

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

AVALIAÇÃO GEOHIDROLÓGICA DO LOCAL PARA A
ESTOCAGEM DOS REJEITOS RADIOATIVOS
DO IPEN – CNEN/SP

Sérgio Marcelino

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
"Mestre na Área de Concentração em
Tecnologia Nuclear Básica".

Orientador: Dr. Umesh Chandra

SÃO PAULO
1983

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

AVALIAÇÃO GEOHIDROLÓGICA DO LOCAL PARA A
ESTOCAGEM DOS REJEITOS RADIOATIVOS
DO IPEN – CNEN/SP

Sérgio Marcelino

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
"Mestre na Área de Concentração em
Tecnologia Nuclear Básica".

Orientador: Dr. Umesh Chandra

SÃO PAULO
1983

À minha família.

A todos aqueles que lutam
por um ideal.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Umesh Chandra, pelo trabalho conjunto e orientação.

Aos colegas do Departamento de Aplicações na Engenharia e Indústria, em especial à Srta. Maria Cecília Pereira, ao Sr. Celso Baroni Guardalini, e ao Sr. Antônio Carlos Castagnet pela colaboração na execução do trabalho.

Ao meu amigo Eddy Segura Pino pelos conselhos e incentivos.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e ao Programa Nuclear Brasileiro (PRONUCLEAR) por permitirem a execução deste trabalho.

Às amigas da Biblioteca pela elaboração e auxílio nas referências bibliográficas.

À Srta. Maria Cristina Moreira Amorim e Família pelo apoio e colaboração.

A todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	2

CAPÍTULO

I - FONTES DE REJEITOS DA INDÚSTRIA NUCLEAR

1 - O Ciclo do Combustível	7
1.1 - Extração e Mineração do Urânio e Tório	7
1.2 - Beneficiamento (Concentração e Purificação)	8
1.3 - Processamento do Concentrado (Conversão para UF ₆ e Enriquecimento Isotópico)	9
1.4 - Fabricação dos Elementos Combustíveis	9
1.5 - Operação nos Reatores de Potência	9
1.6 - Processamento de Combustíveis	12
2 - Outros Produtores de Rejeitos	15
2.1 - Centros de Pesquisa	15
2.2 - Produção de Radioisótopos	16
2.3 - Hospitais	18
2.4 - Indústrias	19
2.5 - Aplicações em Transportes	19

CAPÍTULO

II - DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE BAIXA A MÉDIA ATIVIDADE

1 - Tipos de Disposição	24
2 - Disposição em Diversos Países	38
2.1 - E.U.A.	38
2.1.1 - Práticas e Experiências de Disposição de Rejeitos nos EUA	40
2.1.1.1 - Práticas nos Laboratórios	40
2.1.1.2 - Práticas nos Estabelecimentos Comerciais	42

	Página
2.1.2 - Características Geohidrológicas dos Sítios de Disposição e Rejeitos dos EUA	45
2.1.2.1 - Os Sítios dos Laboratórios	45
2.1.2.2 - Os Sítios dos Estabelecimentos Comerciais	47
2.1.3 - Problemas Gerados nos Sítios de Disposição de Rejeitos dos EUA	48
2.1.3.1 - Problemas nos Laboratórios	50
2.1.3.2 - Problemas nos Sítios Comerciais	53
2.1.3.3 - Conclusões	55
2.2 - Inglaterra	57
2.3 - Canadá	58
2.4 - Alemanha	60
2.5 - Outros Países	61

CAPÍTULO III

III - SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIO-ATIVOS

1 - Critérios de Seleção de Sítios para a Disposição de Rejeitos	62
1.1 - Considerações Gerais	70
1.2 - Estudo da Seleção de Sítios	70
1.2.1 - Exame da Área	72
1.2.2 - Seleção Preliminar	71
1.2.3 - Confirmação do Sítio	71
1.3 - Fatores para o Seleccionamento do Sítio	72
1.3.1 - Fatores Hidrogeológicos	72
1.3.2 - Fatores Ecológicos	74
1.3.3 - Uso da Terra	74
1.3.4 - Fatores Sócio-Econômicos	74
2 - Avaliação de Sítios para a Disposição de Rejeitos Radioativos	75
2.1 - Considerações Gerais	75
2.2 - Critérios de Avaliação	78

