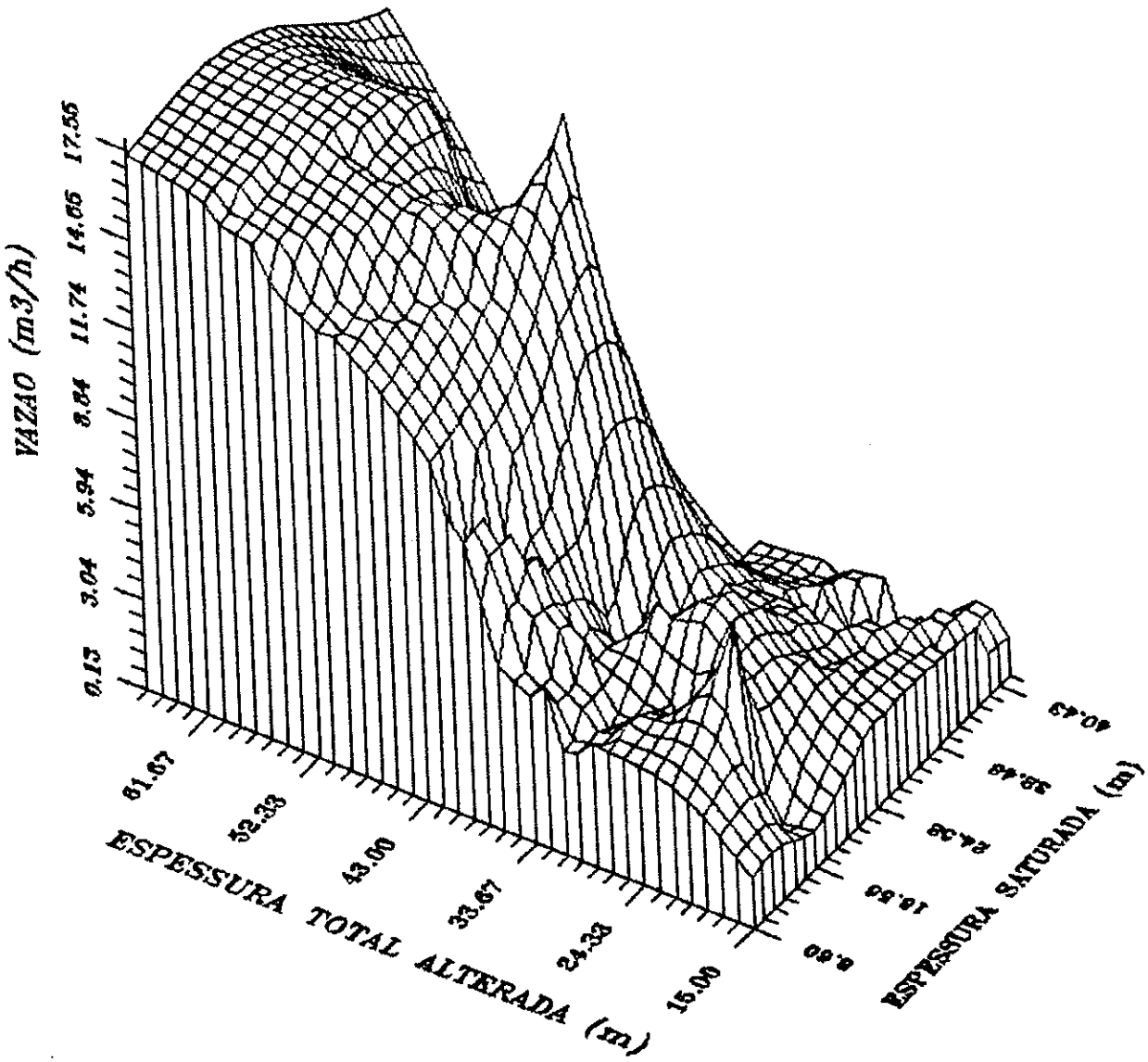


FIGURA 6.6 - RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA ALTERAÇÃO INTEMPERICA, ESPESSURA DA ZONA SATURADA E VAZÃO - GANA

Instituto de Geociências - Biblioteca
TOMBO T 1721-2-3

O conceito de "*Condição Limite* " da profundidade do manto de intemperismo para a formação da zona saturada num regolito está claramente ilustrado na Fig. 6.4 .

Os valores (R^2), dos coeficientes da regressão, assim como os valores das condiçôes limite da profundidade de intemperismo calculada, mostram que a relação entre a espessura da zona saturada e a profundidade de intemperismo é mais acentuada em São Paulo do que na Paraíba. Este contraste pode ser atribuido à influência dos valores médios anuais de precipitações pluviométricas e dos seus efeitos no balanço hídrico. A variança não explicada na Tabela 6.2 pode portanto ser atribuida, na sua maior parte, à exclusão do fator chuva no cálculo dos coeficientes da equação de correlação.

Com o uso do método de Krige, uma representação gráfica geométrica tridimensional da relação entre a espessura total da zona de alteração (capacidade do reservatório), mostra a importância da zona de alteração saturada em relação a vazão, (Figs 6.5 e 6.6).

O domínio da definição das funções representadas está dado pela seguinte relação:

$$Es = Ea - NE \qquad (6.1.)$$

Onde NE é o nível estático da água em metros e Es é menor do que Ea. A superfície visualizada no gráfico equivale à vazão, que é uma função do produto cartesiano de Es x Ea. A superfície mostra a influência conjunta da espessura da zona de alteração saturada e a espessura total da zona de alteração no valor da vazão do poço.

Em relação a Paraíba, este tratamento não se justifica, face as pequenas espessuras das coberturas.

6.2.2. Análise dos Modelos Conceituais

O modelo conceitual de DETAY e POYET (1990) foi adotado para análise da produtividade dos aqüíferos nas áreas de estudo.

O modelo conceitual geralmente é constituido de uma camada superior da rocha alterada, que é semi-permeável, com capacidade de armazenar alguma quantidade de água e de permitir infiltração da água derivada da precipitação. Subjacente à zona de materiais alterados, encontra-se

o aqüífero fissurado ou fraturado, *sensu lato,* que armazena e transmite a água através das fissuras ou fraturas.

Os vários tipos de sistemas de aquíferos, que se apresentam no meio cristalino do embasamento das áreas de estudo, são mostrados na Fig. 6.7. A zona "A" da referida figura,corresponde à camada alterada ou a espessura total de alteração, e constitui o meio de armazenamento (reservatório do manto de intemperismo). A zona "B" corresponde à faixa alterada , fissurada (meio condutivo) e a zona "C" é o meio fraturado ou aquífero fraturado *sensu stricto.*

O nível estático está indicado mediante *ne* enquanto *zs* indica a espessura saturada. As Figs. 6.7 b,e,d representam sistemas aquíferos com duas camadas (níveis), enquanto as Fig 6.7 a,e mostram sistemas aqüíferos com multi-camadas. Também existem aqüíferos fissurados ou fraturados intemperizados com uma única camada, como pode ser visualizado na Fig. 6.7 c.

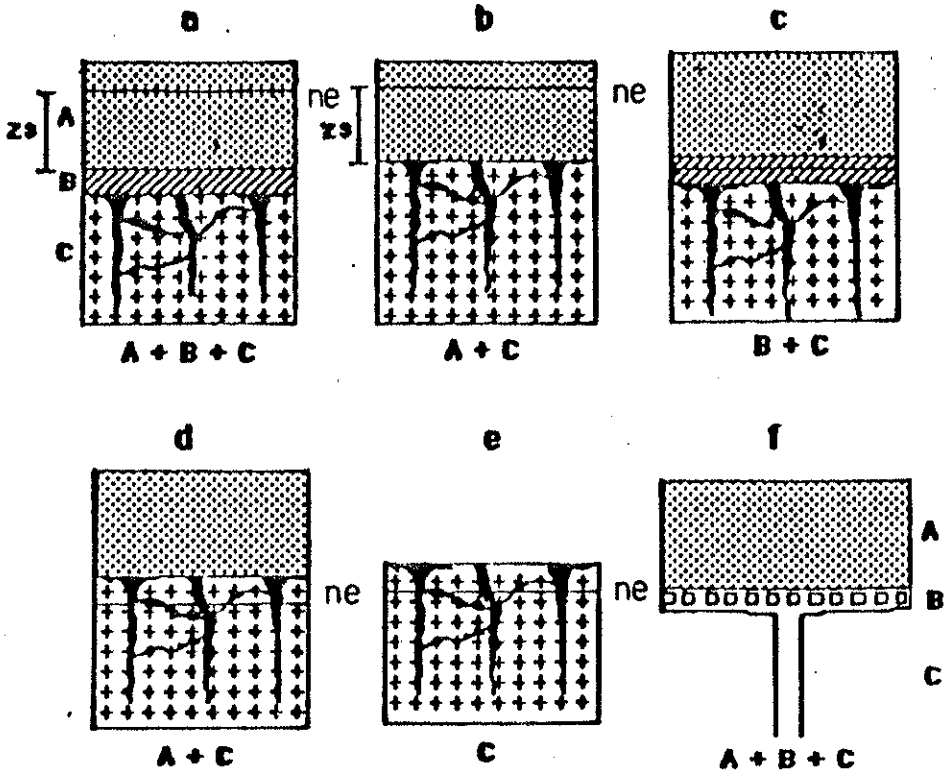
Os modelos a,c,d são geralmente aplicaveis à àrea de São Paulo, enquanto os modelos a, b, c são mais frequentes em Gana e os modelos b,d,e são característicos das condiçôes hidrogeológicas da Paraíba.

Para cada uma das áreas de estudo foram consideradas as influências da espessura do manto de alteração (profundidade de intemperismo) e a posição do nível estático ou a espessura da zona alterada saturada na vazão e capacidade específica.

A influencia da profundidade total da alteração foi calculada adotando-se segmentos de 5 metros de profundidade em ordem crescente, com amostras de dados de São Paulo e Gana. No caso da Paraíba foram tomados segmentos de 2,5 metros. Para cada área, calculou-se, também, a média correspondente de vazão e de capacidade específica de cada segmento.

Nas Figs 6.8, 6.9 e 6.10 mostra -se a influência da espessura total de alteração nos valores de vazão e capacidade específica dos poços nas áreas do estudos. Em São Paulo e Gana, verifica-se (Figs 6.8 e 6.9) que, o aumento de espessura de alteração induz maior vazão. Esta tendência não foi encontrada no caso da Paraíba (Fig 6.10).

A capacidade específica ótima ocorre ou é atingida, quando a espessura do manto de alteração fica em torno dos 40 metros em São Paulo, e entre 12 e 20 metros em Gana. Constata-se que os coeficientes de correlação entre a espessura do manto do alteração e a vazão é significativa, sendo de 0.89



A: ALTERAÇÃO --> MEIO DE CAPTAÇÃO -->RESERVATóRIA DO MEIO ALTERADO

B: ZONA FISSURADA -->MEIO CONDUTOR --> AQÜÍFERO FISSURADO

C: ZONA FRATURADO --> MEIO CONDUTOR --> AQÜÍFERO FISSURADO

F: MODELO EQUIVALENTE DO SISTEMA AQÜÍFERO

(SEGUNDO DETAY E POTEY 1990)

FIGURA 6.7 - MODELO DOS DIVERSOS SISTEMAS AQÜÍFEROS NO COMPLEXO DO EMBASAMENTO

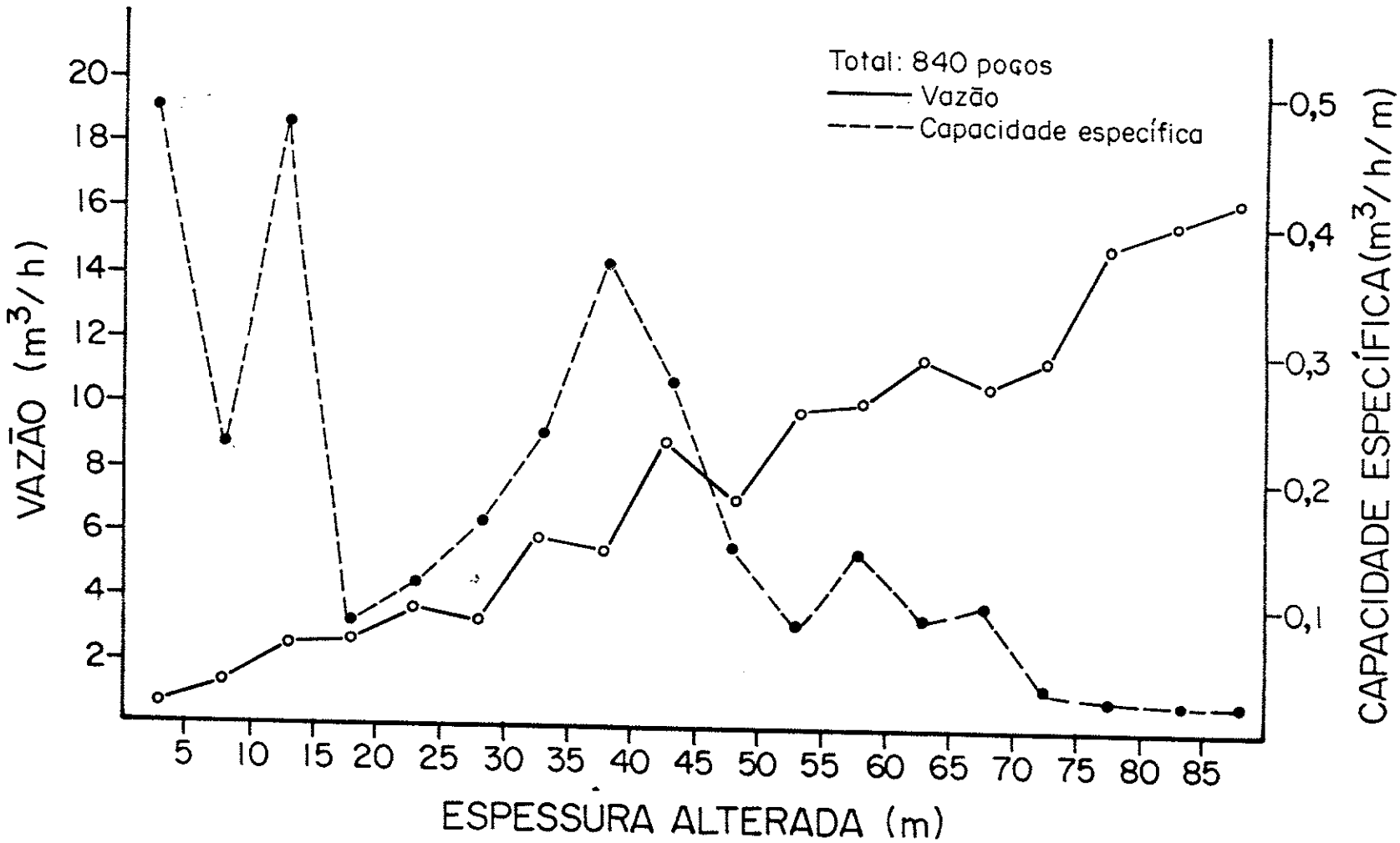


FIGURA 6.8 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO MANTO DE ALTERAÇÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS - SÃO PAULO

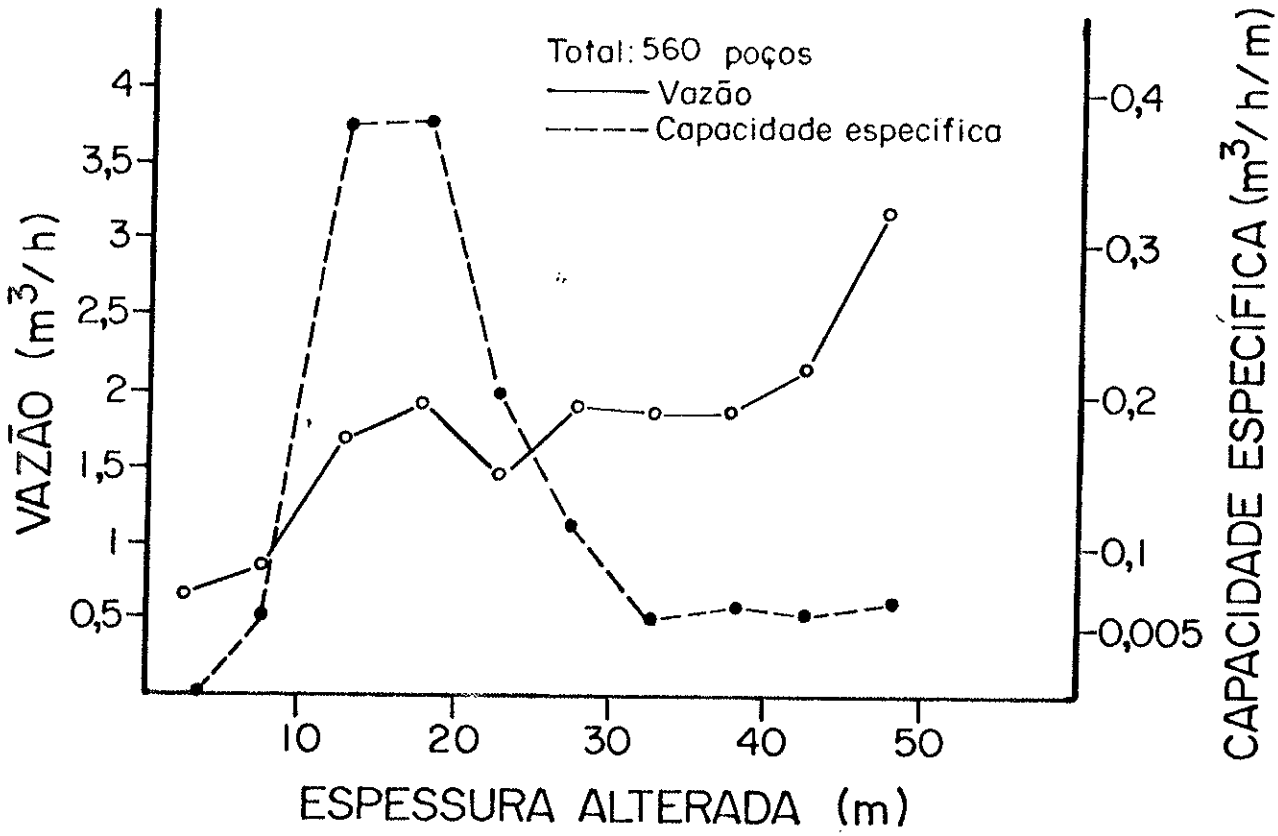


FIGURA 6.9 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO MANTO DE ALTERAÇÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS - GANA

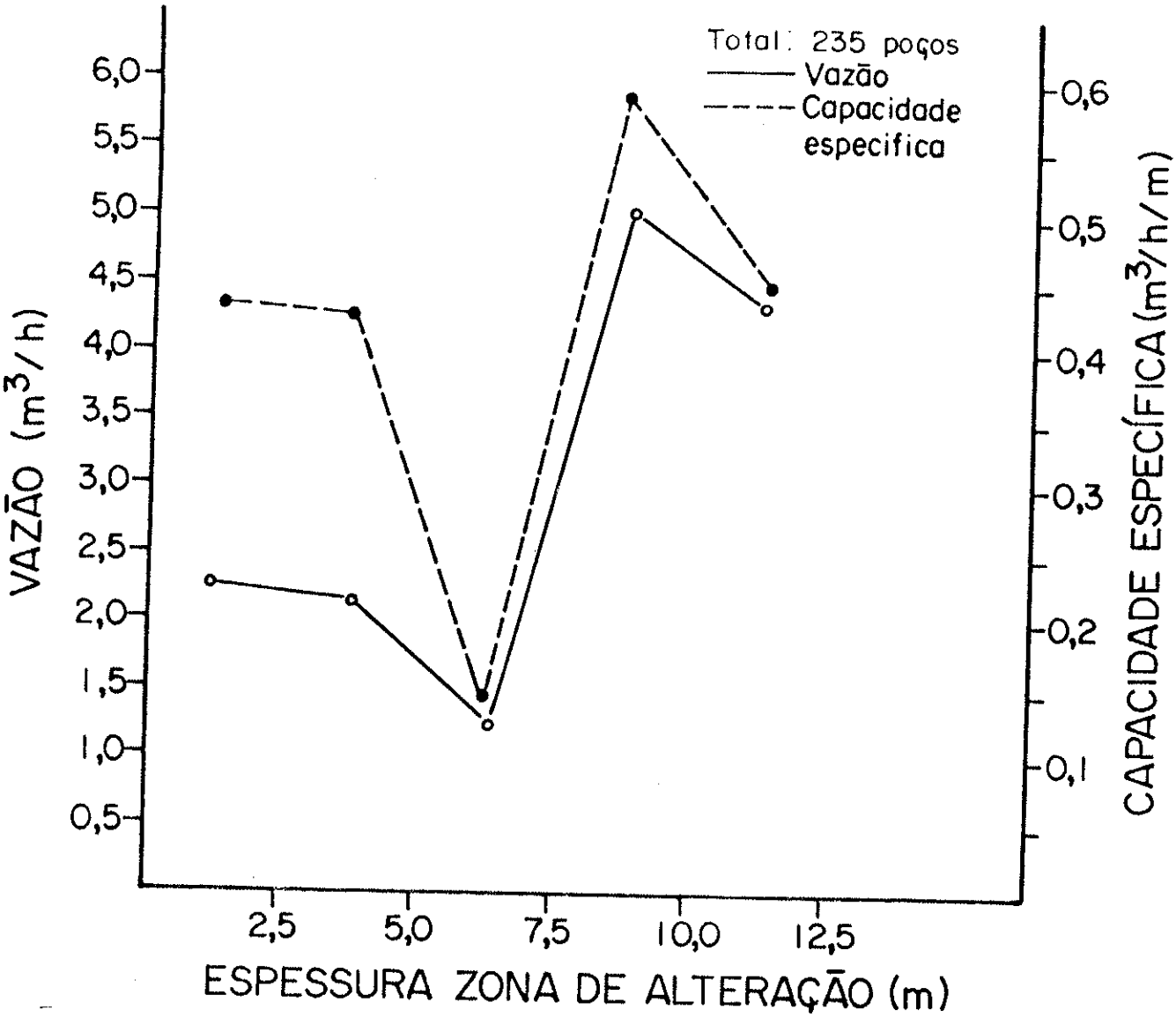


FIGURA 6.10 - RELAÇÃO ENTRE A ZONA DE ALTERAÇÃO E AS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS - ESTADO DA PARAÍBA

e 0.74, com coeficiente de variação 15% e 21% para São Paulo e Gana, respectivamente.

Não foi possível determinar uma relação entre o manto de alteração (capeamento) e capacidade específica na Paraíba. No entanto, COSTA (1986) encontrou uma relação inversa, isto é, com o incremento da espessura do capeamento há uma diminuição da capacidade específica dos poços nos aqüíferos do cristalino do embasamento na Paraíba. A sua explicação para essa relação, aparentemente anômala, é a seguinte :

i) As espessuras do capeamento são geralmente reduzidas, valores médios inferiores a 3 metros.

ii) Não existe chuva suficiente (500 mm/ano em média) para proporcionar recarga contínua e eficaz ao manto. Por outro lado, a evaporação é intensa e o seu efeito se faz sentir a profundidades superiores a espessura do manto .

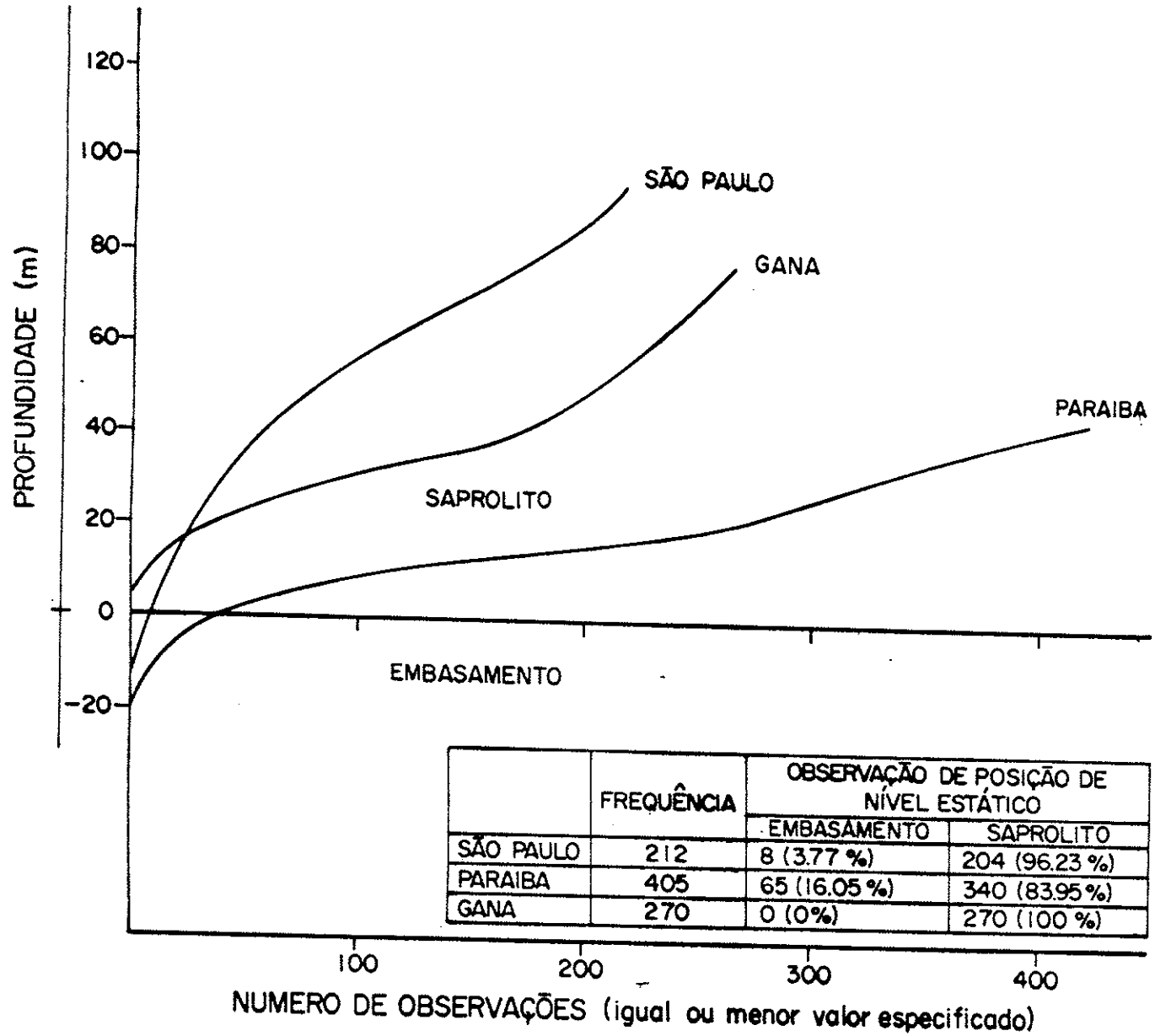
iii) A constituição granulométrica do capeamento é mais argilosa do que arenosa, tornando-o quase impermeável. Acrescentaria o efeito da capilaridade nos mecanismo de evaporação do solo.

A espessura da zona alterada saturada é determinada na pratica pela posição do nível estático. No modelo conceitual, quando o nível de água está localizado na rocha fresca *senso stricto* a zona saturada zs é negativa. Em mais do 90% dos poços de São Paulo o nível estático se localiza no aqüífero da zona alterada do manto. Em Gana, 100% dos níveis estáticos encontram-se localizados no manto de alteração . A situação na Paraíba é de que quase 80% dos níveis estáticos podem ser achados abaixo do manto (Fig. 6.11).

6.2.3. Aqüífero do Meio Fraturado

É parte consensual que as fraturas podem se constituir em reservatórios aqüíferos, independentemente dos corpos rochosos que as contenham serem perméaveis ou não. As rochas do cristalino, naturalmente imperméaveis e não alteradas, constituem reservatórios quando fraturadas. O problema que persiste é a relação entre fraturas e a produção de poços.

SIQUEIRA (1963) e COSTA (1963, 1986) subordinam aos tipos de fraturas tranversais, longitudinais e angulares à obtenção de vazões



	FREQUÊNCIA	OBSERVAÇÃO DE POSIÇÃO DE NÍVEL ESTÁTICO	
		EMBASAMENTO	SAPROLITO
SÃO PAULO	212	8 (3.77 %)	204 (96.23 %)
PARAIBA	405	65 (16.05 %)	340 (83.95 %)
GANA	270	0 (0%)	270 (100 %)

FIGURA 6.11 - POSIÇÃO DE NÍVEL ESTÁTICO NOS MEIOS AQÜÍFEROS DO EMBASAMENTO GEOLÓGICO NAS ÁREAS ESTUDADAS.

decrescentes, na órdem desta classificação, no caso de apresentarem as mesmas dimensões superficiais. Isto é, para um mesmo tipo de fratura, a de maior dimensão daria maior vazão.

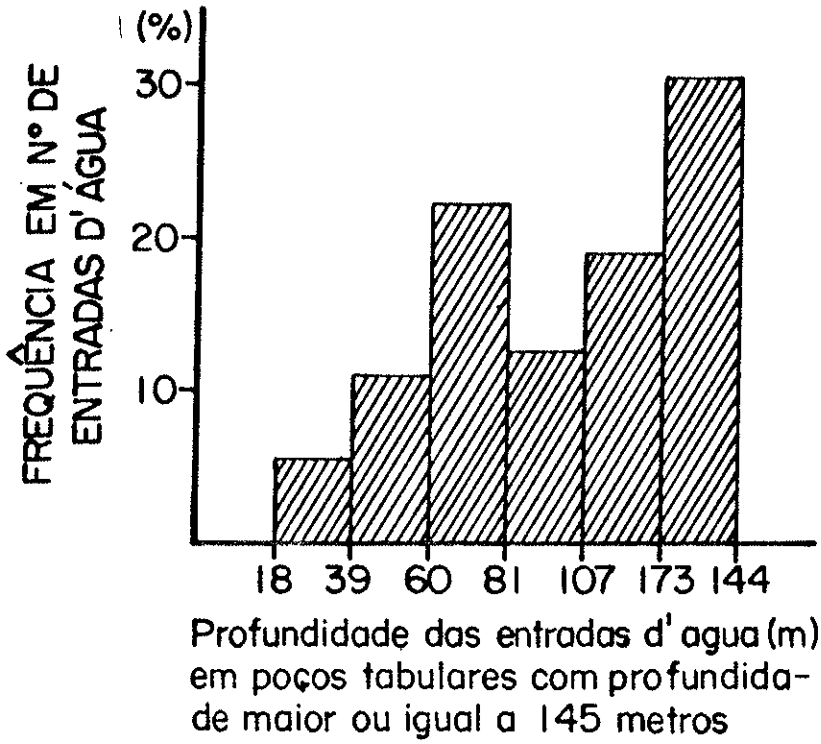
Além disso, quanto mais a rede de drenagem é coincidente com a zona fraturada, maior é a recarga, e a vazão dos poços. Aliás, segundo SIQUEIRA (op cit), a drenagem é o elemento preponderante indicador de fendilhamento. As feições estruturais como lineação e xistosidade também condicionam o desenvolvimento dos cursos de rios e riachos.

Em relação à produtividade dos poços construidos em fendas, o tipo de rocha influi na produção deste poços, na medida em que reagem diversamente à tectônica ruptural. Assim, granitos e migmatitos devem produzir mais que xistos e filitos. Entretanto , esta relação não é linear, direta, porque o fraturamento depende de vários fatores, como: intensidade, direção, sentido, ângulo de incidência dos esforços, e a profundidade em que eles atuaram. Outro fator é a coesão intergranular das rochas, ou seja, rochas finas são mais coesivas que as rochas de granulação grosseira. Por esta razão, estas últimas tendem a se fraturar menos que as primeiras.

Ao contrario da zona de alteração saturada, o coeficiente de armazamento do meio fraturado é em geral muito pequeno . Na maioria dos casos, a rede de fraturas apresenta coeficientes de armazenamento inferiores aos observados em aqüíferos confinados , isto é , entre 10^{-3} - 10^{-4}.

A dimensão da zona fraturada propriamente dita é extremamente variável, sendo indicada pela profundidade máxima em que se encontram as fraturas com condições de circulação de água subterrânea. Nos boletins analizados dos companhias perfuradoras, são encontradas informações sobre as entradas d'água dos poços . As distribuções de frequência das profundidades de entradas d'água nos poços no meio fraturdo na Paraíba e São Paulo acham-se nas Figs. 6.12 e 6.13. Nos poços do meio fraturado em Gana, estas informações não são claras, porque a maioria dos poços nesta área penetram só uns pouco metros dentro rocha sã. Estes aspectos serão discutidos mais no item 7.

A análise comparativa do comportamento dos aqüíferos nos meios fraturados em São Paulo e na Paraíba, foi feita tendo por base os trabalhos de DAEE (1981), BERTACHINI (1987), CAVALCANTE (1990), MENEGESSE (1991), ALBUQUERQUE (1984) e COSTA (1986).



(SEGUNDO BERTACHINI 1987)

FIGURA 6.12 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE ENTRADAS D'ÁGUA - SÃO PAULO

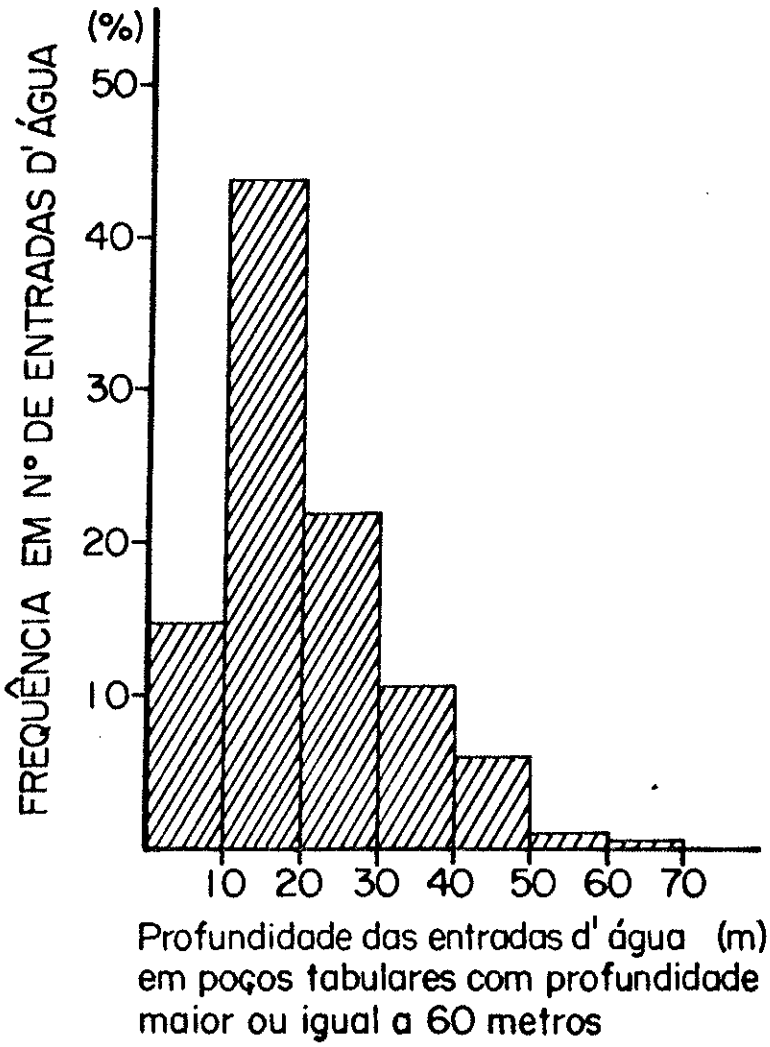


FIGURA 6.13 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE ENTRADA D'ÁGUA - PARAÍBA

De acordo com BERTACHINI (op cit) observa-se na Fig. 6.12 a existência de duas tendências de entradas d'água em poços em São Paulo: entre 60 m e 81 m e a outra entre 102 m e 144 m , e considerou a profundidade de 90 m como limite entre estas duas tendências.

Porém, destaca que o limite destas tendências é o contato entre manto intemperizado e a rocha sã - ou zona fissurada de DETAY e POTEY (op cit).

Saliente-se que o aumento em frequência de entrada d'água com profundidade não implica, necessariamente, em maior vazão, já que esta no meio fraturado se relaciona com fraturas abertas, interconectadas e fonte de recarga.

A relação entre o manto de intemperismo e meio fraturado tem sido investigada por CAVALCANTE (1990) e MENEGASSE (1991) na sub-bacia de Atibaia e na Região Metropolitana de São Paulo respectivamente , por meios de ensaio de bombeamento de poço tubular e observação dos seus efeitos sobre piezometros instalados nos diferentes níveis de profundidades dentro do manto de intemperismo.

CAVALCANTE (op cit) conclui que o piezometro no de contato entre a zona alterada e a rocha sã é o que contibui mais em termos de transferência de água subterrânea para o meio fraturado, haja vista que o rebaixamento médio do nível d'água neste piezometro foi de 2,76 metros, constatando maior condutividade hidraúlica. Nos outros níveis no manto do intemperismo o rebaixamento médio oscila entre 0,16 e 1,45 metros.

Na caracterização da produtividade dos poços nos aqüíferos no meio fraturado, DAEE (1981) analizou dados de 515 poços tubulares da Região Administrativa 5 e obteve valores para a capacidade específica entre 2,5 x 10^{-3} e 3,6 $m^3/h/m$ com mediana de 6 x 10^{-2} $m^3/h/m$ e valores mais frequentes entre 2 x 10^{-2} e 3,6 $m^3/h/m$. Na área de Jundiaí BERTACHINI (1981) determinou a capacidade específica para 189 poços, a qual oscilou entre 3,6 x 10^{-3} e 3,6 $m^3/h/m$ com mediana de 0,10 m^3h/m e valores mais frequentes 2 x 10^{-2} e 0,54 $m^3/h/m$. CAVALCANTE (1990) também calculou valores de capacidade específica para 44 poços tubulares na área de Atibaia tendo como mediana 6 x 10^{-2} $m^3/h/m$ com minimo e máximo de 2 x 10^{-3} e 0,67 $m^3/h/m$.

Além disso BERTACHINI observou a diminuição conjunta dos valores da capacidade específica e da transmissividade nos poços tubulares com

profundidade maior que 120 m , isto é, em poços que tendem a captar água de fraturas mais profundas. A transmissivdade obtida por BERTACHINI através de ensaio de bombeamento oscilou entre $1,2 \times 10^{-6}$ m^2/s e $1,4 \times 10^{-3}$ m^2/s, apresentando correlação com a capacidade específica (Fig. 6.14), através da equação :

$$\log_{10} T = 0,9 \times \log_{10} q - 0,5 \times 10^{-6} \qquad 6.2$$

onde:

T = transmissividade em m^2/s
q = capacidade específica em m^2/s

Na Fig. 6.14 observa-se que poços com profundidade total entre 120 e 200 m que, provavelmente, possuem duas entradas d'água nessa faixa de profundidade, apresentam, em geral valores mais baixos, tanto para a capacidade específica como para a transmissividade. A diminuiçÃo dos valores destes parâmetros reflete a diminuição da permeabilidade com a profundidade.

Destaque-se que, dado ao fato que o meio fraturado é livre e fortemente anisotropico, as suas características hidrogeológicas resultantes são muito variaveis.

Em áreas em que o manto intemperizado é pouco espesso ou mesmo ausente, tal como Paraíba, os valores de capacidade específica e transmissividade dependerão principalmente da abertura e grau de fraturamento das rochas na superfície

Por outro lado, ressalte-se que nas regiões úmidas ou semi-úmidas como São Paulo e Gana, respectivamente, nas quais a espessura do manto intemperizado é maior os valores destas características não podem ser atribuidas unicamente ao meio fraturado, mas devem levar em conta a existência e transferência das águas do manto do intemperismo para o meio fraturado bombeando.

Os valores refletirão características de um meio de aqüífero com dupla porosidade/permeabilidade (Fig.6.15).

Acrescente-se que a geologia estrutural, ainda, é um instrumento útil para locação de poços em terrenos cristalinos como mostrados em Fig. 6.16 para a área de Jundiaí em São Paulo . Os poços situados nos lineamentos foto-interpretados de maior extensão e que apresentam fortes evidências de fraturas, são os que possuem os maiores valores de capacidade específica.

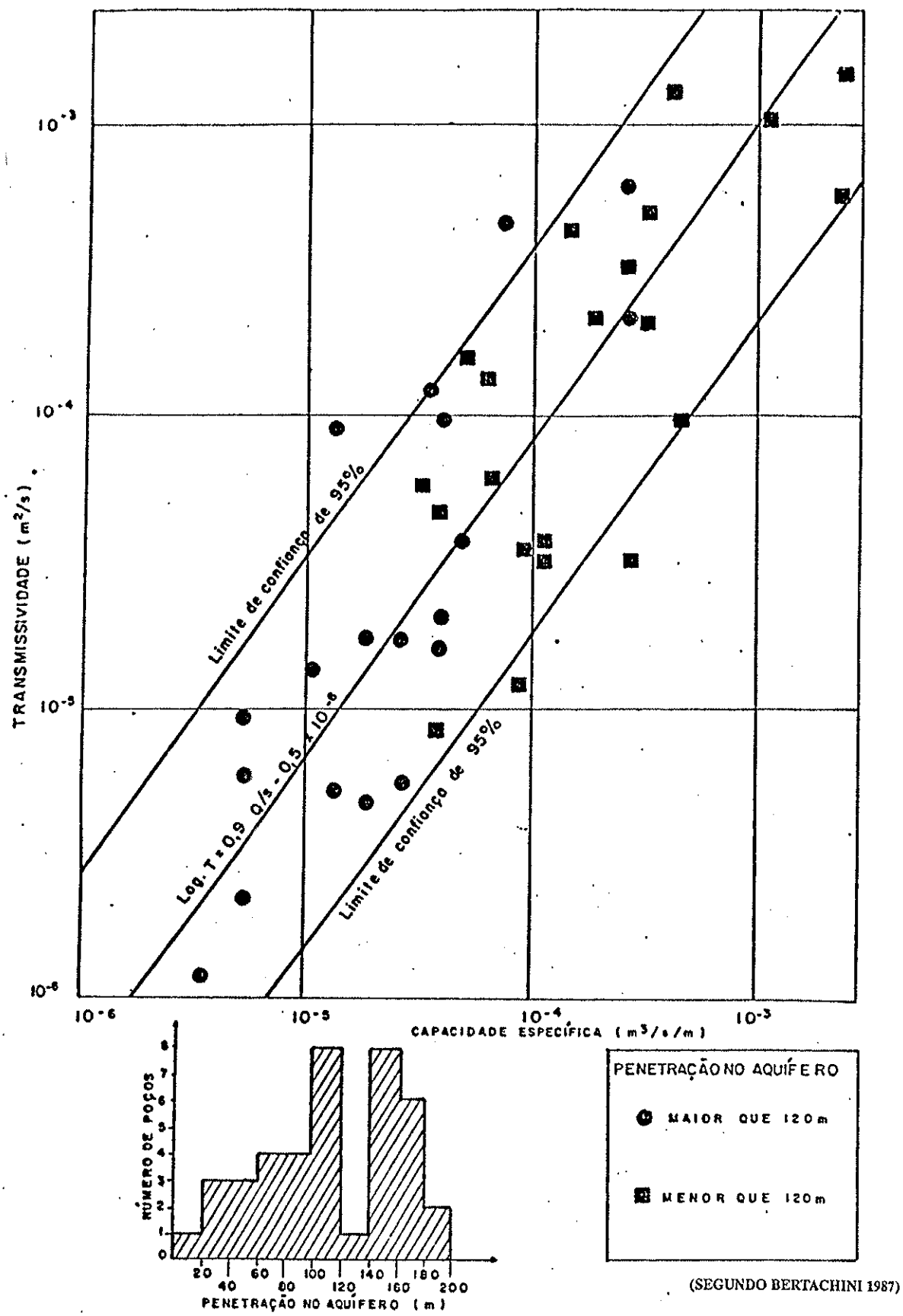


FIGURA 6.14 - RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE ESPECIFICA E TRANMISSIVIDADE - SÃO PAULO

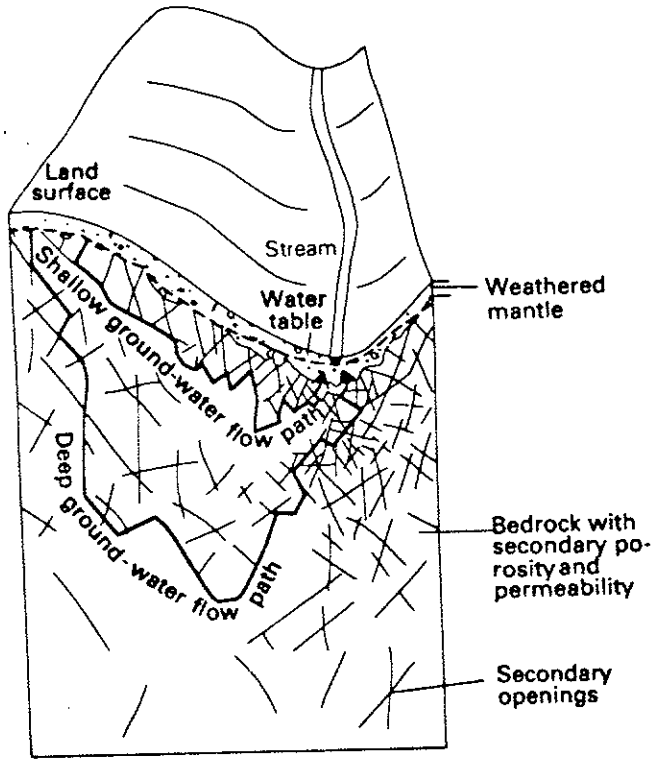
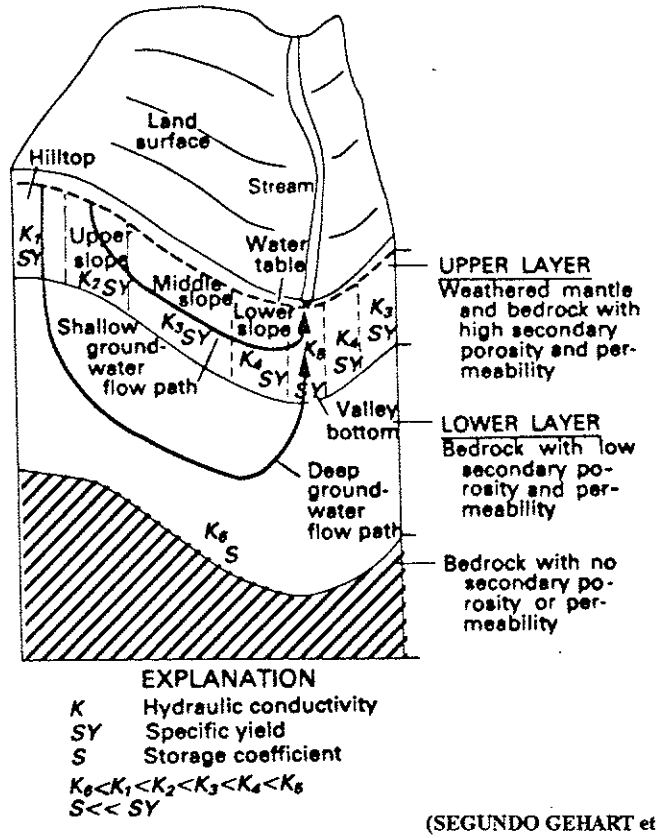