	Página
2.2.1 - Caminho da Contaminação	78
2.2.2 - Mecanismos de Risco	81
2.2.2.1 - Reações Químicas do Rejeito com o Solo	84
2.2.2.2 - Comportamento Físico dos Rejeitos com o Solo	87
2.3 - Avaliação Geohidrológica	89
2.3.1 - Pré-Requisitos Básicos	91
2.3.2 - Critérios Específicos	92
2.3.3 - Deveres	93
2.3.4 - Interrelacionamento	94
2.3.5 - Condições Favoráveis	96
2.3.6 - Condições Desfavoráveis ou de Risco	97
2.4 - Conclusões	100

CAPÍTULO IV

IV - OS REJEITOS DO IPEN

1 - A Filosofia de Disposição de Rejeitos no IPEN ...	104
---	-----

CAPÍTULO V

V - O SÍTIO DO IPEN

1 - O Local	111
2 - O Tipo de Estocagem	111
3 - Situação	113
4 - Clima	113
5 - Topografia	113
6 - Demografia Local	117
7 - Geologia Regional	117
3 - Geologia Local	117
9 - Hidrografia e Hidrologia Regional	120

CAPÍTULO VI

VI - TRABALHO EXPERIMENTAL

1 - Introdução	124
----------------------	-----

2 - Construção dos Poços de Monitoração	125
3 - Determinação da Velocidade de Fluxo e Direção da Água Subterrânea	131
3.1 - Velocidade de Fluxo da Água Subterrânea	134
3.1.1 - Teoria	134
3.1.1.1 - Velocidade de Filtração	134
3.1.1.1.1 - Definição	134
3.1.1.1.2 - Métodos para a Determinação da Velocidade de Fil- tração	134
3.1.1.2 - Fundamentos do Método de Diluição	135
3.1.1.3 - Problemas e Objetivos	136
3.1.1.4 - Construção do Poço para o Cálculo de Alfa	141
3.1.1.5 - Permeabilidade do Filtro (K_1)	142
3.1.1.6 - Permeabilidade do Pré-Filtro (K_2) e do Aquífero (K_3)	142
3.1.1.7 - Efeitos das Dimensões da Sonda	145
3.1.1.8 - Limites, Erros e Condições de Validade	146
3.1.1.9 - Vantagens do Método	147
3.1.2 - Determinação Prática da Velocidade de Fluxo	148
3.1.2.1 - Aparelhos Utilizados	148
3.1.2.2 - Trabalho de Campo	149
3.1.2.3 - Processamento dos Dados	150
3.1.2.4 - Medições de Campo	155
3.2 - Direção do Fluxo da Água Subterrânea	161
3.2.1 - Teoria	161
3.2.1.1 - Introdução	161
3.2.1.2 - Técnica	162
3.2.2 - Determinação Prática da Direção de Fluxo	162
3.2.2.1 - Aparelhos Utilizados	162
3.2.2.2 - Trabalho de Campo	164
3.2.2.3 - Processamento dos Dados	165
3.2.2.4 - Medições de Campo	166
4 - Determinação do Nível D'Água	166

	Página
5 - Temperatura, Condutividade e pH da Água	166
6 - Perfilagem Gama-Natural	169
7 - Determinação do Nível de Atividade Pré-Operacio nal do Sítio	169
7.1 - Preparação das Amostras	169
7.2 - Descrição e Análise	172

CAPÍTULO VII

VII - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO GEOHIDROLÓGICA DO SÍTIO DO IPEN

1 - Discussão dos Resultados	173
1.1 - Construção dos Poços	173
1.2 - Perfil Geológico do Poço 1B	173
1.3 - Perfil Geológico do Poço 2C	174
1.4 - Perfil Tridimensional da Região dos Poços 1B e 2C ..	174
1.5 - Análise Gama-Natural dos Poços 1B e 2C	175
1.6 - Perfil Geológico da Vizinhança dos Poços AC e DC ..	177
1.7 - Direção de Fluxo do Poço 2C	177
1.8 - Velocidade de Fluxo da Água Subterrânea	178
1.9 - Dados Hidroquímicos	178
1.10 - Variação do Nível D'Água	179
1.11 - Nível Pré-Operacional de Radioatividade no Sítio ' ...	179
2 - Avaliação Geohidrológica do Local	179
2.1 - Hidrologia Superficial	181
2.2 - Geologia Superficial	182
2.3 - Hidrologia Subterrânea	183
2.4 - Migração	184
2.5 - Conclusões	187