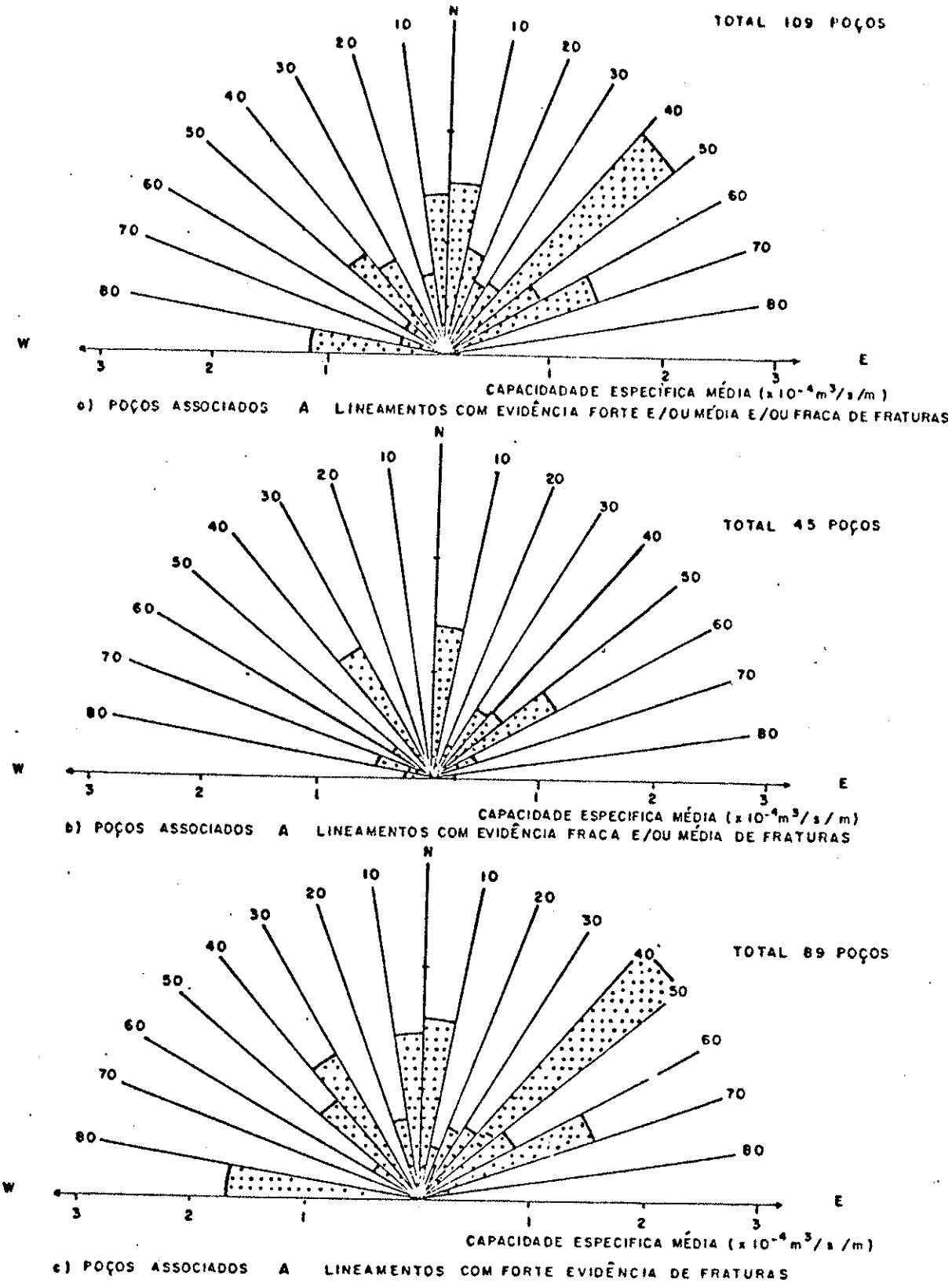
Figure a. Conceptual model of ground-water flow system.



(SEGUNDO GEHART et al 1988)

Figure b. Simplified conceptual model of ground-water flow system.

FIGURA 6.15 - MODELO CONCEITUAL SISTEMA DE FLUXO D'ÁGUA SUBTERRÂNEA NO EMBASAMENTO GEOLÓGICO



(SEGUNDO BERTACHINI 1987)

FIGURA 6.16 - DIAGRAMA DE FREQÜÊNCIA DOS VALORES MÉDIOS DA CAPACIDAE ESPECÍFICAS DOS POÇOS TUBULARES CALCULADOS SEGUNDO AS DIREÇÕES DOS LINEAMENTOS DE FRATURAS

Encontram-se na Fig.6.16 diagramas de frequência, os quais foram construidos para os poços situados em lineamentos com diferentes evidências de intensidades.

Nos três diagramas (Figs. 6.16a, 6.16b e 6.16c), observa-se que em torno das direção N45°E, N85°W, N40°W/N50°E e N-S é que são encontrados os maiores valores médios da capacidade específica, sendo que o intervalo com maiores valores médios da capacidade específica está entre N40°E e N50°E. A ocorrência de valores médios da capacidade específica mais elevados em determinadas direções está relacionada á gênese da diáclase e/ou falhas contidas nessas direções.

A relação entre profundidade e intervalos de ocorrência de entradas d'água no poços do meio fraturado ocorre no estado de Paraíba, onde a espessura do manto intemperizado (cobertura) é pouco (menoes que 5 metros) ou mesmo ausente (Fig. 6.13) .

Observa-se que a maior freqúência (43,90%) das entradas d'água ocorre nos intervalos de 10 m a 20 m de profundidade sendo 43,9%, e de 21 m a 30 m de profundidade, sendo de 27,73% no intervalo de 21 m a 30 m de profundidade. Para profundidades maiores que 30 m a freqúência das entradas d'água diminui.

Não há ligação entre o número de entradas d'água interceptadas e as suas aberturas com a produção dos poços. Realmente, poços com uma só intercepção de fraturas produzem mais que outros com duas ou três ou mais entradas a'água, e poços com entradas de água mais abertas producem menos que outras com aberturas menores ALBUQUERQUE (1984).

Os valores da capacidade específica relacionados aos tipos de fraturas proposta por COSTA (1986), pode ser visto na Tabela 6.3. Os poços que fornecem maiores capacidades específicas foram aqueles localizados em fraturas transversais tracionais, com uma média de 0,907 $m^3/h/m$. Seguiram-se na ordem decrescente as fraturas longitudinais tracionais, com capacidade específica média de 0,234 $m^3/h/m$.

Dentre as fraturas longitudinais indefinidas ou não caracterizadas, certamente existem algumas tracionais e outras de cisalhamento, o que conferiu à média valores intermediários entre aqueles de fraturas tracionais (transversais ou longitudinais) e de cisalhamento (angular ou longitudinais) COSTA (op cit).

Tipo de Fratura	Valor	$m^3/h/m$	Número de Amostras	%
Transversal tracional	Máximo	3,714		
	Minimo	0,08	16	16,5
	Médio	0,91		
Angular de Cisalhamento	Máximo	0,50		
	Minimo	0,01	37	38,1
	Médio	0,12		
Longitudional tracional	Máximo	0,36		
	Minimo	0,11	2	2,1
	Médio	0,23		
Longitudional de Cisalhamento	Máximo	0,61		
	Minimo	0,02	6	6,2
	Médio	0,16		
Longitidional indefinida	Máximo	0,90		
	Minimo	0,02	10	10,3
	Médio	0,22		
Sem fraturas	Máximo	0,29		
	Minimo	0,05	20	20,6
	Médio	0,08		

TABELA 6.3 - VALORES DE CAPACIDADE ESPECÍFICA POR TIPO DE FRATURA (PARAÍBA).

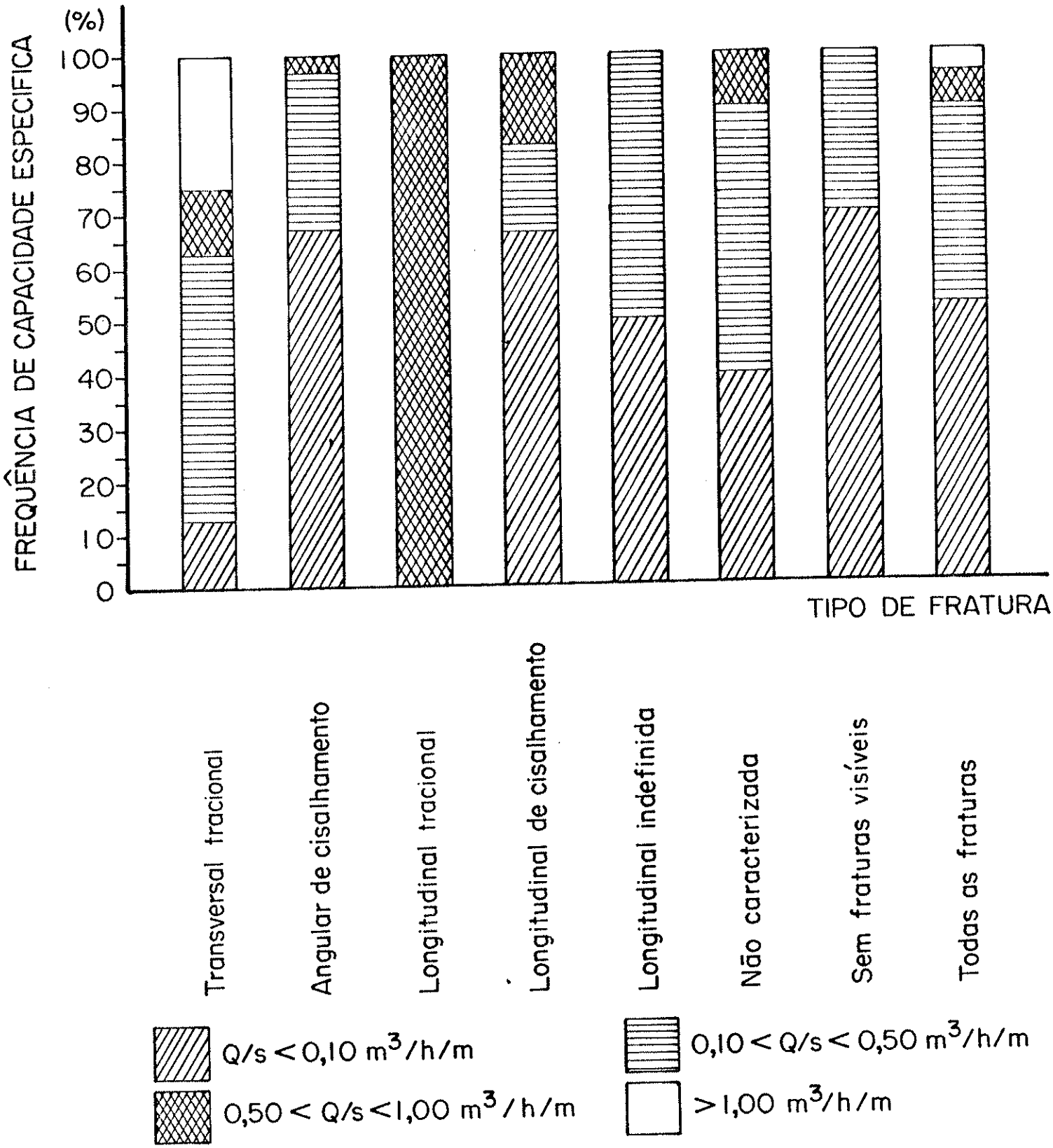


FIGURA 6.17 - RELAÇÃO DE FREQÜÊNCIA DOS TIPOS DE FRATURAS POR FAIXAS DE CAPACIDADE ESPECÍFICAS - PARAÍBA

Assim, as fraturas longitudinais indefinidas fornecem capacidades específicas médias da ordem de 0,161 $m^3/h/m$, enquanto as fraturas não caracterizadas alcançaram média de 0,218 $m^3/h/m$.

As fraturas de cisalhamento forneceram as mais reduzidas vazões nos poços que lhes interceptaram: 0,124 $m^3/h/m$ nas fraturas angulares de cisalhamento e 0,162 $m^3/h/m$ nas fraturas longitudinais de cisalhamento.

A relação de freqüência dos tipos de fraturas por faixas de capacidades específicas acham-se na Fig. 6.17. Pode-se adiantar as seguintes conclusões :

i) As melhores capacidades específicas (acima de 1,000 $m^3/h/m$) somente são obtidas quando o poço alcança fraturas transversais tracionais.

ii) A faixa de 0,50 a 1,000 $m^3/h/m$ é obtida em poços com fraturas longitudinais tracionais de forma excepcional.

iii) Cerca de 70% dos poços que captam fraturas de cisalhamento possuem capacidades específicas inferiores a 0,10 $m^3/h/m$.

iv) Setenta porcento (70%) dos poços locados sem fraturas superficiais visíveis fornecem capacidade específicas inferiores a 0,10 $m^3/h/m$, ficando os 30 % restantes na faixa de 0,10 a 0,50 $m^3/h/m$.

Desta maneira observa-se que na Paraíba, as fraturas tracionais fornecem maiores capacidades específicas que fraturas de cisalhament,o no sentido que as fraturas tracionais são mais abertas do que fraturas de cisalhamento. Da mesma maneira, entre as fraturas tracionais, maiores capacidades específicas são obtidas em poços com fraturas transversais tracionais fraturas longitudinais tracionais porque as fraturas transversais tracionais tem maiores gradiente hidraúlica a água armazenada que fraturas longitudinal tracionais.

6.3. INFLUÊNCIA DO RELEVO NOS POÇOS

Nesta secção procura-se verificar e comparar a influência da topografia na características dos poços perfurados nas rochas cristalinas do embasamento nas áreas de estudos.

Os dados de Tabela 6.4 caracterizam globalmente, os poços quanto as suas características fisicas e hidrológicas em relação com suas posições topograficas.

A vazão por unidade de profundidade do poço é a vazão do poço dividida pela sua profundidade total. Esta unidade foi utilizada no lugar da capacidade específica tendo em vista melhor refletir a influencia do relevo na posição do nível estatico. Onde não estava bem definida, pelos boletins das companhias perfuradoras, a espessura saturada do regolito (material alterado) foi obtida como sendo a diferença entre a profundidade do tubo de revestimento e a profundidade do nivel estático. Além disso, quando o nível da água num poço estava abaixo do fundo do revestimento, a espessura saturada deste poço foi considerada como zero (0).

Na metade esquerda da tabela são mostrados os valores médios e medianos das caracteristicas dos poços localizados em situações topográficas diferentes (fundo do vale, baixa, média, e alta vertente, e topo da colina). Observa-se que a ordem crescente da situação topográfica corresponde a uma ordem decrescente da vazão média , da relação vazão/profundidade do poço, da espessura saturada do manto de intemperismo.

A parte direita da tabela, define a frequência com que se pode esperar a ocorrência do valor especifico para cada uma das características analizadas. Novamente em relação a vazão, o primeiro quartil, (25%) dos poços da amostra têm valores inferiores a 1,14 m^3/h, a mediana ou segundo quartil, (50%) têm valores abaixo de 2,28 , no terceiro quartil (75%) dos poços tem valor abaixo de 4,54 e no 9° dectil (90%) dos poços tem valor abaixo de 8.18 m^3/h.

A Fig. 6.18 mostra a freqûência de ocorrência das vazões dos poços nas áreas estudadas com as situações topográficas.

Foram elaborados testes de análise de variação dos dados nas diversas situações topográficas, consideradas por área de estudo .

Os dados tendem a se agrupar em três grupos topográficos: fundos do vales, vertentes e nas colinas e planaltos (Tabela 6.5).

A influência da topografia é evidente na profundidade do nível freático . O efeito do relevo mais alto e de uma topografia acidentada em São

	Situação Topográfica							Todos os Poços				
Características dos Poços	Fundo do Vale	Baixa vertente	Média vertente	Alta vertente	Plateau	Colina	Valor Médio	1°Quart.	2°Quart.	3°Quart.	9°Dectil	Quantidade dos Poços
Vazão Média (m^3/h)	7,49	5,84	3,88	3,82	2,45	2,20	3,91	1,14	2,28	4,54	8,18	1443
Vazão Mediana (m^3/h)	4,54	3,41	2,28	2,28	1,36	1,36						1443
Vazão Média por Profundidade do Poço (m^3/h)	0,16	0,15	0,09	0,10	0,07	0,06	0,098	0,03	0,06	0,12	0,22	1443
Vazão Mediana por Profundidade do Poço (m)	0,12	0,11	0,06	0,06	0,04	0,04						1443
Profundidade Média (m)	40,00	45,75	46,54	47,80	45,81	46,70	46,97	25,93	36,30	54,75	90,71	1515
Profundidade Mediana (m)	30,87	31,72	35,99	36,30	34,16	36,69						1515
Profundidade Média do Regolito (m)	15,98	14,95	16,35	16,76	15,62	17,45	16,13	8,54	13,73	21,35	29,59	1443
Profundidade Mediana do Regolito (m)	14.03	12,20	14,34	15,25	13,27	12,81						1443
Nível Estatico Médio (m)	7,44	5,67	9,85	8,72	11,77	13,30	9,82	5,49	8,85	12,20	18,30	1515
Nível Estatico Mediano (m)	6,10	4,58	7,63	10,37	12,81						1515	
Profundidade Médio do Regolito saturado (m)	9,67	10,80	7,20	8,39	6,25	5,61	7,56	0	4,57	12,20	19,83	1443
Profundidade Mediana do Regolito Saturado (m)	7,72	8,85	4,27	5,80	2,75	3,20						1443

TABELA 6.4 - VALORES GLOBAIS MÉDIOS E MEDIANOS DAS CARACTERÍS-TICAS DOS POÇOS DE ACORDO COM NÍVEL TOPOGRÁFICOS.

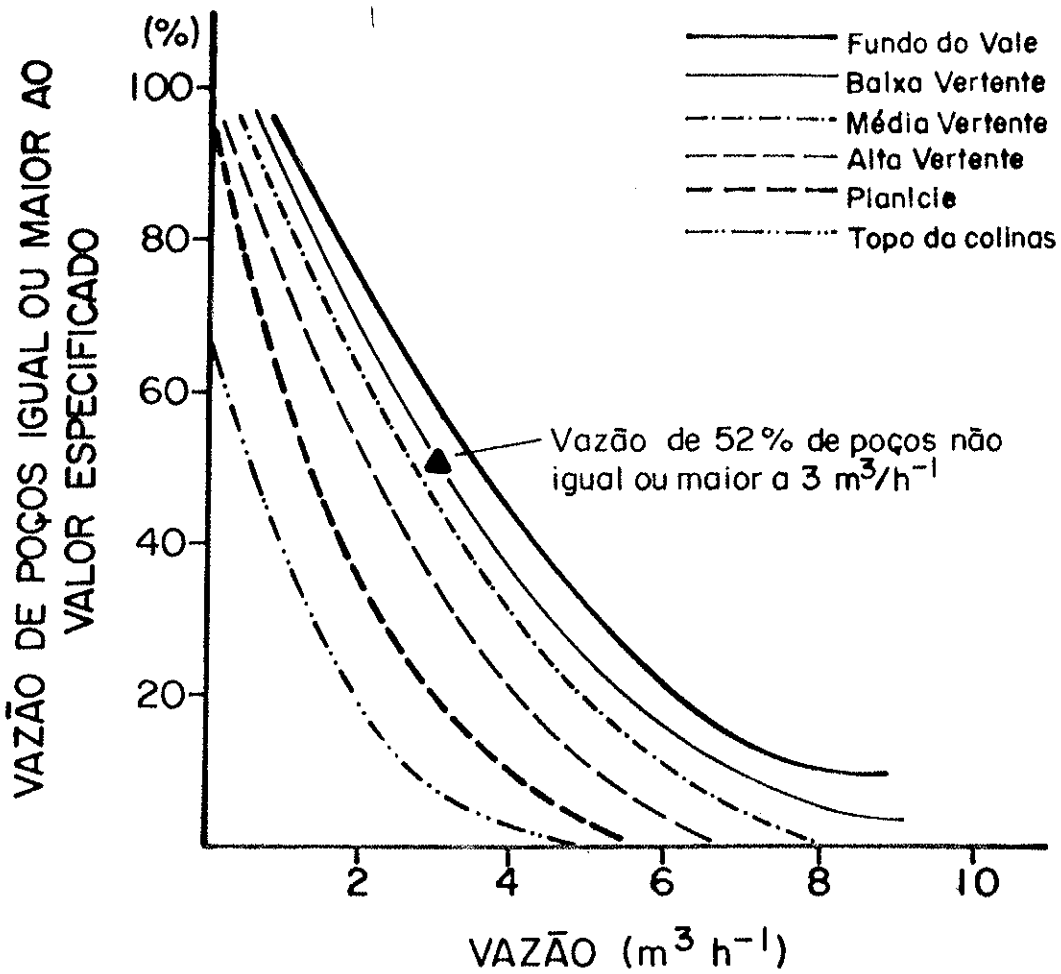


FIGURA 6.18 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA CUMULATIVA DE VAZÕES SEGUNDA POSIÇÃO MORFOLOGICA DOS POÇOS

Características do Poços	PARAIBA					SÃO PAULO					GANA				
	A	B	C	Todos os Poços	Núnero dos Poços	A	B	C	Todos os Poços	Números dos Poços	A	B	C	Todos os Poços	Numero dos Poços
Nível Estatico Médio (m)	1,64	4,89	8,74	4,56	363	5,40	13,55	19,55	10,48	680	5,40	8,90	16,32	9,55	472
Nível Estatico Mediamo (m)	1,28	4,55	7,01	3,67	363	4,80	11,08	15,64	8,34	680	4,32	7,12	13,06	7,74	472
Espessura Média do Regolito (m)	1,81	2,60	5,31	2,73	291	29,70	40,05	50,65	42,31	680	18,70	20,00	24,80	21,16	472
Espessura Mediana do Regolito (m)	1,55	2,48	4,78	2,59	291	23,76	34,04	43,22	33,67	680	13,72	18,03	19,47	16,95	472
Espessura Média do Regolito Saturado (m)	0,87	1,86	2,79	1,60	291	24,30	26,20	31,10	25,81	680	14,20	11,10	8,48	12,72	472
Espessura Mediana do Registro Saturado (m)	0,76	1,33	1,64	1,44	291	19,44	20,90	24,88	20,64	680	12,41	9,78	6,94	10,47	472

A= Fundo do Vale e Baixa Vertente, B= Média e Alta Vertente, C= Plateaux e Topo das Colinas

TABELA 6.5. - SUMÁRIO DE ESTATISTÍCAS DOS NÍVEIS ESTÁTICOS, REGOLITO E REGOLITO SATURADO DE ACORDO COM UM GRUPO TOPOGRÁFICO NAS ÁREAS DE ESTUDO.

Paulo é refletida pela maior profundidade do manto de alteração, em relação a Gana. Esta situação é consequência dos movimentos crustais que si realizaram em intensidades diferentes nas duas áreas. Isto é, em São Paulo, os eventos que deram origem a Serra do Mar propiciaram uma elevação gradativa dos níveis de base do sistema hidrológico, induzindo o aprofundamento dos processos de hidrólise, os quais atingem profundidades de até 300 m nas zonas fraturadas. Em Gana, ao contrário, o domínio cristalino é tectonicamente mais estável.

6.4. RELEVO , CLIMA E RECARGA

Determina-se a recarga e a quantidade de água explorável de um local a partir das condicões climáticas e do balanço hídrico do solo.

Os totais anuais das precipitações são extremamente variáveis dentro das áreas estudadas. Estes totais são determinados, na sua maioria, mediante distribuição espacial (isoietas) e temporal das precipitações pluviométricas (hidrogramas). Assume-se ainda , que, a longo prazo, os efeitos globais da precipitação sobre o intemperismo estão sempre em relação de equilíbrio com a média anual.

Os contornos dos níveis freáticos de água subterrânea refletem normalmente, de forma suavizade, a topografia da superfície. Os baixos valores de condutividade hidráulica, geralmente apresentados nas áreas de ocorrência do embasamento, impedem que a água subterrânea flua através dos divisóres de drenagem superficial. Geralmente, a recarga ocorre nos divisóres de drenagem e os fluxos subterrâneos desaguam no fundo dos vales.

Sobre grande parte das áreas estudadas, a topográfia está dominada por superfícies extensas de erosão constituidas por perfís policíclicos de alteração/deposição. O nível de base dos sistemas de drenagem local tem ficado estáveis durante os longos períodos de tempo, correspondentes ao aplainamento a que as superfícies foram submitidas .

Onde as influencias tectônicas recentes causaram disturbios e sublevação das superfície de aplainamento previamente estáveis, a erosão recomeçou com a penetração de água subterrânea nas zonas de fraturas novamente expostas.

A interrelação entre a recarga efetiva que se processa a partir da precipitações e o relevo, os quais controlam o grau de intemperismo no processo

da formação de aqüíferos no embasamento, está ilustrada pela plotagem dos diferentes padrões de superfície de relevo versus a variação da recarga nas áreas estudadas. Os diferentes ambientes de intemperismo que ocorrem nas áreas de estudo podem ser vistos na Quadro 6.1 . As categorias destes diversos ambientes hidrogeológicos são descritas como seguem:

- Ambiente A-1 : Esta categoría representa áreas montanhosas onde as superfícies de erosão tem sofrido sublevação. O intemperismo é muito pequeno ou não existe. A recarga sendo baixa, devido ao tipo de clima semi-árido (menor do que 100 mm) não proporciona um aumento da água subterrânea a qual normalmente ocorre em zonas fraturadas.

- Ambiente B-1 : Corresponde as áreas de clima onde recentemente tem ocorrido atividades tectónicas que alteram o declive das vertentes e reativam regionalmente a drenagem da superfície . O baixo índice da precipitação não é suficiente para prover a recarga necessária ao desenvolviumento de intemperismo profundo, formando-se então um saprolito fino e a água subterrânea ocorre nas zonas de fratura cujos vazões são baixas.

- Ambiente C-1 : Este ambiente tem baixo relevo. O intemperismo é pequeno, com uma taxa baixa de racarga. Pouca água subterrânea é disponível.

- Ambiente A-2 : Este ambiente está representado por uma superfície antiga de erosão em levantamento onde a intemperismo é moderado por causa da recarga moderada de 150 á 300 mm. A erosão da superfície está ainda ativa. A água subterrânea se desenvolve principalmente nas zonas fraturadas e nos colúvios. Os rendimentos do poço também são moderadas.

- Ambiente B-2 : Esta categoria representa as áreas de colinas onde atividades tectônicas alteraram o declive das colinas e reativaram regionalmente a drenagem superfície. A recarga adequada (150 mm a 200 mm/ano) proporciona um acrescimemnto da água subterrânea. A erosão da superfície resulta no aparacimento dos inselbergs que condicionam divisores de água. O intemperismo ocorre em bacias discretas locais, sendo controlados pelos "trends" estruturais dominantes . Os rendimentos dos poços são moderados.

- Ambiente C-2 : Este ambiente de recarga moderada (120-200 mm/ano) e baixo relevo corresponde ao tipo do intemperismo desenvolvido nas platafomas estáveis longe da influência tectônica. A principal diferença entre os ambientes C-2 e B-2 é que , no caso do C-2 as bacias do intemperismo discretos tem sido unidos lateralmente e consequentemente baixaram o relevo ; as bacias

de manto de intemperismo descritas tendem a se juntar a medida que o relevo decresce. No entanto a redução do relevo tem resultado na diminição na diferença de elevação entre pontos de recarga e de descarga e, portanto, tende a reduzir a taxa de fluxo de água subterrânea neste aqüífero extenso. As vazões nos poços são moderadas com baixa transmissividade .

- Ambiente A-3 : Nas áreas desta categoria a superfície terrestral é a superfície antiga de erosão que tem sofrido sublevação. A precipitação alta causa uma erosão muito ativa. O desenvolvimento do saprolito é muito variavel,e a água subterrânea só ocorre nos depósitos coluviais e aluviais. As vazões dos poços são baixas.

- Ambiente B-3 : Comparativamente, sublevação recente e atleração do declive pela atividade tectônica nesta área ativaram escoamento superfície regional. Osprocessos intempéricosainda estão ativos. A recarga alta de mais de 200 mm proporciona a recarga à água subterrânea e se formam aqüíferos intensivos dos saprolitos.

-Ambiente C-3: Tem relevo baixo, recarga alta (200-300 mm/ano). O intemperismo se desenvolve no terreno estável fora da influencia tectônica. O intemperismo é continuo e extenso arealmente. O baixo relevo tem reduzido a diferencia em elevação entre o ponto de recarga e descarga e portanto a redução na taxa do fluxo da água subterrânea. Os aqüíferos tem baixa transmissividade.As vazões nos poços são moderadas até altas.

TOPOGRÁFIA	RECARGA		
	BAIXA 1	MÉDIA 2	ALTA 3
Montanha A	Água subterrânea em zonas fraturadas	Desenvolvimento Principal da água subterrânea em zonas de fratura e coluviais	Erosão muito ativa com a maior parte da água subterrânea em depósitos coluviais e aluviais, desenvolvimento de saprolito variável.
Potencial Produtivo	Baixo	Moderado	Baixo
Colinas B	água subterrânea em zonas fraturadas, pequeno desenvolvimento do saprolito	Saprolito disjunto desenvolvido ao longo das zonas de fratura	Saprolito extensivo
Potencial Produtivo	Baixo	Moderado	Moderado
Planície C	Pequena quantidade de água suterrânea disponível	Saprolito extensivo	Aquífero de saprolito fino, com alta quantidade de água subterrânea e nascentes extensas.
Potencial Produtivo	Baixo	Moderado	Moderado

QUADRO 6.1 - INTERRELAÇÃO ENTRE A RECARGA EFETIVA QUE SE PROCESSA A PRECIPITAÇÕES E O RELEVA

6.5. PADRÔES HIDROQUIMICOS

6.5.1. Introdução

Foram utilizados os dados extraidos das boletins das companhias perfuradoras e publicações, especialmente, as publicações do Inventário Hidrogeológico da SUDENE para amostras da Paraíba e publicações do DAEE (1981) e GWSC (1985) para amostras da São Paulo e Gana respectivamente.

Algumas das amostras estavam incompletas, por isto, somente os valores do pH, STD e os seguintes elementos maiores dissolvidos foram considerados : Ca, Mg, Na, K (CO_3,HCO_3), SO_4 e Cl. Se um poço tiver dois ou mais dados de análises de concentrções, utiliza-se o valor médio das amostras.

Os dados de análises foram editados para eliminar amostras anomalas com altas concentrações , que foram suspeitas de representarem contaminação, erro analítico ou uma condição atípica da área. O critério de edição varia para cada área sendo baseado na distribuição de análises de cada grupo de poços nas áreas estudadas.

6.5.2 Análise Ccomparativa da Qualidade das Águas

Os limites (minímo, médio e máximo) e os coeficientes de variação de concentração dos maiores solutos, pH e STD das amostras de água subterrâneas, agrupadas por áreas de estudo, são apresentadas na Tabela 6.6 . A distribuição dos íons e outras variáveis também são ilustradas com desenhos esquemáticos ("box plots") Fig 6.19 e 6.20 .

Pela Tabela 6.6 temos que os sólidos totais dissolvidos variam de 1,9 mg/l a 20.785 mg/l para as áreas de estudo. Além disso, as águas na Paraíba parecem estar altamente mineralizadas; e as de São Paulo e Gana apresentam-se muito pouco mineralizadas .

Os valores de solidos totais dissolvidos (STD) nas amostras de água nos poços da Paraíba apresenta média de 4.422,69 mg/l, com um coeficiente de variação de 99.5% e variando entre 203,0 mg/l a 2.785 mg/l . Verifica-se que 30% dos valores de STD na Paraíba estão acima de 1.000 mg/l, limite de potabilidade para consumo humano. Em comparação, COSTA (1986),

	PARAÍBA	SÃO PAULO	GANA
	(196 Amostras)	(224 Amostras)	(166 Amostras)
Ca (mg/l)			
Média	190.86	15.08	40
Mediana	140.00	9.80	30
Máxima	832.00	32.80	180
Mínima	12.00	0.20	3.50
Coef.Var(%)	89.14	101.62	102.71
Mg (mg/l)			
Média	194.73	2.95	20.79
Mediana	106.00	2.48	15.40
Máxima	1126.00	24.50	149.00
Mínima	14.55	0.10	1.00/
Coef.Var(%)	115.50	93.48	
Na (mg/l)			
Média	837.88	41.12	23.40
Mediana	475	32.73	8.00
Máxima	3340.00	700.00	25.00
Mínima	15.00	0.00	3.70
Coef.Var(%)	105.5	42.64	67.52
K (mg/l)			
Média	35.17	2.84	4.40
Mediana	28.00	8.61	2.69
Máxima	255.00	12.00	8.74
Mínima	2.00	0,00	1.40
Coef.Var(%)	116.2		68.98
HCO_3 (mg/l)			
Média	444.24	182.24	102.61
Mediana	422.12	110.04	77.00
Máxima	756.40	1170.00	213.00
Mínima	22.00	1.00	13.00
Coef.Var(%)	35.09	90.01	65.73

TABELA 6.6. - ESTATÍISTICAS DESCRITIVAS DAS CONCENTRAÇÕES DOS SOLUTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PARAÍBA, SÃO PAULO E GANA.

	PARAÍBA	SÃO PAULO	GANA
	(196 Amostras)	(224 Amostras)	(166 Amostras)
Cl (mg/l)			
Média	1951.79	7.00	10.04
Mediana	840.00	5.86	4.50
Máxima	8.463.55	67.00	54.00
Mínima	14.90	0.00	1.500
Coef.Var.(%)	110.00	52.24	65.80
SO_4 (mg/l)			
Média	81.23	0.35	46.84
Mediana	36.70	0.27	8.21
Máxima	598.30	0.73	130.00
Mínima	6.27	0.0	0.80
Coef.Var.(%)			24.01
TDS (mg/l)			
Média	4422.69	170.00	336.00
Mediana	2369.00	156.00	186.00
Máxima	20785.00	2114.09	2160.00
Mínima	203.00	1.90	54.00
Coef.Var.(%)	99.25	76.25	128.23
Ph			
Média	7.14	6.84	6.96
Máxima	7.90	7.50	7.72
Mínima	6.00	6.10	6.04

TABELA 6.6. cont. - ESTATISTICAS DESCRITIVAS DAS CONCENTRAÇÕES DOS SOLUTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÁNEAS EM PARAÍBA, SÃO PAULO E GANA.

obteve valores médios TDS para as regiões hidrográficas ocidentais e orientais da Paraíba de 1.211,46 mg/l e de 4.680,17 mg/l, respectivamente oscilando entre um mínimo de 125,08 mg/l para a região ocidental e 355 mg/l para a região oriental e um máximo de 11.315 mg/l para a região ocidental, e 17.985 mg/l para a região oriental. Os coeficientes de variação para a região ocidental e oriental, de acordo com COSTA (op cit), são de 127,98% e 84,6% respectivamente.

Os valores médios de STD nas águas dos aqüíferos cristalinos em São Paulo são de 170 mg/l, com valores mínimos e máximos de 1,9 mg/l e 2.114,09 mg/l, respectivamente. Para 400 amostras o coeficiente de variação é de 76,25%. Em contraste com a concentração total de solutos nas águas dos poços da Paraíba, mais de 90% dos valores de STD em São Paulo são menores de 500 mg/l.

A respeito dos valores STD em águas subterrâneas de Gana, os valores médios são de 336 mg/l para 240 amostras. Os limites dos valores de STD variam de 54 mg/l a 2.160 mg/l com um coeficiente de variação de 128%.

Ânions

O cloreto é o ânion predominante nas águas da Paraíba,e o bicarbonato ocorre secundariamente.

Os valores médios de concentração de cloreto é de 1.951,79 mg/l variando entre um mínimo de 14,90 mg/l até um máximo de 8.463,55 mg/l, com um coeficiente de variação de 110%. A concentração do íon de bicarbonato varia de 22 mg/l a 756,40 mg/l, com uma média de 444,24 mg/l. O coeficiente de variação da concentração do íon bicarbonato nas águas da Paraíba é de 35,09%.

O ânion dominante encontrado nos aqüíferos de rochas cristalinas de São Paulo é o bicarbonato, cuja média de concentração é de 182,24 mg/l e flutua entre 100 mg/l e um máximo de 1.170 mg/l, sendo o coeficiente de variação de 90%. O segundo ânion mais abundante em São Paulo é o Cloreto, com um valor médio de 7 mg/l, oscilando entre 0,5 e 67 mg/l e tendo um coeficiênte de variação de 52,24%. O sulfato está praticamente ausente na maioria das amostras de água em São Paulo.

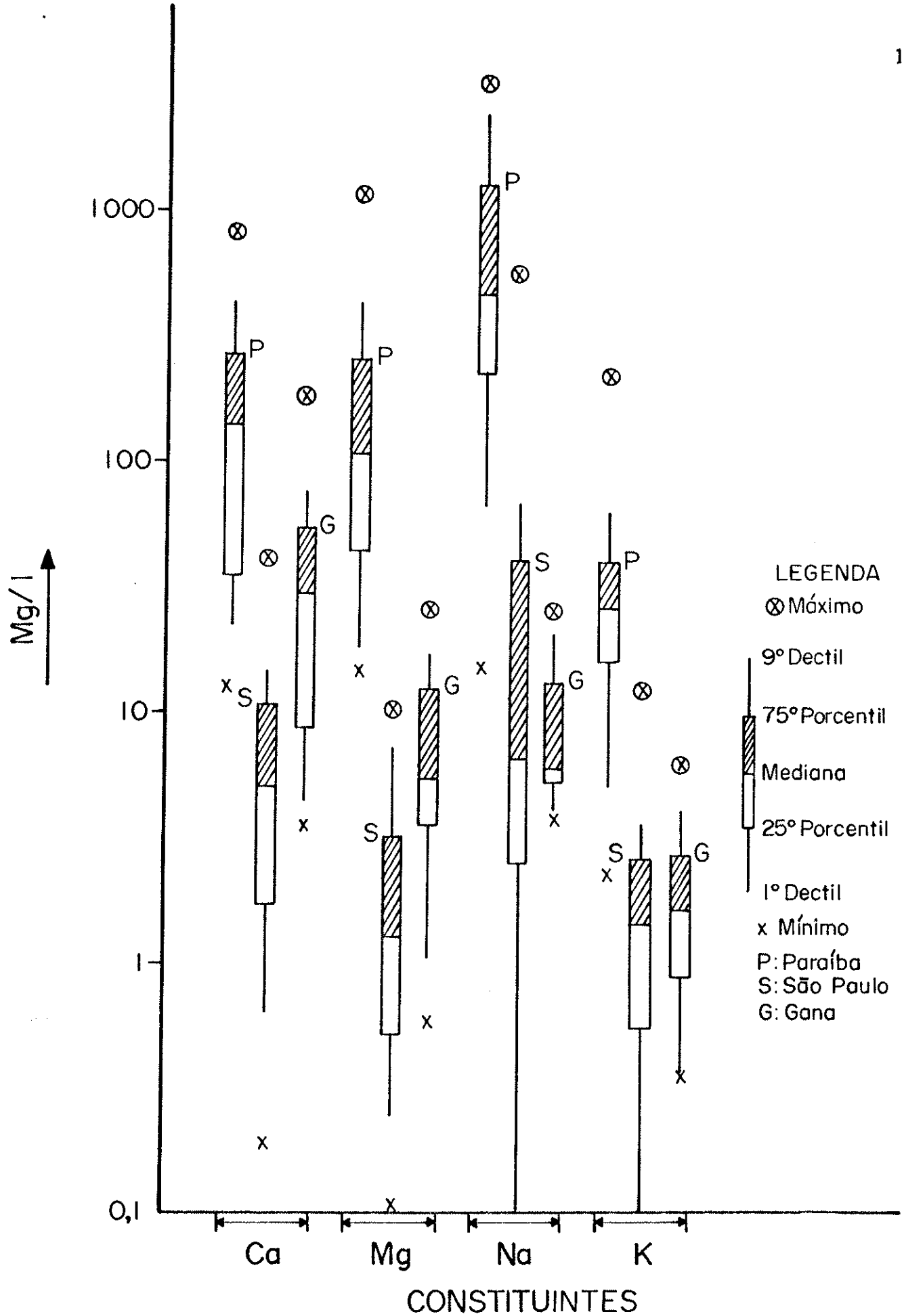


FIGURA 6.19 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA FIGURA "BOX-PLOT" DA ÍNDICE DOS CATIONS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS

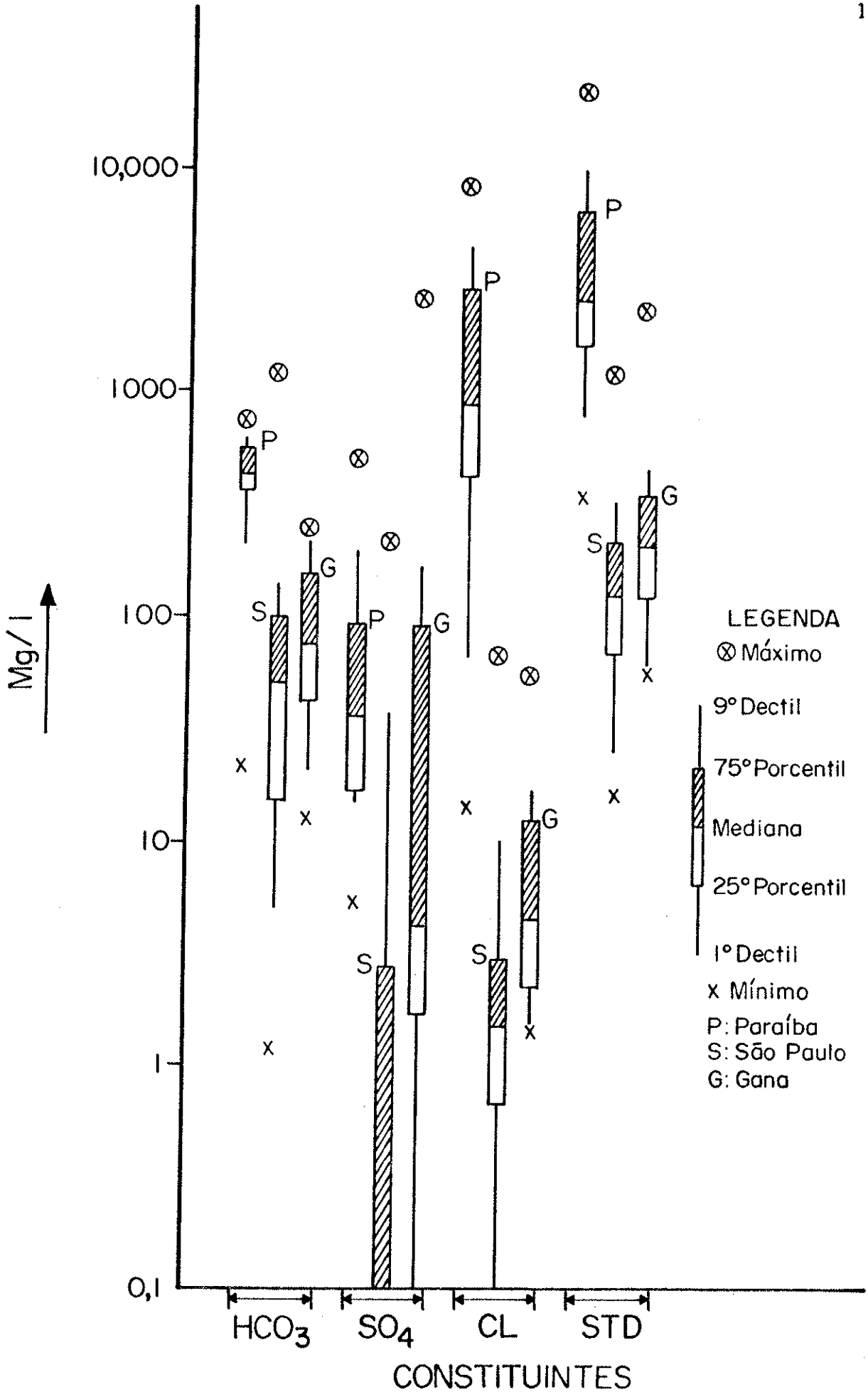


FIGURA 6.20 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA "BOX-PLOT" DA ÍNDICE DOS ANIONS E STD NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS

O bicarbonato, com uma concentração média de 102,61 mg/l, é o ânion predominante nas águas subterrâneas em Gana. Os valores mínimos e máximos da concentração de bicarbonatos em Gana são 13 mg/l e 213 mg/l respectivamente. O coeficiente de variação é de cerca de 65,73%.

O sulfato é um constituínte relativamente mais abundante nas águas subterrâneas de Gana, variando de 1 mg/l a 130 mg/l, sendo o coeficiente de variação de 15,84%. O cloreto tem uma média de 10 mg/l com limites variando entre 1,5 mg/l e 54 mg/l. O coeficiente de variação é de 65,80%.

Cátions

Na Paraíba o cátion dominante nas águas subterrâneas do cristalino é o sódio. Sua concentração média é de 837,88 mg/l e varia de 15 mg/l a 3.340 mg/l. O coeficiente de variação é de 100,5% para o sódio e varia de 14,55 mg/l a 1.126 mg/l, com sua concentração média é 194,73 mg/l. O coeficiente de variação é de 115,5%. O valor médio dos teores de cálcio é de 190,86 mg/l nas águas subterrâneas da Paraíba. Similar é a concentração de magnésio (194 mg/l). O conteúdo do íon cálcio varia de 12 mg/l, a 832 mg/l possuindo um coeficiênte de variação de 89,14%. O potássio ocorrem em baixas concentrações variando de 2,2 mg/l a 255 mg/l nas águas subterrâneas da Paraíba. O valor médio da concentração do íon potássio é de 35,17% mg/l com um coeficiente de variação de 116,2%.

Em São Paulo as águas subterrâneas das rochas cristalinas possuem valores de concentração de sódio oscilando entre 0 (zero) até 700 mg/l, com um coeficiente de variação de 42,64%. O valor médio da concentração de sódio é de 41,12 mg/l.

A concentração de íons cálcio oscila entre 0,20 mg/l e 32,80 mg/l, o coeficiente de variação é de 101,62%. O valor da concentração média de cálcio é de 15,08 mg/l.

Os valores médios de concentração dos íons magnésio e potássio nas águas subterrâneas de São Paulo são relativamente baixos, 2,95 mg/l e 2,84 mg/l, respectivamente. A concentração de magnésio varia de 0,1 mg/l a 24,5 mg/l enquanto que a de potássio varia de 0 (zero) a 12 mg/l.

Observa-se que o íon cálcio é dominante nas águas subterrâneas que ocorrem no cristalino do embasamento de Gana. O valor médio da concentração de íon cálcio é de 40 mg/l, variando entre 3,5 mg/l e 180 mg/l,

com um coeficiênte de variação de 102,71%. O valor médio do conteúdo do íon sódio é 14,06 mg/l nas águas subterrâneas de Gana variando entre 3,7 mg/l e 25,5 mg/l. O coeficiente de variação é de 67,52%. O conteúdo de magnésio varia de 5,4 mg/l a 149,1 mg/l com coeficiente de variação de 47.83% e média de 20,49 mg/l.

O conteúdo médio de potássio nas águas subterrâneas em Gana é 4.4 mg/l possuíndo uma faixa de valores de 1,4 mg/l a 8,74 mg/l e um coeficiente de variação de 68,98%.

O pH das águas subterrâneas nas rochas cristalinas da Paraíba oscila entre 6.0 e 7.0 e média de 7,14.

Em geral as águas subterrâneas em São Paulo e Gana, assim como na Paraíba, são relativamente neutras variando de 6,1 a 7,5 em São Paulo e de 6 a 7,7 em Gana. Os valores médios de pH nas águas de São Paulo e Gana são 6,8 e 6,85 respectivamente.

6.5.3. Estatísticas não Paramétricas das dados da qualidade da Água

HESEL (1987) observou que vários procedimentos paramétricos, como o t-Teste ou F-Teste, em análises estatísticas são as vezes considerados como "robustos" para os casos de destribuição não-normal. Esta "robustez" baseia-se nos resultados do teorema do Limite Central, o qual estabelece que as médias de um grande numero de amostras são normalmente distribuidas, apesar de os dados que produzem estas médias não terem distribuição normal .

Ademais os problemas comumente encontrados em procedimentos paramétricos aplicados aos dados da qualidade da água não ocorrem quando os procedimentos não- paramétricos são aplicados (HESEL 1987).

No procedimento não-paramétrico ou "distribuição livre" não precisa que os dados a serem analisados obedeçam as características de uma curva de distribuição normal ou qualquer outra forma de distribuição específica. Comparações de valores centrais são feitos usando uma ordem de mediana ou médias de dados , sendo as duas aplicáveis a dados assimétricos.

A não normalidade tão comum nos dados da qualidade de água influenciam estimativas de desvío padrão até o ponto aonde as maiores

diferenças em concentrações não são significantes usando procedimentos paramétricos (HESEL op cit).

Uma solução comum aplicada a dados assimétrico é transformar os dados usando logaritmos, e logo seguir os procedimentos paramétricos de dados transformados.

A representação gráfica do esquema logarítmico *"box plot"* das amostras de íons foi usados para os testes de transformação não-paramétrica. (Figs. 6.19 e 6.20)

O *"box plot"* é uma representação gráfica concisa da distribuição dos dados, exibindo a mediana, limites interquantil (75-25 percentil),assimetria e os valores extremos dos dados, os quais podem ser usados para estudos comparativos.

Os "Box plots" são contruidos com segue: Representa-se um retângulo ou *box* a partir do 25 percentil até o 75 percentil para que os comprimentos ou alturas do box se igual as amplitudes interquartilicas. Traça-se uma linha central através do retângulo (*box*) na mediana, ou 50 percentil.

As alturas das duas metades do box descrevem a assimétria da ditribuição, uma metade mais alta da parte superior do *box plot* indica uma distribuição assimétrica positiva. Caso a metade da parte inferior seja maior temos assimetria negativa.

Linhas verticais são traçadas do topo até a base, até os 90 e 10 percentis, respetivamente, para obter os pontos chamados *"valores adjacentes"*. Quaisquer pontos (valores fora e valores bem fora) além dos valores adjacentes são plotados individualmente. Estes podem ser valores máximos ou mínimos.

Dados das nove variáveis químicas oriundos das áreas estudadas e os seus valores logaritmos foram utilizados para normalidade.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados dos testes e dos "BoxPlots" das variáveis químicas. Verifica-se que a maioría tem distribuição lognormal.

Dado a não normalidade dos dados, as variáveis geoquímicas foram comparadas através da procedimentos não paramétricos, HESEL (1987), ROGERS (1990). Os resultados são mostrados na Tabela 6.8

	PARAÍBA			SÃO PAULO			GANA		
	D	log D	N	D	log D	N	D	log D	N
Ca	<0,01	<0,01	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	<0,01	166
Mg	<0,01	0,66	196	<0,01	0,83	224	<0,01	<0,01	166
Na	<0,01	<0,01	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	<0,01	166
K	<0,01	0,97	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	0,53	166
Cl	<0,01	<0,01	196	<0,01	0,09	224	<0,01	<0,01	166
HCO_3	<0,01	<0,01	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	0,32	166
SO_4	<0,01	0,73	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	0,02	166
TDS	<0,01	<0,01	196	<0,01	<0,69	224	<0,01	0,18	166
pH	<0,01	<0,01	196	<0,01	<0,01	224	<0,01	<0,01	166

TABELA 6.7. - NIVEIS DE SIGNIFICANCIA ATINGIDOS (P) PROBABILIDADE QUE O AFASTAMENTO UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL SÃO DEVIDOS À ALEATORIEDADE MAIS QUE A UMA DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS. (PARA α = 0,05 VALORES < 0,05 INDICA QUE A DISTRIBUIÇÃO NÃO É NORMAL).

D = DADOS BRUTOS
LOG D = DADOS TRANSFORMADO LOGARITICAMENTE
N = NÚMERO DE AMOSTRAS

VARIAVEL QUÍMICA	COMPARAÇÃO DAS ÁREAS	
Ca	SP<GH<PB	(0,0001)
Mg	SP<GH<PB	(0,0001)
Na	GH<SP<PB	(0,0085)
K	SP<GH<PB	(0,0001)
Cl	SP<GH<PB	(0,0001)
HCO_3	GH<SP<PB	(0,0001)
SO_4	SP<GH<PB	(0,0001)
TDS	SP<GH<PB	(0,0001)
pH	SP<GH<PB	(0,0001)

TABELA 6.8 - COMPARAÇÃO DOS ELEMENTOS MAIORES NAS ÁGUAS ENTRE AS ÁREAS ESTUDADAS

OS VALORES NÚMERICOS EM PARENTESES SÃO VALORES DE PROBABILIDADE (P-VALOR) QUE MOSTRAM QUE AS DIFERENÇAS OBSERVADAS OCORREM ALEATORIAMENTE, AO INVÉS DE CONSTITUIREM DIFERENÇAS SIGNIFICANTES. AS ORDENS DAS CLASSES DE MÉDIAS SÃO SIGNIFICANTES AO NÍVEL DE 0,05.

GH - GANA
PB - PARAÍBA
SP - SÃO PAULO

Os valores numéricos na tabela são as probabilidades (p_valor) da ordem das médias, devido a algumas diferenças significantes nas populações. A ordem é significante ao nível de 0.05.

As concentrações mais altas da maioría dos solutos ocorrem geralmente na Paraíba e as baixíssimas concentrações acham-se em São Paulo.

Os coeficientes de correlação de Spearman-Pearson entre as variáveis químicas em cada uma das áreas estudadas são dadas na Tabela 6.9 SZIKSZAY (1982), FAILLAT et al (1987)

A matriz triangular da correlação, mostra coeficientes elevados de correlação de 0.8 e maiores, o que indica relação entre os ions.

Na Paraíba há uma grande afinidade de Cl com Na e Mg. Há também uma forte correlação entre HCO_3 e Na e SO_4, entre Ca e Mg e também entre Na e pH em São Paulo. Em Gana a maior afinidade é entre Ca e Cl.

Uma correlação aproximada entre 0.8 e 0.5 é notada onde a relação de ions é a seguinte:

Paraíba : Ca com Mg, Na, Cl
Mg com K
Na com K, Cl
K com Cl, SO_4, pH

São Paulo : Ca com Na
Mg com Cl,pH
Cl com HCO_3, pH

Gana : Ca com Mg, K
Mg com Na
SO4 com Ca, Na, Mg e K

		Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	PH
Ca	P	1.000							
	S	1.000							
	G	1.000							
Ma	P	648	1.000						
	S	831	1.000						
	G	535	1.000						
Na	P	558	831	1.000					
	S	733	201	1.000					
	G	462	702	1.000					
K	P	266	658	643	1.000				
	S	106	045	036	1.000				
	G	624	473	181	1.000				
Cl	P	692	831	907	702	1.000			
	S	264	389	797	068	1.000			
	G	893	417	440	387	1.000			
SO_4	P	104	426	332	565	287	1.000		
	S	236	106	088	126	157	1.000		
	G	549	749	555	500	387	1.000		
HCO_3	P	036	059	040	178	072	305	1.000	
	S	299	248	954	033	763	800	1.000	
	G	174	427	097	237	105	125	1.000	
PH	P	028	232	200	504	246	077	185	1.000
	S	206	254	822	069	747	650	845	1.000
	G	210	206	810	318	076	609	097	1.000

TABELA - 6.9 CORRELAÇÃO DE REGRESSÃO ENTRE OS IONS NAS AGUAS SUBTERRANEAS DAS ÁREAS ESTUDADAS.

P = PARAÍBA
S = SÃO PAULO
G = GANA

7. ESTUDOS COMPARATIVOS DOS ASPECTOS TECNÍCOS

7.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são tratados os aspectos técnicos e metodológicos usados para construção dos poços e desenvolvimento das águas subterrâneas no complexo embasamento rochoso das áreas estudadas.

A ocorrência das águas subterrâneas nos sistemas de fissuras e nas zonas alteradas significa que os recursos em qualquer local se tornam finitos e relativamente pequenos. As reservas de águas subterrâneas estão estruturalmente controladas e portanto, suceptíveis de investigação pelas as várias técnicas, incluindo geologia de campo, fotogeologia e geofísica.

7.2. TÉCNICAS DE DESENVOLVIMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRANEAS

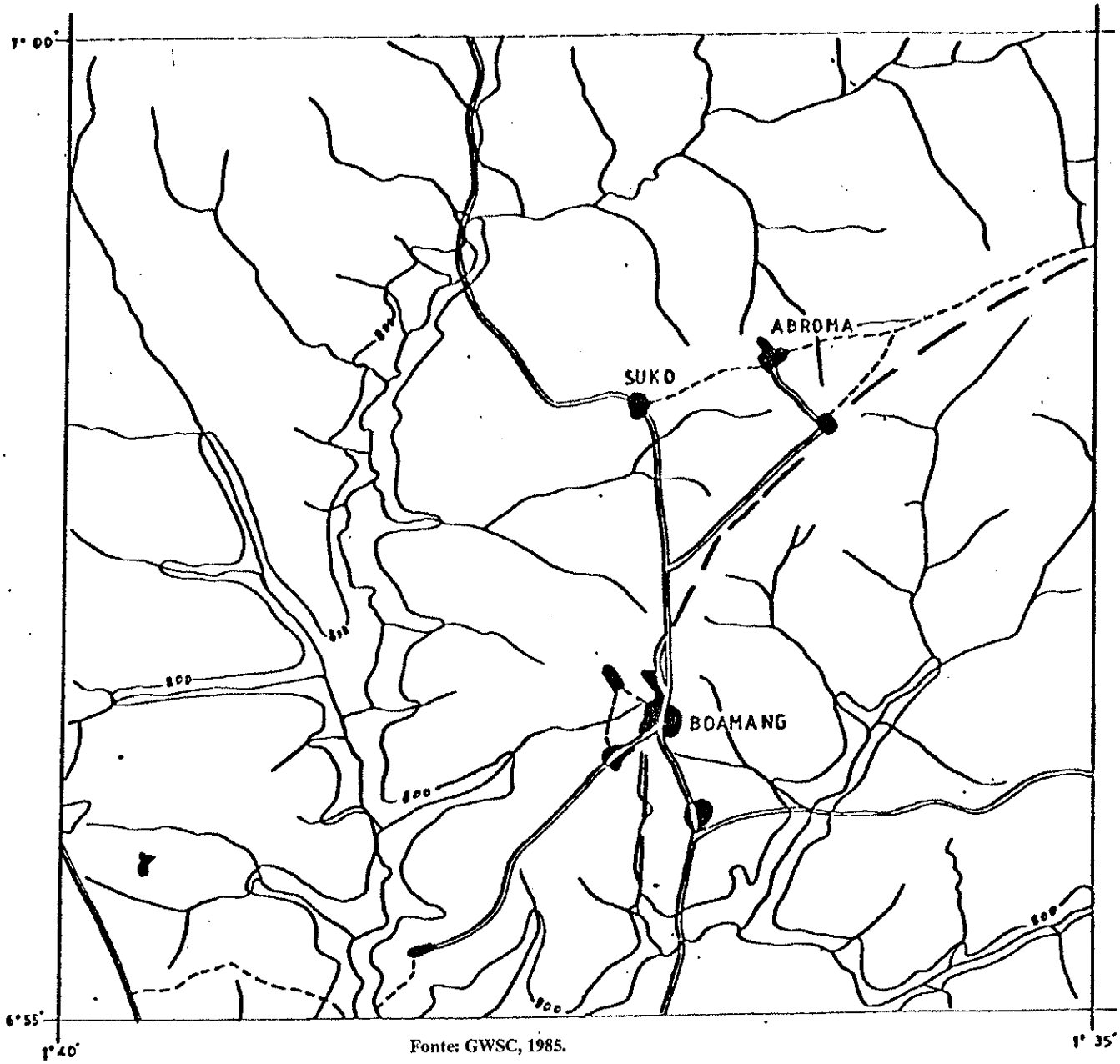
7.2.1. Locação Dos Poços

Em todas as áreas estudadas a locação dos poços foi feita por hidrogeologos, na maioria dos casos, baseados em análise de campo . As principais ferramentas para seleção de locais são fotografias aéreas, mapas e trabalhos geológicos publicados e mapas topográficos de várias escalas.

A escala mais comum de mapas topográficos usada em Ghana é 1:62.500 e 1:50.000. Nos Estado da Paraíba e São Paulo as escalas são geralmente 1:50.000 e 1:25.000.

Fotografias aéreas cobrindo Gana, Paraíba e São Paulo obtidas por técnicas convencionais e sensoriamento remoto estão disponíveis. Nas áreas áridas e semi-áridas como , Paraíba, as fotografias estereoscópicas tem sido o método mais rápido de delineamento de estruturas geológicas do complexo embasamento PROJETO RADAMBRASIL vol 23, (1982), COSTA (1986).

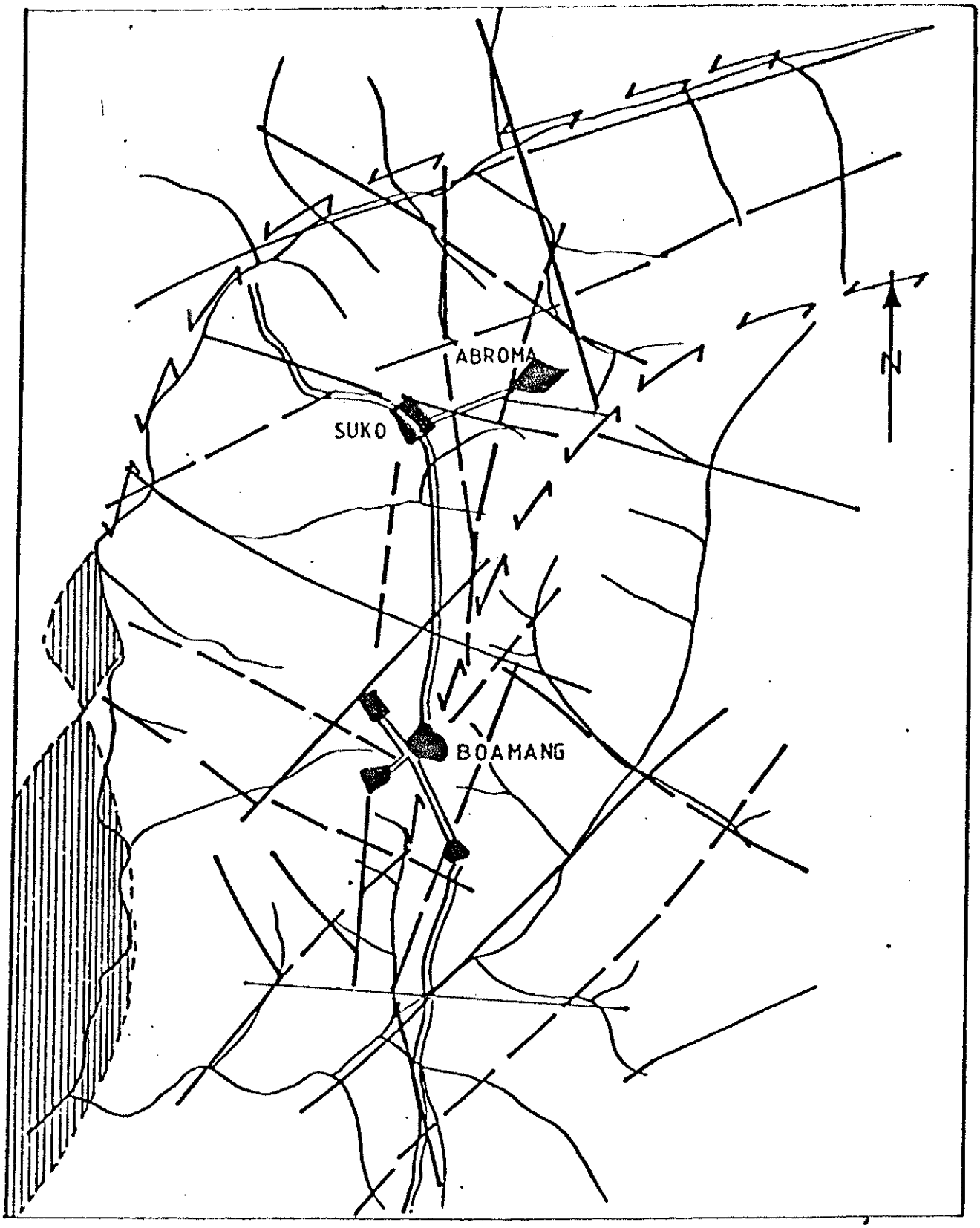
As técnicas de sensoriamento remoto, tém sido utilizados apoidaos nos mapas geológicos, proporcionando as melhores locações dos poços . Mostra-se, por exemplo, nas Figs 7.1 , 7.2 e 7.3. um examplo do uso de sensoriamento remoto em Gana.



Fonte: GWSC, 1985.

ESCALA 1 : 50000

FIGURA 7.1 - MAPA TOPOGRÁFICA DA UMA ÁREA SOB PESQUISAS PARA LOACAÇÃO DOS POÇOS EM GANA



Fonte: GWSC, 1985

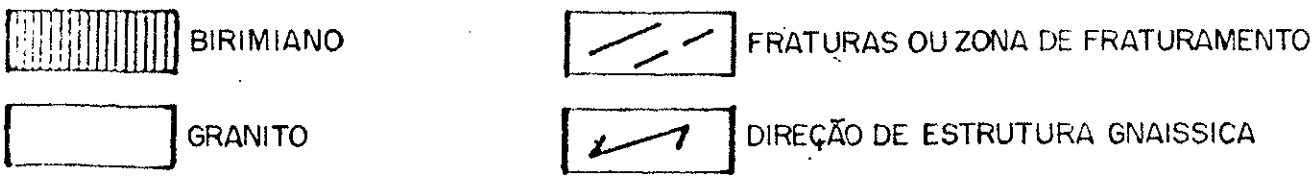


FIGURA 7.2 - INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLOGICA DA IN FIG. 8.2

ESCALA 1:40 000

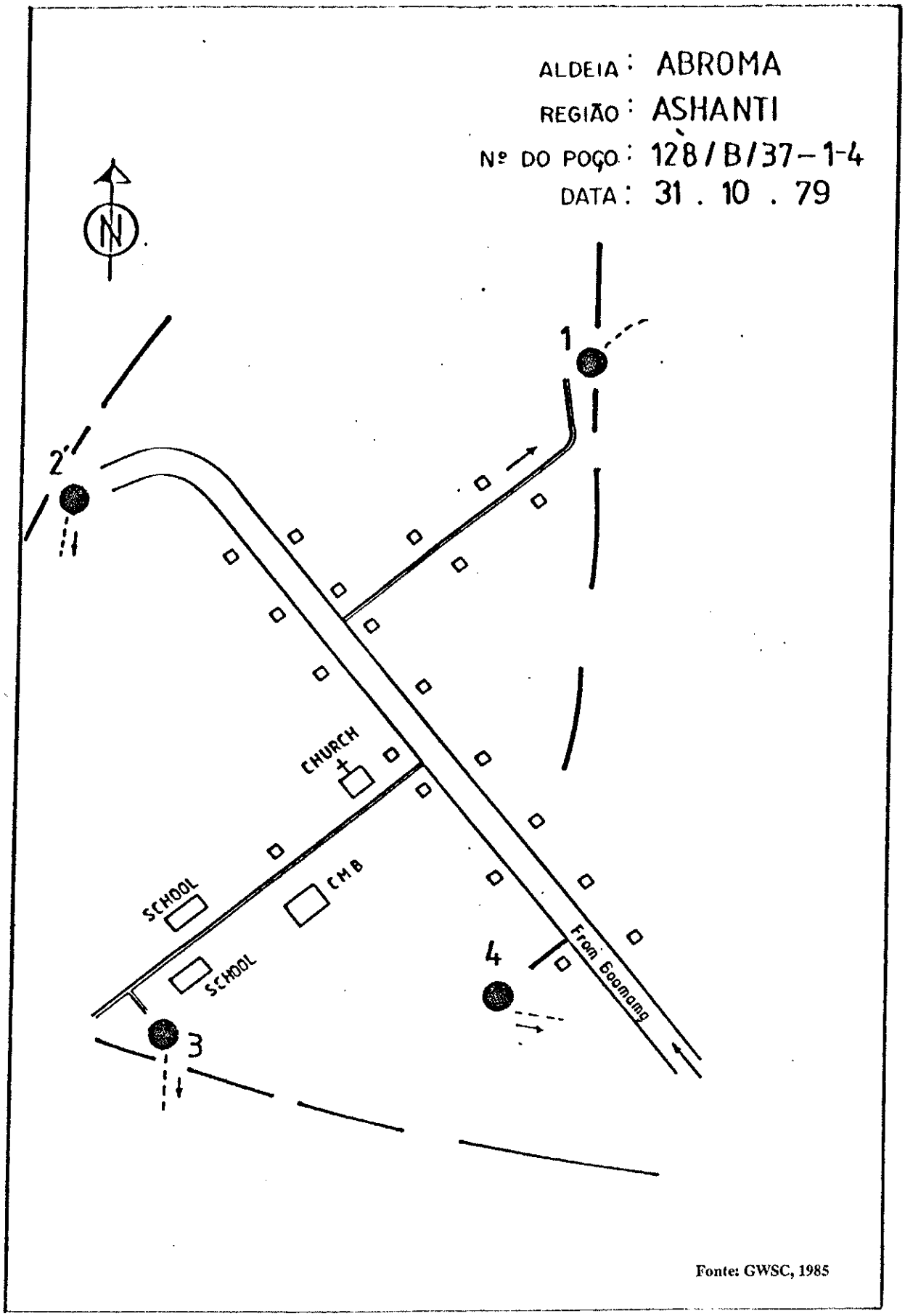


FIGURA 7.3 - LOCAÇÕES DOS POÇOS A PARTIR DOS ESTUDOS SENSORIAMENMTO REMOTO

A Fig 7.1 é um mapa geológico na escala 1:62500, no qual a informação geológica não é suficientemente detalhada para fim de selecionar os locais para perfuração. A Fig 7.2 mostra as características estruturais observadas em aerofotos na escala 1:40.000. Delinea-se um limite litológico o qual com a ajuda do mapa geológico identifica-se como granito do sistema Birmiano. Quase todas as linhas, na Fig. 7.2 representam fraturas no granito, as quais tem direção NW e NE e um conjunto de fraturas "trending' N-S. Com as informações reunidas de Fig 7.1 e 7.2 e análise de campo , foi possível locar quatro poços em Abroma (Fig 7.3) os quais produzem água das zonas do manto de intemperismo, cujas espessuras variam entre 30 e 50 m .

As técnicas de sensoriamento remoto e foto interpretação quando relacionadas com mapas geológicos, deram os melhores valores da área em Jundiaí, no Estado de Sào Paulo (BERTACHINI 1987) e do Estado da Paraíba (COSTA 1986).

Ressalta-se que, as pesquisas básicas dos recursos da água subterrânea devem ser feitas por um hidrogeólogo . A contribuição para seleção do melhor local, pela análise de campo dependente da experiência do hidrogeólogo, e deve levar em conta evidências obtidas do sensoriamento remoto e da geologia local, padrões de desenvolvimento de águas subterrâneas no local e vegetação do local.

No que concerne a geologia, os principais elementos a distinguir no campo,são o sentido e o angulo de mergulho dos planos de fraturas e a partir desses dados, a definição da distância dos poços da fonte de recarga (rio, riacho,açüde etc). As situações de interseções de duas fraturas ou mesmo de uma fratura aberta com superficies de descontinuidade (xistosidade, clivagem, estratificação, contatos geologicos etc) são as mais favoraveis para locação de poços.

De qualquer jeito, em alguns casos, especialmente em projetos de abastecimento de água nas áreas rurais em Gana, os locais selecionados baseados nas evidências acima tem que ser modificados devido fatores antropicos tais como, poluição do solo e dificuldades de acesso dos locais.

Acrescente-se que os estudos geofísicos de superfícies têm sido um auxilio valioso, provendo informações sobre as condições da sub-superfície no Estado de São Paulo ELLERT e MENDES (1982), DAVINO (1982), MARQUES et al (1984), SILVA (1984) e MARQUES (1986).

As técnicas geofísicas mais usadas nas pesquisas para locação dos poços são os métodos de refração sísmica e eletro-resistividade. Os estudos geofísicos, junto com as análises de campo, foto interpretação e sensoriamento remoto, tem sido usados para definir a zona de fratura ou manto do intemperismo nas áreas do embasamento geológico.

BERNARDI e MOUTON (1981), usando dados de vários poços perfurados na África Ocidental Francophone e Gana sugerem que a seleção dos locais dos poços pode garantir uma vazão mínima de 1 m^3/h (0,3 l/seg), sendo 70% - 80% dos locais em rochas metamórficas e 50% - 60% dos locais , em rochas ígneas . Salietam que, o uso de foto interpretação, aumentará os níveis de sucesso a 90% em terrenos metamórficos e de 75% em rochas ígneas. Concluiram que a utilização dos métodos geofísicos pode incrementar estes resultados para garantir a vazão de 1.0 m^3/h em 80 - 100% dos poços em terrenos ígneos.

De qualquer forma, em vista da experiência prática em exploração de água subterrânea para comunidade rural nas áreas do embasamento em Gana, reparou-se que geo-pesquisas detalhadas não são necessárias para atingir o alvo do abastecimento de água. Torna-se necessário investir em estudos geofísicos nos casos de grandes projetos para fim do uso industrial ou para irrigação .

Por enquanto, considera-se que a necessidade de um estudo geofísico pode ser definida tendo-se por base os objetivos particulares como seguintes :

1) Podem os lineamentos serem melhor definidos usando métodos geofisicos, e quais são os métodos mais apropriados?

2) Se no lugar já foi perfurado poço com resultado insatisfatorio, pode a geofisica melhorar o resultado?

3) Poderá a locação realizado após a prospecção geofisica ser rejeitada?

4) Poderia o local de perfuração ficar maispróximo à vila?

5) Qual seria a economia de custo da exploração, se a pesquisa geofísica melhoraria a taxa de sucesso total, ou otimizaria a produção dos poços ?

6) Pode um trabalho geofísico dar alguma informação sobre a qualidade da água?

Em quase todos os casos as observações geofísicas podem contribuir para o entendimento da geologia da área de estudo.

7.2.2. Desenvolvimento de Água Subterranea

Os métodos usados para o desenvolvimento da água subterranea estão claramente ligados a profundidade do nivel freático e da demanda de água. Ainda que a escavação manual (ou escavação mecânica) de poços rasos continuem sendo comuns, a perfuração dos poços tubulares nas áreas sob estudo tem feito avanços consideráveis.

QUIST (1987) inventarisou 14.000 de poços escavados em Gana. De mesmo jeito o número de poços escavados em São Paulo e Paraíba atinge a casa de milhares.

A água subterrânea está sendo aproveitada nas áreas estudadas através da escavação manual de poços rasos de 1.0 metro ou mais de diâmetro. A profundidade depende da facilidade com que o poço é escavado; sendo que este poço é revestido com anéis de concreto. Assim, o poço escavado cria um reservatório o qual é enchido pela filtração noturna, garantindo o uso diário.

Por outro lado, a água subterrânea ocorrendo no manto de intemperismo aspesso e nas rochas duras fraturadas são desenvolvidas pelos poços tubulares, perfurados e desenhados usando-se os critérios estabelecidos. As técnicas de perfuração tem se desenvolvido muito nas regiões do estudo.

De modo geral a perfuração a percausão tem sido o método mais comum de construção de poços nestas áreas.

Até recentemente (anos 80) , alguns poços perfurados nas áreas do embasamento em Gana foram relativamente improdutivos, porque muitos destes poços foram terminados em rochas frescas subterrâneas, captando somente a água no regolito saturado (aprox 25 m) usando perfuração rotativa.

Mas nos dias de hoje, com aplicações de novas técnicas de perfuração chamadas "Down the Hole Hammer", é possível perfurar com facilidade através e abaixo do regolito dentro as rochas do embasamento, as

quais nas pequenas profundidades logo abaixo do manto, são altamente fraturadas, garantindo alta produção de água.

Na perfuração com "Down the Hole Hammer", um martelo de percursão é encaixado na ponta da haste de perfuração. Através da ação de um compressor de ar comprimido na superfície, o martelo trabalha a alta frequência e pulverisa as rochas duras até grandes profundidades. Como avanço do martelo perfura-se rocha fraturada que constitue bons aquíferos. Tal perfuração em rochas duras tem alcançado as profundidades maiores que 100 metros.

7.2.3. Projeto e Construção dos Poços

Um bom projeto e construção de poços é fundamental para garantir o sucesso do projeto de abastecimento de água a longo prazo, e aumentar a produtividade dos poços, diminuir a necessidade de manutenção da bomba, devido a redução e prevenção de bombeanento de areia.

A realização de uma série de projetos pode significar que o hidrogeólogo não precisa desenhar cada poço individualmente, mas realizar uma supervisão para assegurar que os projetos estejam corretamente implementados.

Nos projetos de poços em áreas onde o nível freático situa-se abaixo da zona de intemperismo ou onde o material do intemperismo é muito argiloso, o poço recebe revestimento de boca e do poço continua aberto até a profundidade ótima .

Este tipo de desenho (Fig 7.4) é usado na maioria dos poços no Estado da Paraíba no Brasil.

Pode-se frizar que os criterios para projetor os poços locadas nos aqüíferos do material intemperizado espesso e permeável são similares àqueles para aquíferos normais nas rochas sedimentares.

São selecionados, neste caso, de acordo com critério estabelicedo, o filtro e prefiltro dos poços produtores. A posição e o comprimento do filtro são, por sua vez, escolhidos de acordo com as propriedades físicas (tamanhos) do grão do material perfurado. Pode -se observar na Fig. 7.5 o desenho dos poços sob estas condições frequentamente em uso no Estado de São Paulo.

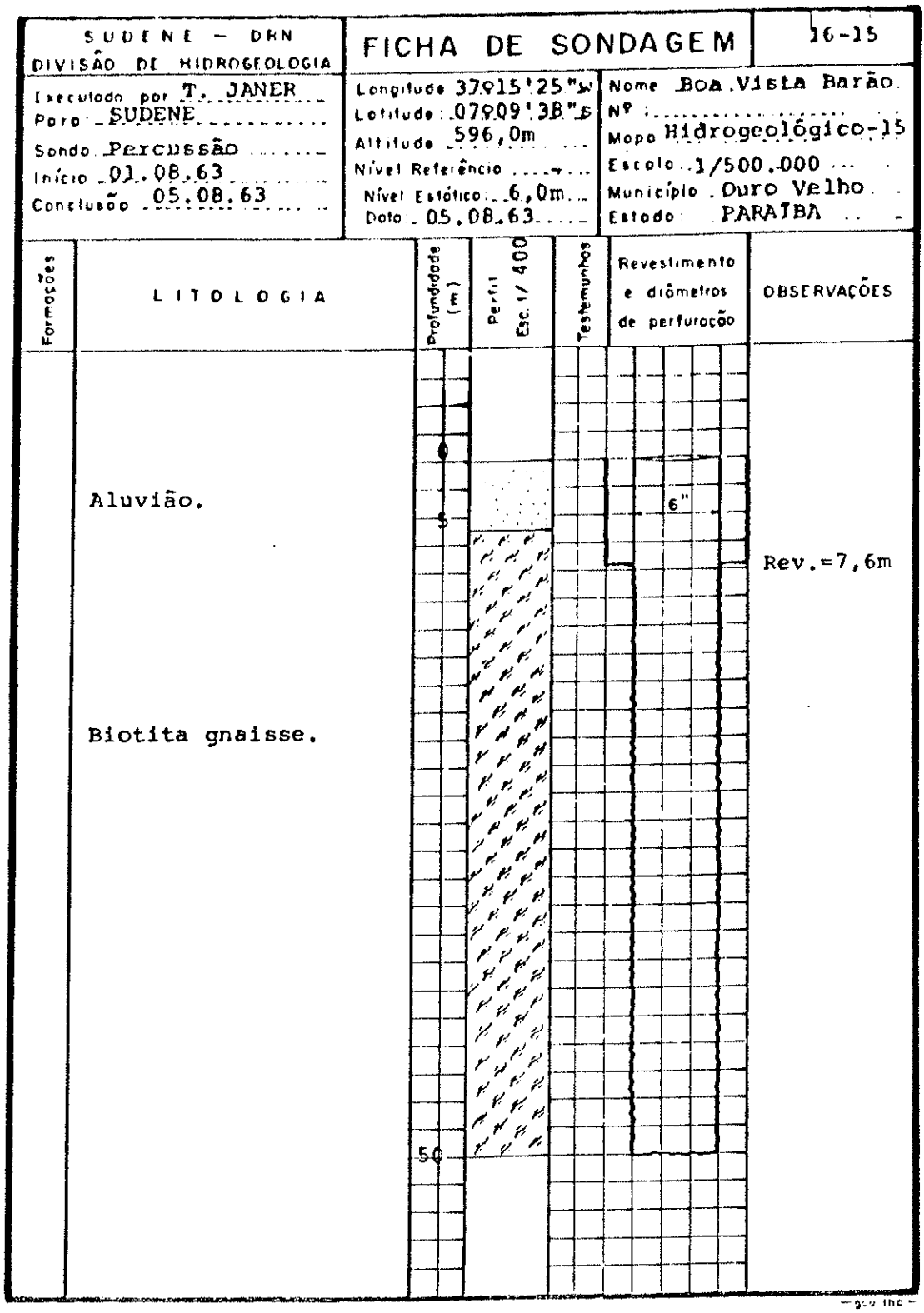


FIGURA 7.4 - ESBOÇO DO DESENHO DO POÇO TIPICO NA PARAÍBA (SEGUNDO ALBUQUERQUE 1971)

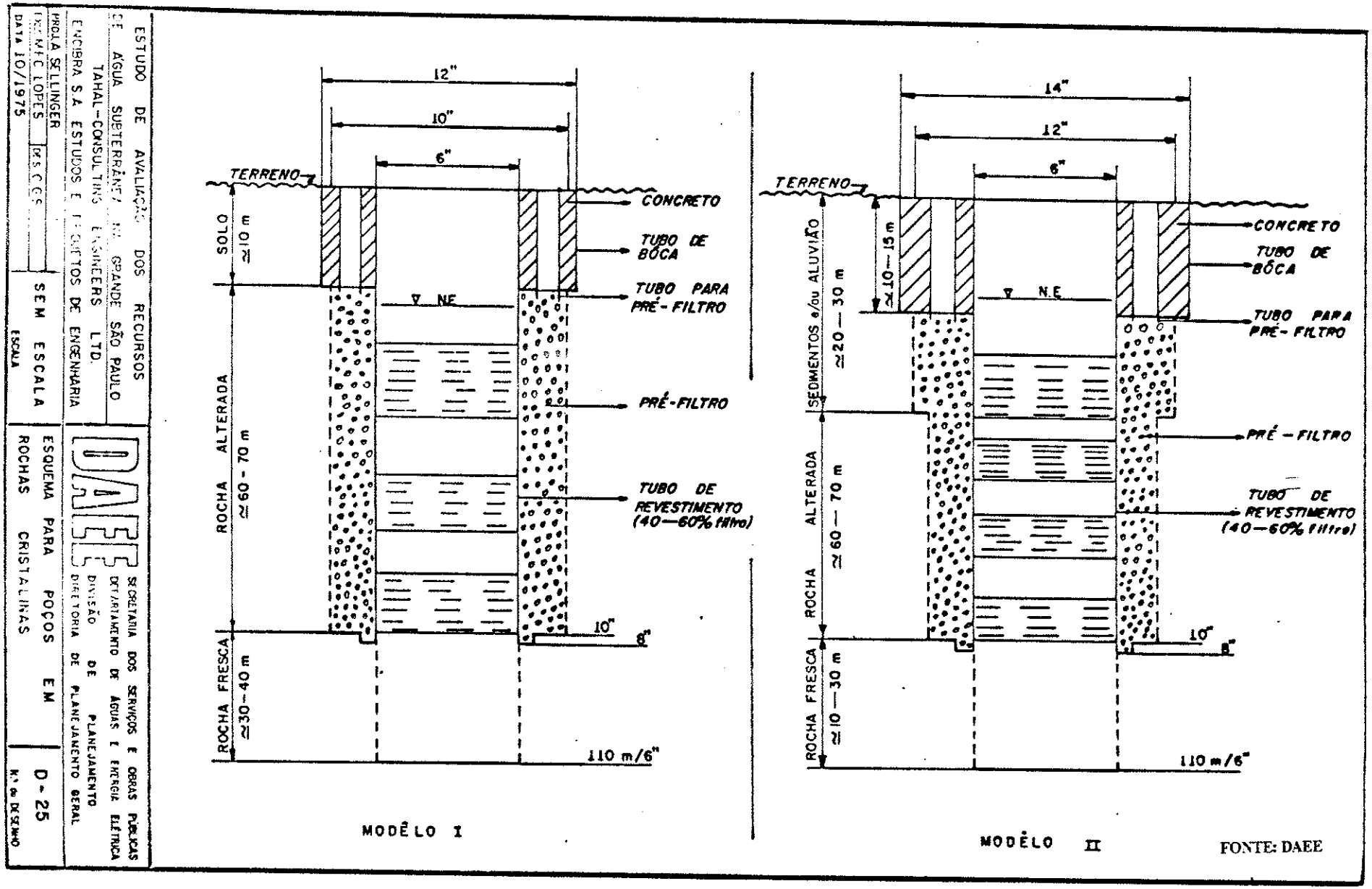


FIGURA 7.5 - ESBOÇO DO DESENHO DO POÇO TIPICO NO ESTADO DE SÃO PAULO

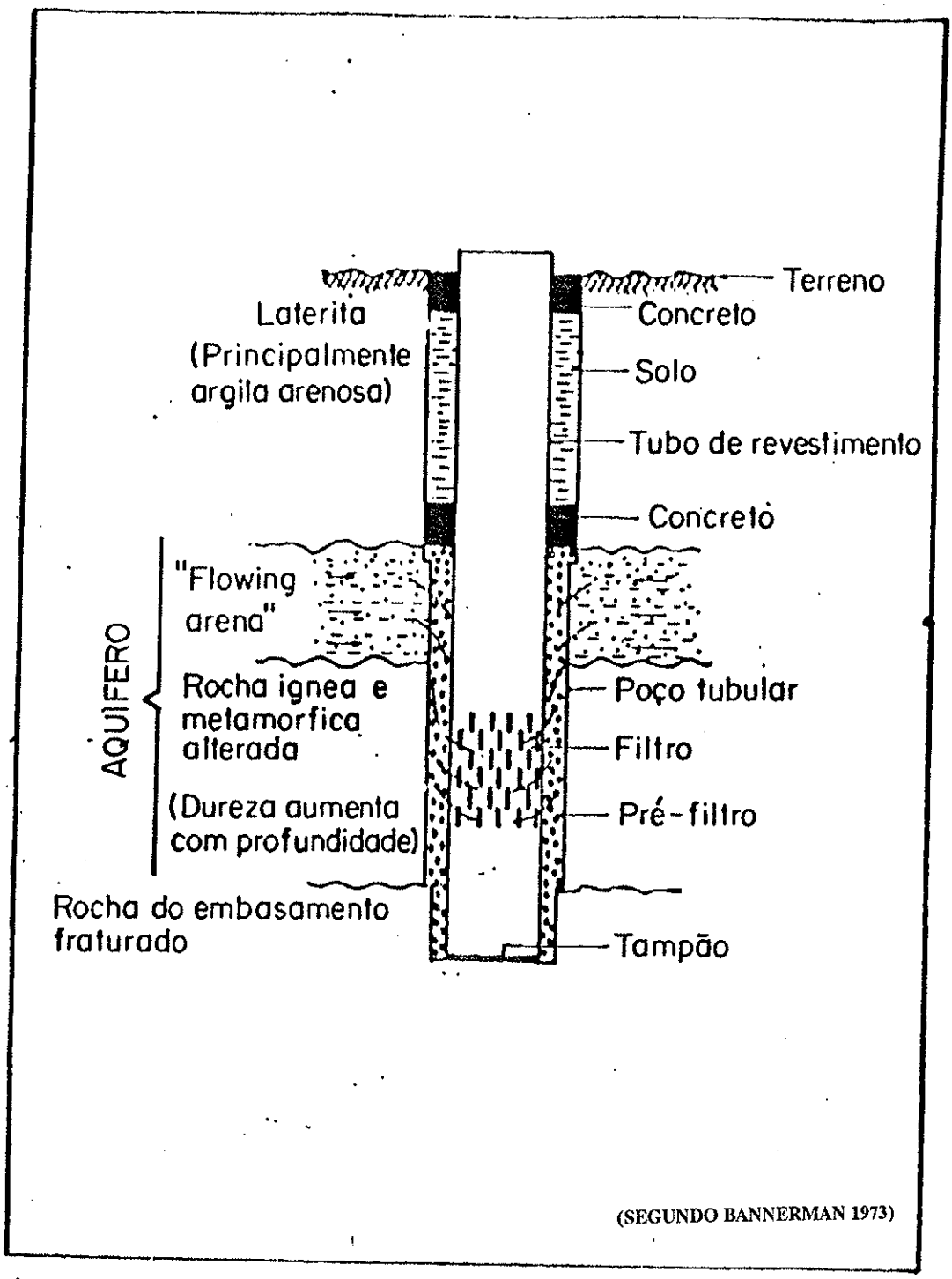


FIGURA 7.6 - ESBOÇO DO POÇO CAPTANDO ÁGUA DA "ZONA CORRENTE" OU "FLOWING ARENA" - GANA

Além disso, numa situação onde a permeabilidade, e portanto, a vazão do poço da zona de intemperismo torna-se baixa, é importante desenhar o poço para captar todos os horizontes.

As vezes se apresenta um problema chamado *"flowing arena" ou "arena corrente"* o qual tem sido observado nos poços em Gana. São de materiais derivados de pegmatitos, gnaissos, granitos, xistos, filitos e xistos de formação Birimiana e naquelas rochas compostas geralmente de grãos finos ou que possuem bandas de grãos-finos nas suas texturas .

Os termos " arena corrente " ou "massa caulinitica" se referem a uma zona totalmente saturada no manto do intemperismo de algumas rochas ígneas ou metamórficas da África do Oeste tropical que tem a tendência a desmoronar durante a perfuração LE LONG (1964).

Verifica-se que durante a perfuração na zona de arena corrente produz vazão que varia de 1,0 a 5,0 m^3/h. Assim sendo, para se captar essa vazão, uma secção de filtro não deve ser colocada diretamente dentro desta zona mas preferencialmente uns poucos metros abaixo dela e logo preenchar o espaço anular do poço com o prefiltro a partir do seu fundo até aproximamente três metros acima da zona colapsante e dai concreta-se até a boca BANNERMAN (1973). A secção de um poço produzindo arena corrente em Gana pode ser vista na Fig 7.6

7.2.4. Profundidade Ótima dos Poços

Os sistemas de fissuras podem ser restritos em relação com profundidade devido ao fechamento gradual das fissuras pela pressão das rochas e falta de intemperismo DAVIS e TURK (1964); LEWIS e BURGHY (1964); LANDERS e TURK (1973). Isto significa que se precisa definir o limite de perfuração, isto é, uma profundidade util a partir do qual a perfuração não seria econômica. FAILLACE (1973), sugere uma profundidade ótima entre 30 a 90 m para Karamoja, Distrito de Uganda. De acordo com CLARK (1985) a profundidade ótima dos poços para a Nigéria é de 50 m. BOUGER et al (1981) também relacionam a profundidade ótima com o tipo de rocha e a espessura da zona de intemperismo de 978 poços tubulares na Costa do Marfim e concluem que em gnaisses-granitos a profundidade ótima oscila entre 40 e 70 m, enquanto em xistos varia de 40 a 65 m. DAVIS e TURK (op. cit.) concluem que poços para uso doméstico na região leste dos EUA não poderiam exceder a faixa de 46 a 61 m e poços mais profundos não devem ultrapassar 183 m.

Em relação com as áreas estudadas, pode-se salientar que na Paraíba a profundidade ótima de poços é limitada a 50 m pela CDRM COSTA (986). CAVALCANTE (1988) declara que no Estado de São Paulo não existe nenhum patamar de limitação de perfuração de poços. As profundidades as quais os poços tem sido perfurados dependem do poder econômico do cliente e da capacidade do equipamento de perfuração. Da análise da pouplação intergral de 840 dados, as profundidades dos poços encontradas no Estado variaram entre 100 e 150 metros.

Em Gana a profundidade máxima contractual da perfurção de poços tem sido fixada em 80 m pela GWSC, a qual pode ser considerada como a profundidade ótima dos poços neste país.

Neste sentido é opinião do autor que buscando limitar a profundidade de perfuração, implica que não somente os aqüíferos das zonas mais profundas não podem ser atingidos, mas também aqueles aqüíferos rasos abaixo e perto do limite de perfuração não podem ser totalmente explorados.

Por exemplo, no Hospital da Santa Família, Berekum em Gana, dois poços foram perfurados na mesma formação e estrutura geológica. Um deles foi perfurado até a profundidade máxima de 80 m. A vazão foi de 2,4 m^3/h. O segundo poço , por razões excepcionais foi perfurado demasiadamente além atingindo a profundidade de 93 m o obtendo a vazão de 7,2 m^3/h, GWSC (1985).

CAVALCANTE (1990) assinala que na região de Atibaia 60-70% da vazão obtidas dos poços profundos (100-150 m) provem do manto de intemperismno, cujo espessura é da ordem de 40-50 m.

Neste sentido, GREY et al (1985), assinalam que se perfuram poços até profundidade de 60 m, quando uma boa vazão pode ser obtida se a perfuração do poço passasse a 20 m e fosse adequedamente revestido com filtros e prefiltros.

Destaca-se que, em vista destas observações uma supervisão pelo hidrogeologo experiente torna-se necessário para determinar a que profundidade um poço deve ser concluído, baseado na demanda de água prevista.

7.3. USO E PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

7.3.1. Introdução:

Em várias partes do mundo, a água subterrânea tem sido usada para abastecimento por muitos anos. Poços muito antigos alguns pré-história podem ser vistos na região mediterrânea, no Oriete Médio estando muitos deles em uso.

A Revolução Industrial liderou o desenvolvimento da maquinária de perfuração mecânica e/os bombas elétricas, e resultou numa grande expansão na extração de água subterrânea para suprimento doméstico, e industrial e irrigação.

A extensão da aplicação de novas tecnologias para o uso de água subterrânea para a irrigação, aconteceu pela primeira vez nos EUA e em varios paises da Asia.

O desenvolvimento da irrigação e rápida expansão da extração de água subterrânea para uso doméstico e industrial engendrou o estabelecimento da secção hidrogeológica do Serviço Geológico Americano , (United States Geological Surveys, USGS) o que até agora tem liderado o desenvolvimento das disciplinas da água subterrânea por anos.

Depois da Segunda Guerra Mundial, o rápido desenvolvimento industrial e urbano foi acompanhado por uma grande expansão no uso de água subterrânea em várias partes do mundo. No mundo desenvolvido focalizou-se a atenção na necessidade de conservação e administração do recurso. No terceiro mundo, a água subterrânea foi vista como uma panacéia para resolver todos os problemas de insuficiéncia de água, especialmente em cidades do norte da África, India e no longínquo leste.

A demanda de água subterrânea tem sido enorme e contínua crescente, devida rápida expansão das cidades que urgentemente necessitam de abastecimento de água. Nas áreas rurais e de irrigação dos países do terceiro mundo verifica-se um uso acelerado.

Em algumas regiões do Brasil e África o desenvolvimento de água subterrânea em larga escala é limitado pela baixa permeabilidade e capacidade de armazenamento das rochas cristalinas do embasamento .

O pensamento popular da atualidade tende a favorecer o desenvolvimento de água subterranea a partir do aproveitamento pontual do recurso melhor protegido em termos de qualidade .

Estes obras de abastecimento sem redes de destribuição se tornam relativamente economicas em Gana, particularmente quando a assistência da comunidade é obtida.

Estudos e técnicas de desenvolvimento de água subterrânea no Brasil têm focalizado na região semi- árida do Nordeste e nos centros mais desenvolvidos do pais onde a qualidade da água da superfície está prejudicada, ou a demanda de água excede o suprimento como em São Paulo, Salvador, Recife, Fortaleza e Natal (REBOUÇAS 1988).

Apesar do sucesso da recente expansão do desenvolvimento da água subterrânea, nas áreas estudadas existem bastante falhas , e problelmas ocorrendo que merecem uma revisão dos critérios adotados e métodos usados.

A extração de águas subterrâneas nas áreas estudadas pode ter sérios efeitos negativos no estado dos (qualidade e quantidade) recursos.

Estes aspéctos adversos necessitam de medidas que visem proteger os recursos. Nesta secção discute-se a utilização de águas subterrâneas nas áreas em estudo e as medidas de proteção que são necessárias para proteger os seus recursos de águas subterrâneas.

7.3.2. Paraíba

A região nordestina do Brasil que inclui a Paraíba acha-se fortemente subordinada as vicissitudes climáticas, com nítidos reveses no seu processo de desenvolvimento, tendo como obstáculo principal, a escassez de recursos hídricos que supram suas necessidades básicas durante os periodos de seca.

Esse precário quadro natural tem exercido forte influência no processo migratório de sua população, desigualmente distribuida e com tendência crescente à urbanização. O problema de escassez de recursos hídricos no Nordeste já tem sido abordado por vários autores entre eles EBERT (1961), SIQUEIRA (1963), SOUTO MAIOR (1969), REBOUÇAS (1973),

ALBUQUERQUE (1971, 1984,1986) LEAL (1984). REBOUÇAS e MARINHO (1972).

A SUDENE, desde a sua criação envida esforços no sentido de corrigir essa deficiência estimulando o aproveitamento de águas subterrâneas nas províncias cristalina e sedimentar.

O resumo do Projeto Nordeste - SUDENE (1984) diagnosticou todas as causas, efeitos e consequências do calamitoso quadro social da região, sem cair no lugar comum, responsabilizando isoladamente, as secas pelas aguras da região.

No específico, estabelece objetivos em relação à renda e emprego, a terra e em relação à água : assegurar à população rural o acesso aos recursos hídricos de forma a atender as suas necessidades básicas, tanto para seu proprio consumo como para a produção agropecuária.

O programa de construção de poços tabulares iniciou-se na área de atuação da SUDENE, com a criação do Grupo de Trabalho de Águas Subterrâneas (GTAS). Posteriormente, com a criação de sua subsidiária, Companhia de Sondagens e Perfurações (CONESP) e através de convênios com diversos órgãos federais e estaduais, pôde a SUDENE impulsionar o referido programa, atingindo um total de 612 poços públicos na Paraíba no período de 1965/83 .

O número de poços de caráter público e particular, construidos na Paraíba , supera 5.000 unidades, segundo estimativas do banco de dados da SUDENE.

O Programa de Aproveitamento de Recursos Hídricos do Nordeste Semi-Arido (PROHIDRO), além de absorver as atividades dos setores de execução da Divisão de Recursos Minerais (SUDENE/DRN/RM), nos segmentos de perfuração, instalação, recuperação e manutenção de poços públicos, ampliou as alternativas de aproveitamento de água subterrânea, no domínio das províncias sedimentar e cristalina, através de poços tabulares profundos, poços tabulares rasos, poços amazonos e barragens submersas.

Observa-se que o poço tabular, em terreno cristalino na Paraíba é caracterizado pela baixa vazão e pelo alto conteúdo de salinidade, geralmente imprópria para o consumo humano. Trata-se, porém, de uma excelente fonte de

abastecimento para os rebanhos, de um modo geral, e particularmente, nos períodos de forte estiagem, quando escasseiam as águas superficiais .

7.3.3. São Paulo

Há a necessidade do estabelecimento de uma política estadual para o aproveitamento integral dos recursos hídricos como fator indutor do desenvolvimento econômico e social. Além da escassez de recursos hídricos superficiais, face a demanda e ao comprometimento da qualidade dos mesmos, em razão do lançamento de efluentes urbanos e indústriais sem um tratamento conveniente, há uma gradual implantação de poços profundos. Estes tornam o recurso hídrico subterrâneo um integrante fundamental para grande parte dos estudos de planejamento regional, com vistas a avaliação da disponibilidade de recursos hídricos e as alternativas para atendimento das demandas para abastecimento urbano, industrial e agricola no Estado de São Paulo.

Desta forma, o Departamento de Aguas e Energía Eletrica do Estado de São Paulo (DAEE), no desempenho das suas atribuições de orgão coordenador e orientador do aproveitamento dos recursos hídricos do Estado, estabelece as diretrirzes e prioridades para um aproveitamento racional destes recursos.

Os sistemas aquíferos no Estado de São Paulo são classificados em grupos distintos, de acordo com a natureza litológica e as propriedades hidraulicas:

- Aquíferos sedimentares, permeável por porosidade granular.
- Aquíferos cristalinos ou zonas aquíferas, permeável por fissuramento das rochas condicionadas por estruturas geológicas. O sistema aquífero cristalino (que nos interessa neste estudo) abrange as rochas graníticas e metamórficas e ocorrem sobre cerca de 90.000 Km^2 na metade Leste do Estado.

Segundo TONGA (1973), cerca de 40% das cidades com rede de abastecimento central (171 de 458) dependem principalmente de poços como sua única ou mais importante fonte de abastecimento. A região da Grande São Paulo contitue-se no maior centro de demanda englobando 2/3 da demanda total.

O abastecimento de água potável na cidade de São Paulo, o maior consumidor de água no Estado é feito através de recursos hídricos superficiais,

complementada pela exploração de água subterrânea por poços tubulares à nível particular.

Conforme PACHECO (1984) o uso atual de água subterrânea sua área estendada da Grande São Paulo revela que a complementação pode ser assim esquematizada:

- Exploração para uso paralelo com água da rede pública (35%).
- Exploração para uso com mistura da água da rede pública (45%).
- Exploração para uso alternado com a água da rede pública (10%).
- Uso exclusivo de água do poço (10%).

O consumo de água subterrânea no municipio de Sâo Paulo pelas diferentes atividades está indicada na Tabela 7.1

Uso	Vazão (m^3/h)	N^O de Poços	%
Domiciliar	856.094	18	11
Público	550.800	15	9
Comercial	904.052	29	18
Industrial	5.830.106	100	62
Total	8.141.052	162	100

Tabela 7.1 : Volume de água subterrânea consumidos área Metropolitana de Grande São Paulo. (Pacheco 1984).

A tabela mostra o consumo anual de 8 milhões de m^3 de água dos quais 38% é para uso domiciliar, público e comercial e 62% para uso industrial.

Além disso acha-se no interior do Estado o uso e consumo de água subterrânea para fins agrícolas.

As águas subterrâneas do Estado de São Paulo apresentam de modo geral, baixa salinidade e características físicas, químicas, bacteriológicas adequadas para o abastecimento público, assim como para os demais usos.

Dominam águas bicarbonatadas calcicas na maioría dos aquíferos cristalinos. As águas bicarbonatadas sódicas ocorrem secundáriamente. A ocorrência das cloretadas se restringe à faixa litorânea do aquífero cristalino LOPES (1984).

7.3.4. Gana

O desenvolvimento formal e utilização dos recursos de água subterrânea para o uso doméstico foi iniciada em Gana pelo então Governo Imperial Britânico em 1920.

As técnicas aplicadas na extração das águas subterrâneas, variam desde os poços escavados equipados ou não com bombas manuais, aparelho de Henderson (Henderson Box) para o desenvolvimento e proteção de nascentes , até poços tubulars.

Programas de perfuração de poços são geralmente a responsabilidade do Departamento de Pesquisa Geológica ou de secção de geologia dentro do ministerio do Trabalho ou da Agricultura.

Em 1944, foi estabelecido o Departamento Rural de Abastecimento de Água para Comunidades Rurais , que ficou encarregado da provisão de água atavés de poços para as áreas rurais, até que Ghana Water and Sewerage Corporation (GWSC) foi criada em 1965, para assumir esta responsabilidade.

No inicio, a contribuição e as informações geológicas em relação com as águas subterrâneas eram muitas vezes restritos à rotina da seleção de locais dos poços, papel , comumente executado por geólogos. Lamentavelmente, alguns aspectos do aproveitamento de água subterranea foram ignorados, sendo que os geólogos nesta epoca tinham pouco ou nenhum treinamento formal em hidrogeologia.

Assim é que, perfuração, completação e ensaio dos poços tem sido geralmente efetuadas somente por perfuradores, sem nenhuma supervisão hidrogeológica.

O ímpeto dado ao setor rural de abastecimento de água em Gana pelo aumento da assistência financeira oferecida por paises desenvolvidos, nos anos 70, tem reforçado o desejo de aumentar e melhorar os suprimentos de água, o que continua sendo a prioridade na lista de necessidades, particularmente nas áreas rurais.

Dois importantes projetos de aproveitamento de água subterrânea vem sendo desenvolvidos:

1) O projeto de abastecimento de água para região superior (The Upper Region Water Supply Project,URWSP) financiado pelo governo do Canadá, gerando 2.500 poços de extração manual e mecanizada e que foram perfurados no período de 1974 - 1981.

2) O "Programa de Perfuração de 3.000 poços " foi realizado entre 1981 a 1983 com a assistência financeira da República Federal da Alemanha, principalmente para fornecer água de uso domestico .

No presente, baseada unicamente na grande importancia desempenhada pela água subterranea, os poços de escavados manuais (sem bombas) servem comunidades com população até 500 habitantes por poço, enquanto poços tubulares com bombas manuais oferecem serviços a população entre 501 e 2.000 habitantes.

Além do uso doméstico, a utilização de água subterrânea em Ghana é para rebanho , criação de peixes, e irrigação de pequena escala, em áreas selecionadas do complexo embasamento do país. Apesar de não haver estatisticas para mostrar o volume de água subterrânea usada fora do uso doméstico, pode-se rassaltar que o uso de água subterranea para outros fims é muito baixo.

Com respeito a qualidade da água, alguns aquíferos nas séries de Togo e do Birimiano são conhecidos por possuirem uma concentração de ferro maior que 10 mg/l. Existem também casos isolados de altos níveis de fluoríto (mais de 2 mg/l) QUIST, (1987).

7.4. PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO COMPLEXO EMBASAMENTO

A extração de água subterrânea e atividades humanas como produção agrícola, construção urbana, produção industrial, as obras de barragem ou mineração afetam a quantidade e qualidade de recursos de água subterrânea.

A qualidade da água subterrânea corre o perigo decorrentes das atividades como :

- uso inapropriado de fertilizantes e pesticidas na agricultura;

- infiltração de águas residuais, fossas sépticas, depósitos de lixo urbano;
- infiltração de fluidos industriais e materiais tóxicos solúveis.

Geralmente, a ameaça aos recursos de água subterrânea, devido a poluição e contaminação, parecem crescer rapidamente.

Portanto, a necessidade de medidas de proteção das águas subterrâneas necessita ser enfatizada, (PACHECO 1984).

As medidas incluem a implementação de uma adequada legislação (pelas autoridades das áreas estudadas) para garantir a administração do crescimento. Aplicação de técnicas para a proteção dos poços contra poluição, impondo zonas de proteção de mananciais, controlando a qualidade.

Nas áreas estudadas, porém, não existem registros ou dados sobre a poluição dos aquíferos.

7.5. PLANEJAMENTO E ADMINISTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A demanda crescente de água subterrânea nas áreas de rochas cristalinas nos Estados da Paraíba e São Paulo no Brasil e Ghana vem acarretar um número de problemas dentre eles os seguintes :

- a escasez do estoque de água subterrânea na Paraíba e a eminemente diminuição na reservas de águas subterranea em São Paulo e Gana, devido necessidade crescente de exploração dos recursos de águas subterrâneas .
- o interesse crescente na utilização de água subterranea nas áreas estudadas já comeca os seus conflitos.

Num sentido todos estes problemas afetam o meio ambiente, e por isto é necessário procurar soluções e métodos para proteger os recursos de água subterrânea assim como o meio ambiente nas áreas estudadas..

Ressalta-se que um instrumento apropriado para resolver estes problemas é por via do planejamento dos recursos hidricos em escala regional, buscando-se:

- preservar a existência e qualidade do recurso;

- satisfazer a demanda a longo prazo, a ao mesmo tempo;
- manter ou reduzir os compctos no meio ambiente.

Por isso, a SUDENE, DAEE e GWSC e outras instituições têm necessitam planejar o aproveitamento, a gestão e proteção dos recursos hídricos nas áreas de estudo

Em Gana, a maioria da população rural, que forma 70% (senso 1984) do total da população, ainda precisa ser
abastecida com água potável de qualidade adequada. A seleção de áreas a serem servidas com poços tubulares equipados com bombas manuais estão relacinada a necessidade e aos benefícios políticos e sociais.

No planejamento do projeto de abastecimento de água para a poulação rural em Gana utiliza-se os seguintes informações e decisão ASOMANING (1986):

a) Consumo per capita e máxima distância aceitável do ponto de coleta.
b) Numero total de pessoas a serem servidas e sua distribuição, (com extrapolação de 5 a 10 anos mais),base para o cálculo do números de poços necessarios considerando-se pelo menos um poço (ponto de coleta) para cada 300 pessoas .
c) Tipos de poços, (poço raso ou poço tubulare) de acordo com as condições hídrogeológicas.
d) Bomba de desenho ótimo para fácil manutenção e durabilidade.
e) Planejamento para financiamento e manutenção operacional do projeto .
f) Recomendar o nível de envolvimento e contribuição da comunidade.

É necessario aumentar o conhecimento sobre recursos de água subterrânea no embasamento geológico como pré requisito e base para gestão e utilização racional de água subterrânea .

Neste sentido os estudos extensivos, para conhecimento de água subterrânea, já estão em andamento nos Estados da São Paulo e Paraíba onde existem problemas de uso e escassez ,respectivamente, de água no Brasil (REBOUÇAS 1988).

Geralmente a precisão a ser realizada nestes estudos, depende da eficácia de técnicas e financiamentos para a aquisição de novos e modernos equipamento de produção.

Vale salientar que para atingir resultados razoaveis, o período de planejamento deve abranger ao prazo usualmente de 20 a 25 anos.

Se existem dados para contribuir ao conhecimento dos recursos de água subterrânea, a pesquisa pode ser menos extensa. De outro lado, se os dados são incompletos, que é o caso de atualidade, nas áreas sob estudos, é necessário atualizar e melhorar tais dados, de tempos em tempos.

8: CONCLUSÕES

As áreas deste estudo comparativo, situam em zonas climáticas diferentes, (úmido, semi-úmido e semi-árido) e sobre terrenos do embasamento geológico précambriano, sendo 97% no Estado da Paraíba, 23% no Estado de São Paulo e 54% em Gana.

Foram definidas zonas aqüíferos distintas, entre si, manto de intemperismo e meio fraturado. Na Paraíba o aqüífero ocorre principalmente no meio fraturado com cobrturas de aluviões ou rochas alteradas cujas espessuras variam entre 0 e 12,5 metros. No Estado de Sao Paulo e em Gana a água subterránea ocorre na zona de intemperismo cujo espessura é de 42,2 m com coeficiente de variação 53% em São Paulo enquanto em Gana é de 23, 71 m com coeficiente de variação de 45%. Abaixo desenvolve-se uma zona fraturada aqüífera até prfundidades de uma centena de metros.

Foi constatada uma "Condição Limite" para a formação de zona saturada no manto de intemperismo nas áreas estudadas. Os valores de coeficientes da regressão e os valores de "condição limite" mostram que a espessura da zona saturada e a profundidade de intemperismo é mais acentuada em São Paulo do que em Gana, e quase ausente na Paraíba.

Constata-se que a capacidade específica ótima ocorre ou é atingida quando a espessura do manto de intemperismo é de 40 metros em São Paulo e entre 12 e 20 metros em Gana.

Os níveis estáticos em Gana situam-se na zona de intemperismo, enquanto nos Estados de São Paulo e Paraíba, 96% e 83% dos níveis estáticos ocorrem na zona intemperizada respectivamente

Verificou-se que, em São Paulo e Gana o aumento de espessura do manto de intemperismo induz maior vazão. Esta relação não foi encontrada no caso da Paraíba.

No que concerne o aqüífero no meio fraturado, deve-se ressaltar que existe a conexão hidraulica entre os meios intemperizado e fraturado , isto é, há transferência das águas do manto de intemperismo para o meio fraturado.

Revelou-se que a maior quantidade de entrada d'água nos poços dentro do meio fraturado em São Paulo situa-se entre 50 e 100 metros de profundidade. Na Paraíba a maior frequência de entrada d'água nos poços ocorre entre 20 e 40 metros sendo as fraturas transversais tracionais e longitudinais tracionais os melhores tipos de fraturas para produção.

Foi constatada a variação dos valores de produção e características dos poços associados às posições topográficas. Mostrou-se que nas áreas estudadas, a ordem crescente da situação topográfica corresponde a uma ordem decrescente da vazão média, da relação vazão/profundidade do poço e da espessura saturada do manto do intemperismo. A profundidade do nível estático segue um padrão oposto a este padrão geral.

As análises hidroquímicas efetuadas mostraram que as águas subterraneas em São Paulo e Gana são menos mineralizadas do que as águas subterrâneas na Paraíba. As águas em São Paulo e Gana possuem constituintes iônicos principais dentro dos limites de potabilidade para consumo humano. Ao contrário, a qualidade hidroquímica das águas na Paraíba, em geral, não possibilita o uso humano; é compatível com o consumo animal.

Observou-se que existem tecnológias e organizações para exploração e utilização dos recursos das águas subterrâneas no embasamento geológico nas áreas estudadas, porém, há necessidade de aplicação de medidas legais e técnicas para a preservação do potencial hidrico subterráneo e a sua proteção contra a poluição antrópica.

Acredita-se que os procedimentos metodológicos aplicados neste estudo atingiram os objetivos propostos, no tocante a possibilitar de compreensão e comparação dos principais condicionantes intervenientes na circulação, armazenamento e explotação das águas subterrâneas no embasamento précambriano das três áreas estudadas.

Os valores e as conclusões obtidas são de caracter regional e não podem obviamente ser extrapolados mecanicamente para outras localidades. Todavia, os procedimentos metológicos aplicados neste estudo poderão ser utilizados em outras áreas sob condições semelhantes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS :

ACWORTH, R.I. (1987) The development of the crystalline aquifers in tropical environment. *Quarterly Journal of Engineering Geology,* 20: 265-272.

ALBUQUERQUE, J.do P.T. (1971) Inventário hidrogeologico basico do nordeste. Folha No.15 - Jaguaribe SE. *SUDENE Hidrogeologia,* (32): 1-187

ALBUQUERQUE J.do P.T. (1984) *Os recursos de água subterranea do tropico semi-árido de Estado da Paraiba.* Campina Grande, 205p (Dessertação de Mestrado , Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba).

ALBUQUERQUE J. do P.T. (1986) Vocação socio-economico dos sistemas aqüíferos do semi-árido Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRANEAS ,4, Brasilia (1984) *Anais* p 544-548 .

ALLEN, P.M. (1969) The geology of part of an orogenic belt in Western Sierra Leone, West Africa. *Geologische Rundschau* 58: 588-620.

ALMEIDA, F.F.M. (1967) Origem e evolução da plataforma brasileira. *Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia,* (24):36.

ALMEIDA, F.F.M. (1968) Precambrian geology of Northeastern Brazil and West Africa and the theory of continental drift *Natural Resources Research* (4) : 151- 162 .

ALMEIDA F.M.M. and BLACK, R. (1968) Geological comparison of Northeastern South America and West Africa. *Annale Academia Brasileira de Ciência* 40 :317-319.

ANDERSON, E.M. (1951) *The dynamics of faulting.* Second Edition,Edingburgh, Olver and Boyd

ASIHENE, K.A.B. and BARNING, K. *A contribution to the stratigraphy of the Birimian System of Ghana, West Africa.* Geological Survey of Ghana, Report No.75/5

ASOMANING, G. (1986) The development of groundwater for Rural Water Supply in Ashanti Region of Ghana (A case-study) In: INTERNATIONAL ADVANCED COURSE ON WATER RESOURCES MANAGEMENT, 3, Perugia, 1986, Italian University for Foreigners. Water Resources and Documentation Center Perugia. 27p.

BAR, H.P. and RIEGEL, W. (1990) Gondwana correlation: Continuation of Africa into South America? In: COLLOQUIM OF AFRICAN GEOLOGY, CIFEG, 15, Nancy 1990 Abstract Université de Nancy p165.

BARBOSA, O. (1955) Gúia das Excursões In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 9, Araxaá , *Anais*, 1955 SBG São Paulo .

BARBOSA, O. et al. (1970) Geologia economia de parte da região do Médio São Francisco. Nordeste do Brasil. Rio De Janeiro, *Departamento Nacional de Produção Mineral-PFPM* 140 97p.

BARDOSSY, Gy. (1981) Palaeoenviromemts of laterites and lateritic bauxites - effects of global tectonism on bauxite formation. in "latertization processes". In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERATIZATIUON PROCESSES, 1, Trivadium, India, 1981. *Proceedings* IBH New Delhi p 287-294.

BANNERMAN, R.R. (1973) Problems associated with development of groundwater in igneous and metamorphic rocks- a case. study in Ghana *Groundwater*, 11: 31-34.

BATES, D.A. (1954) *Stratigraphy. Eastern Province and Trans-Volta.* Report of the Director of the Geological Survey of Ghana for the year 1952-53.

BERNADI, A. et MOUTON, J. (1981) Les recherche d'eau dans le socle africain. Apport de la geophysique. *Bulletin du Recherche Geologique et Mineral* , II (4) :293 -309.

BERTACHINI, A.C. (1987) *Estudos das características dos terrenos cristalinos sob clima úmido na Região de Jundíai, em São Paulo.* São Paulo, 115p. (Dessertação de Mestrado- Instituto de Geociências USP)

BISTRICHI, A.C. e 6 outros. (1981) *Mapa Geologica do Estado de São Paulo Escala 1:500 000 Vol.I* Nota Explicativa. IPT São Paulo

BLAY, P.K. (1977) Preliminary notes on major fold trends of Southern Ghana. In: *Geology of Ghana Vol. 1.* Ghana Geological Survey .

BLAY, P.K. (1978) Geology of 1/4 Field Sheets 184, 185 and 187. *Ghana Geological Survey Bulletin* (45)

BOATENG, E.A.(1960) *A geography of Ghana.* Cambridge University Press. London 205p.

BOURGE, L.,CAMERLO, J., FAHY, J.C. et VAILLEIUX, Y. (1981) Methodologie de la recherche hydrogeologique en zone de socle cristallain. *Bulletin Recherche Geologique e Mineral,* III (4): 273-288.

BROWN, L.R. (1984) Securing Food Supplies. In: LESTER R.BROWN et al (eds) *State of the World.* W.W. Norton New York.

BURKE, K. and WILSON, T.J. (1976) Hot Spots of the Earth's Surface. *Science American* (235) :46 -57.

CAVALCANTE, I.N. (1988) *Hidrogeologia das rochas precambrianas da bacia do rio Atibaia. Folha Atibaia (SP)* São Paulo. (Exame de qualificação Instituto de Geociências USP).

CAVALCANTE, I.N. (1990) *Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo - Área Piloto de Atibaia (SP)* São Paulo 123p (Dessertaçao de Mestrado, Instituto de Geociências / USP)

CAVALCANTE, J.C. e 10 outros. (1979) *Projeto Sapucai, Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.* Relatório final de geolgia, Brasília., DNPN/CPRM Superintendencia Regional de São Paulo 299p (DNPM Série Geologia, 5, Seção Geologia Basica 2)

CLARK, L. (1985) Groundwater abstraction from Basement Complex areas of Africa. *Quarterly Journal of Engineering Geology.* 18: 25-34.

CORDANI, U.G. (1973) *Evolução geologica precambriana da faixa costeira do Brasil, entre Salvador e Vitoria.* São Paulo. 98p (Tese ao concurso de Livre Dociencia, Instituto de Geociências/ USP)

COSTA, W.D. (1965) Análise dos fatores que influenciam na hidrgeologia do cristalino *Revista Água Subterrânea* 1 : 14-47 Recife.

COSTA, W.D. (1986) *Análise dos fatores que atuam no aqüífero fissural - Área Piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte*. São Paulo 207p. (Tese de Doutoramento Instituto de Geociências/USP).

DABOWSKI, C.W. (1972) The geology of 1/4 Sheets 81 and 122 Wiawso SW and Kukuom SE respectively. Unpublished Report of Ghana Geological Survey.

DAEE (Departamento de Água e Energia Eletrica) (1972) *Estudos de Águas Subterraneas. Avaliação Preliminar*. São Paulo.

DAEE (Departamento de Água e Energia Eletrica) (1981) *Estudo de águas Subterrâneas, Região Administrativa 5 Campinas*. São Paulo 637p.

DANTAS, J.R.A. et al (1982) *Mapa Geologica do Estado da Paraíba. Texto Explicativo*. Campina Grande, CDRM/PB . 133p

DAVINO, A. (1982) Geologia e hidrologia da região de Mineiros de Tiete (SP). Emprego de sondagens eletricas CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRANEAS, 2, Salvador, 1982. *Anais*. p273-286.

DAVIS, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley New York, NY.

DAVIS, S.N. and TURK, L.J. (1964) Optimum depth of wells in crystalline rocks *Groundwater* 2, 6-12.

DEARMAN, W.R., BAYNES, F.J. and IRFAN, T.V. (1978). Engineering geology of weathering granites. *Engineering Geology* 12: 345 - 374.

DEHAL, J., LEDENT, D. et TORQATO, J.R. (1976) Nouvelles donneés geochronologiques relatives au complex gabbro-noritique et charnoquitique du buoclier du Kasi et a son prolongement en Angola. *Annales de la Societé Geologque de Belgique*, 99: 211-226.

DETAY, M. et POTEY, P. (1990) Introduction aux méthodes modernes de maîtrise de l'eau. *Hidrogeologie*, (1) :3-25.

DNAEE (Departamento Nacional de Agua e Energia Eletrica) (1981) *Disponibilidade Hídrica de Brasil*, Brasilia . 350p.

EBERT. H. (1961) *O embasamento cristalino do Nordeste como eventual base de abastecimento com Águas Subterraneas. Estudo baseada no levantamento hidrogeologico de uma parte do Cariri Paraibano.* Relatório Interno SUDENE, Recife.

EBERT, H. (1970) Precambian geology of the "Borborema Belt" (States of Paraíba and Rio Grande do Norte, Northern Brazil) and the origin of its mineral its mineral provinces. *Geologische Rundschau*, 53. (3) :1292-1326).

ECA (Economic Commission for Africa) (1974) *Problems of Water Resources in Africa.* Regional Report. United Nations Water Conferences, Africa; Regional Meeting - Adis Ababa.

ELLERT, N. e MENDES, J.M.S. (1982) Aplicação de geofisica na prospecção de Água Subterranea em meios fissurados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRANEA, 2, 1982. *Anais* Salvador, p227-232

FAILACE, C. (1973) Location of groundwater and the determination of optimum depth of wells in metamorphic rocks of Uganda. In: CONVENCIONE INTERNACIONALE SULLE AQUE SOTTERRANEE, 2, Palermo, 1973

FAILLAT, J.B. et BLAVOUX, B. (1989) Caractères hidrochimiques des nappes roches endogènes fissurées en zone tropicale humide: l'exemple de la Côte d'Ivoire. *African Journal of Earth Science*, 9 (1) : 31-40.

FANIRAN, A. and JEJE, L.K. (1983) *Humid Tropical Geomorphology.* Longmans, London. 414 p.

FERREIRA, J.A.M. e ALBUQUERQUE, J.P.do T. (1969) Sinopse da geologia da Folha Seridó. *SUDENE- Divisão da Geologia (série Geologia Regional)*, (18).

GEHART, J.M. and LAZORCHICK, G.J. (1988) Evaluation of groundwater resources of Lower Surquehanna River basin, Pennsyvalnia and Maryland. *USGS Water Supply Paper 2284.*

GRANT, N.K. (1970) Geochronology of Precambrian basement rocks from Ibadan. Southwestern Nigeria. *Earth Planetary Science Letters* (10): 28-38.

GRANT, N.K. (1973) Orogeny and reactivation to the West African Craton. In: A.E.M. NAIRN and F.G. STEHLI (eds) *The Ocean Basin and Margins, I. The South Atlântic*. Plenum Press, New York. 447-492.

GREY, D.R.C., CHILTON, O.J. SMITH-CARINGTON, WRIGHT, E.P. (1985) The Expanding role of the hydrogeologist in the provision of village water supplies: an African perspective. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 18:13-24.

GWS&C (Ghana Water and Sewerage Corporation) (1985) *3000 Well Drilling Programme in Southern and Central Ghana Volume VI Hydrogeological Evaluation*. Final Report. Accra. 172p.

HANCOCK, P.L. (1985) Brittle Microtectonics: Principles and prcatices. *Journal of Structural Geology* 7: (3/4) 437-457.

HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., e COIMBRA, A.M. (1975) The Ribeira fold belt. *Revista Brasileira de Geociências* 5: 257-266.

HASUI, Y. and SADOWSKI, G.R. (1976) Evolução geológica do precambriano na região sudeste de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências* 6 (3) : 180-200

HASUI Y., FENSECA, M.J.G., RAMALHO, R. e COUTINHO, M.G.N. (1981) Região VI. In: SCHOBBENHAUS FILHO.(COORD.) *Texto explicativo da Carta da Geológia do Brasil, 1:250* 000. Brasilia, DNPM.

HESEL, S.R. (1987) Advantages of nonparametric preocedures for analysis of water quality data. *Hydrological Sciences Journal* 32 (26):179 -190

HEM, J.D. (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters. U.S. Geological Survey Water Supply Paper No. 2254 263p.

HURLEY, P.M. (1968) The Configuration of continental drift. *Science American* (218):52-64.

HURLEY, P.M. ALMEIDA, F.F.M., MELCHER, G.C., CORDANI. U.G. and RANO, J.R., KAWASHITIA, K., VANDROS, P., PINSON, W.H. and FAIRBAIN, H.W. (1967) Test of continental drift by comparasion of radiometric ages *Science* 157 (3788) : 495 -500.

JAROSSZEWSKI, W. (1984) *Fault and fold tectonics* Chichester, Ellis Howard

JONES ,M.J. (1985) The weathering zone of aquifers of the basement complex areas of Africa. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 18: 35-46.

JUNNER N.R. (1935) Gold in the Gold Coast. *Gold Coast Geological Survey Memoir* (2).

JUNNER, N.R. HIRST, T. and SERVICE, H. (1942) The Tarkwa Goldfield, *Gold Coast Geological Survey, Memoir* (6)

KENNEDY, W.Q. (1964) The structural differentiation of Africa in the Pan-African (500 my) tectonic episode. *Research Institute of African Geology, Leeds University, Annual Report Sci.* 8 :48-49.

KESSE, G.O. (1985) *The mineral and rock resources of Ghana.* A.A.Balkema, Rotterdam. 610 p.

KING, L.C. (1962) *The geomorphology of the earth.* Oliver and Boyd, Edinburgh and London 699 p .

KING, L.C. (1965) A geomorfologia do Brasil oriental. *Revista Brasileira de Geografia* 18 : 147-265.

KISTON, A.E. (1928) Provincial geological map of the Gold Coast and Western Togoland, with brief descriptive notes thereon. *Gold Coast Geological Survey Bulletin* (2).

KOLHBECK, F. and SCHEIDEGGER, A.E. (1977) On the theory of the evaluation of joint orientation measurements. *Rock Mechanics* 9 :9-25.

KOERT, W. (1910) Begleit worte zur geologischer Karte von Togo. In: HANS MEYER *Das Deutch Kolonialreich, Vol.2.* Leipzig and Viena.

LARSSON I. (1984) *Groundwater in hardrocks.* Studies and Report in Hydrology No. 33 UNESCO 228p.

LANDERS, R.A. and TURK, L.J. (1973) Occurrences and quality of groundwater in crystalline rocks of Llano area Texas. Groundwater 11 :5-10.

LEAL, J.M. (1984) diversas alternativas para aproveitamento de água subterrânea no Nordeste Brasileiro In: CONGRESSO BRASLEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza 1984 *Anais* Vol. 2, p303-312.

LE LONG , F. (1964) *Recent data on arena aquifers. Following a hydrogeological reconnaissance in North Central Dahomey (Benin) (Parkou and Nikki Regions).* Inter African Committee on Hydraulic Studies

LEWIS, D.C. and BURGHY, R.H. (1964) Hydraulic characteristics of fractured and jointed rocks. *Groundwater* (2):4-10.

LOPES, M.F.C. (1984) Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo - Sintese das condições de ocorrências In: CONGRESSO BRASLEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984, *Anais* 1 p305-317.

MANI, R, (1978) The geology of the Dahomeyan of Ghana. In: *Geology of Ghana Project.* Ghana Geological Survey , Accra.

MARQUES, A.A.F. (1986) Contribuição da Eletroresistividade na locação de poços tubulares em terrenos cristalinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasilia, 1986, *Anais* 2, p353-363.

McFARLANE, M.J. (1987a) A Review of development of tropical weathering profiles with particular referrence to leaching history and with examples from Malawi and Zimbawe. In: WORKSHOP ON GROUNDWATER EXPLORATION AND DEVELOPMENT IN CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFERS. Zimbawe, 1987, *Proceedings*, Commonwealth Science Council, London. Technical Paper No.273. Vol. 2 p 95-141.

McFARLANE, M.J. (1987b) Erosion surfaces of Ancient Cratons - their Recognition and Relevance in Hydrogeology. In: WORKSHOP ON GROUNDWATER EXPLORATION AND DEVELOPMENT IN CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFERS. Zimbawe, 1987,*Proceedings* Commonwealth Science Council, London.Technical Paper No.273, Vol. 1 p 199-253.

MEDEIROS LIMA, E. et al (1980) *Projeto Scheelta do Seridó*. Relatório Final. Recife. DNPM/CPRM 5v.

MENEGASSE, L.N. (1991) *Estudo hidrogeológicos dos rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo - Critério para locação de poço profundo.* São Paulo 104p. (Dessertação de Mestrado, Instituto de Geociências / USP).

MOODY,J.D. and HILL, M.J. (1956) Wrench-fault tectonics. *Geological Society of America Bulletin* 67:1207-1240.

MOON, P.A. and MASON, D. (1971) The Geology of Field Sheets Nos 129 and 131 Bompata SW and NW *Ghana Geological Survey Bulletin (31)*

NEVES, B.B.B. (1975) *Regionalização geotectónica do Precambriano nordestino.* São Paulo. 198p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências/USP)

NORTHFLEET, A.A. and 18 others (1972) Análise comparativo da paleogeologia dos litorais atlânticos brasileiros e africanos. Petrobras. SETUB (Salvador). 20p.

O'LEARY, D.L., FREIDMAN, J.D.and POHN, H.A. (1976) Lineament, linear lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin* 87:1463-1469.

OLLIER, C.D. (1975) *Weathering.* 2nd Edition. Longman, London.

OMORINBOLA, E.O. (1982) Verification of some geohydrological implications of deep weathering in the Basement complex of Nigeria. *Journal of Hydrology* 56 (3/4) :347-368.

PACHECO, A. (1984) *Análise das características tecnicas e legislação para uso e proteção das Aguas Subterrâneas em Meio Urbano. Municipio de São Paulo.* São Paulo 174p. (Tese de Doutoramento Instituto de Geociências/USP)

PEDRO, G.D. (1968) Distribution des princpaux types d'alteration chemique a la surface du globe. *Revue de Geographie Physique et Geolgie Dynamique* 10:457-470

PESSOA, D.A.R. (1976) *Estudo geochronológico das Rochas policíclicas do complexo de São Vincente nos anticiclinorios de Caicó e Florania, R.N.* São Paulo 53p. (Dessertação de Mestrado Instituto Do Geiciências/USP)

PEDROSA,T.L. (1982) *Mapa geológica de Paraíba Texto Explicativo* CDRM/PB Campina Grande. 133p.

POLYNOV, B.B. (1937)I *The cycle of weathering* (Translated by Muir) Murty, London

POSTEL, S.(1984) Water: Rethinking Management in an age of scarcity, *Worldwatch* (62)

PRICE, N.J.(1959)Mecanics of jointing in rocks. *Geological Magazine* 96 (2).

PRICE, N.J. (1966) Faults and joints developoment in brittle and semi-brittle rock. Pergamon prerss Oxford- London.

PROJETO RADAMBRASIL (1982) Levantamento de Recursos Naturais. Vol.23. Folha SB 24/25 Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro.728p.

PROJETO NORDESTE. (1984) Programa Regional de apoio ao Pequeno Produtor Rural, Recife. Vol.1. SUDENE.

QUIST, L.G. (1987) Groundwater utilzation in the Precambrian Crystalline Basement rocks of Ghana In: WORKSHOP ON EXPLORATION AND DEVELOPMENT IN CRYATALLINE BASEMENT AQUIFERS. Zimbawe,1987. *Proceedings*. Commonwealth Science Council, Technical Paper 273 Vol. 2 p407-419.

REBOUÇAS, A.C. (1973) *Le Problem de L'eau dans le Zone Semi-aride du Bresil. Evaluation des Ressources, Orietation pour la mise en Valeur.* (These-Docteur, Université Louis Pasteur) Strassbourg 291p.

REBOUÇAS, A.C. (1979) Groundwater in Brazil. In: WORLD CONGRESS ON WATER RESOURCES, 3, Mexico Vol.7 p3384-3399

REBOUÇAS, A.C. (1988) Groundwater in Brazil. *Episode* 11 (3): 208-214.

REBOUÇAS, A.C. e MARINHO, M.E. (1972) *Hidrologia das secas do Nordeste do Brasil.* SUDENE,Recife 126p.

REBOUÇAS A.C. and CAVALCANTE, I.N. (1987) Hydrogeology of crystalline Basement Rocks in Brazil. In: WORKSHOP ON GHROUNDWATER EXPLORATIUON AND DEVELOPMENT IN CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFERS. Zimbawe, 1987, *Proceedings*. Commonwealth Science Council, Technical Paper 273 Vol.1 p 103 -126.

ROGERS, R.J. (1990) Geochemical comparison of Groundwater in areas of New England, New York and Pennsylvania. *Groundwater*, 27 (5):690-712.

RHUSHTON, K.R. (1986) Vertical flow in heavily exploited hard rock and alluvial aquifers. *Groundwater*, 24 (5) :601-608.

RUXTON, B.P. and BERRY , L. (1957) Weathering of granite and associated features in Hong Kong. *Bulletin of Geological society of America* 68: 1263-1292.

SANTOS, E.J. dos.(1971) *Sintese da geologia do precambriano da folha Arcoverde - nordeste do Brasil. Recife*- Divisão da Geologia (Inedito).

SENGER, R.A. (1978) *Selected Studies of Birimian rocks in Western Ghana.* Ghana Geological Survey, Report (75/8) p 66-90

SILVA, A.T.S.F. da. (1981) Tentativa de interpretaçÃo da gênese e evolução da infraestrutura arqueana exposta entre Peruiba e Curitíba, SP e PR. In: SIMPOSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitíba, *Atas*, São Paulo. SBG Vol.1 p133-147.

SILVA, A.T.S.F. da. e ALGARTE, J.P. (1981a) Contribuição a geologia da sequência Turvo-Cajati entre o Rio Pardo e Pariquera-Açu. Estado de São Paulo. I-Litologia e Petrologia. In: SIMPOSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitíba, 1981. *Atas*, São Paulo,SBG Vol.1 p109-120.

SILVA, A.T.S.F. da. e ALGARTE, J.P. (1981b) Contribuição a geologia de sequência Turvo-Cajatí entre o Rio Pardo e Parquera- Açu. Estado de São Paulo. II- Estrutura, metamorfismo e evolução tectónica. In: SIMPOSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitíba, 1981. *Atas*, São Paulo, SBG Vol 1 p121-132.

SILVA , W.F. (1984) Investigações geofisicas para exploração de Águas Subterrâneas na região de Icapara-Iguape. SÃo Paulo.CONGRESSO BRASLEIRO DE ÁGUA SUBTERRÁNEAS, 3, Fortaleza, 1984. *Anais*, 2, p 259-268.

SEQUEIRA, L. (1963) Aspectos Hidrogeologicos do Cariri Paraíbano. *SUDENE, Boletim de Recursos Naturais* 1 (1)

SOUTO MAIOR, J. (1969) *Groundwater in the Northwestern Brazil.* SUDENE, Divisão de Documentação, HG-21, Recife

SOUSA, M.F. (1986) Água Subterrânea no Semi-Árido Nordestino e o seu Engajamento no Desenvolvimento Regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ,4, Brasila 1986. *Anais* p146-158.

STOOPS, G. (1968). Micromorphology of some characterist soils of the Lower Congo (Kinshasa). *Pedologie,* 18: 110-149.

SZIKSZAY, M. and TEISSEDRE, J.M. (1982) Aplicação dos programas CORELE, ACP e PIPOUST no estudo das águas subterrâneas. In: CONGRESSO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, Salvador, 1982. *Anais* p 287-298.

THOMAS, M.F. (1974) *Tropical Geomorphology: a Study of Weathering and landform Development in warm climates.* London, Macmillan

THOMAS, M.F. (1966) Some geomorphological implications of deep weathering patterns in cystalline rocks in Nigeria. *Transaction of Institute of British Geographers,* 40:173-193.

TONGA, R.J.B.D. (1973) Estudos das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas* 1 (3) p 19-52.

TORQUATO, J.R. and CORDANI, U.G. (1981) Brazil-Africa Geological Links. *Earth Sciences Reviews*, (17):155-176.

TRASHLIEV, S.S.(1972) *Geology of 1/4 Field Sheets Nos.82 and 46 Wiawso SE and Asankragwa NE respectively.* Unpublished Report of Ghana Geological Survey.

UNESCO (1984) *Groundwater in Hard Rocks.* Project 8.6 of The International Hydrological Programme. Studies and Report in Hydrology No.33, 228.

UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs) (1973) *Groundwater In Africa*. UN, New York.

VAN DER LEEDEN, F. (1984) *Water Resources of the World*. Water Information Center, Inc. New York.

WALKER, (1962) Weathering and climate of Ghana. In: J. BRAIN WILLS (ed) *Agricultural and land use in Ghana.* Oxford University Press London p 6-50

WERNICK, E. (1978a) Contribuição a estratigrafia do Precambriano do leste do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. *Revista Brasleira de Geociência* 8 (3): 206-216.

WERNICK, E. (1978b) Contribuição a geologia do maciço de Guaxape, SP e MG. *Annale Academia Brasleira de Ciência* 50:338-352.

WEST, G. and DUMBLETON, J.J. (1970) The mineralogy of tropical weathering illustrated by some West Malaysian soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 3 (1):25-40.

WEGENER, A. (1912) Die Entstchung des Kontinente. *Geologische Rundschau.* 3: 276-292.

WIDSTRAND, C. (1980) *Water Conflicts and Research Priorities*. Oxford, Pergamon Press.

WOODFIELD, P.D. (1966) Geology of Field Sheet No. 91 Fumso NW *Ghana Geological Survey Bulletin* (30).

WRIGHT, E.P. (1987) Groundwater development and usage. Basement aquifers in Africa. : WORKSHOP ON EXPLORATUION AND DEVELOPMENT IN CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFERS, Zimbawe 1987. Proceedings. Commonwealth Science Technical Paper 273 Vol.2 p 349 - 393.