CAPÍTULO VIII

VIII - RESULTADOS E CONCLUSÕES

	Página
1 - Resultados	192
2 - Conclusões	193

CAPÍTULO IX

IX - RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 - Recomendações	195
2 - Sugestões para Trabalhos Futuros	196

<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	197
---	-----

FIGURAS

ÍNDICE

	Página
1 - Estimativa dos Rejeitos Estocados nos EUA até o ano 2000 ⁽⁹⁰⁾	23
2 - Desenho Esquemático de um "CRIB" ⁽⁴⁹⁾	25
3 - Tipos Convencionais de Disposição de Líquidos ^{(49) (59)}	26
4 - Tipos Recentes de Disposição de Líquidos ^{(48) (49)}	27
5 - Trincheira Aberta ⁽¹⁶⁾	29
6 - Colocação dos Tambores na Trincheira ⁽¹⁶⁾	30
7 - Capeamento de Asfalto sobre uma Trincheira de Terra ⁽¹⁶⁾	31
8 - Trincheira de Concreto ⁽⁵¹⁾	32
9 - Monolito de Concreto em Construção ⁽⁵¹⁾	34
10 - Poços Selados ⁽⁸¹⁾	35
11 - Disposição em Minas de Sal ⁽⁴⁹⁾	36
12 - Disposição no Mar ⁽¹⁷⁾	37
13 - Localização dos Sítios Radioativos Comerciais (●) e dos Sítios dos Laboratórios (▲) dos EUA ⁽²⁾	39
14 - Disposição de Rejeitos em Hanford ⁽⁵⁹⁾	51
15 - Área de Disposição em Chalk River ⁽²¹⁾	59
16 - Comparação dos Critérios de Seleção de Diferentes Agências, 1960-1981 ⁽⁷³⁾	64
17 - Correlação Entre os Critérios Mínimos e os Aspectos Chave ⁽⁹⁷⁾	79
18 - (a,b) Sistema de Equilíbrio Solo-Água-Ar ⁽⁸⁶⁾	80
19 - Transporte dos Sítios de Disposição sob o Solo ⁽⁹³⁾	82
20 - Descarga de um "CRIB" em Hanford ⁽⁵⁹⁾	90
21 - Planta do Sítio do IPEN e Localização do Poço 2C ⁽¹¹¹⁾	112
22 - Local de Armazenamento dos Rejeitos Radioativos	114
23 - Mapa Topográfico do IPEN	116
24 - Demografia Local ⁽¹¹¹⁾	118
25 - Perfil Tridimensional da Região dos Poços 1B e 2C ..	119
26 - Hidrografia do IPEN (IEA) ⁽⁹¹⁾	121

	Página
27 - Variação do Nível D'Água dos Poços 1B e 2C	122
28 - Mapa do Perfil Geológico e Análise Gama-Natural do Poço 1B	126
29 - Mapa do Perfil Geológico e Análise Gama-Natural do Poço 2C	127
30 - Detalhes das Perfurações Típicas para Filtros ⁽¹²⁾	130
31 - Volume de Diluição	136
32 - Distorção das Linhas de Fluxo ⁽¹²⁾	137
33 - Sistema para a Medição da Velocidade de Fluxo (Vf) ⁽¹²⁾	140
34 - Detalhes da Construção dos Poços (CPRD)	129
35 - Dados Computacionais para o Cálculo de Alfa ⁽⁴³⁾	143
36 - Dados Computacionais para o Cálculo de Alfa ⁽⁴³⁾	144
37 - Curvas de Diluição do Poço 1B	151
38 - Curvas de Diluição do Poço 2C	152
39 - Curva de Diluição do Poço AC ⁽¹²⁾	153
40 - Curva de Diluição do Poço DC	154
41 - Sonda de Cintilação para a Medida da Direção de Fluxo (Medidas em Milímetros)	163
42 - Mapa da Direção do Fluxo no Poço 2C	167 ⁸
43 - Perfil Geológico Típico dos Poços AC e DC	128
44 - Mapa da Situação dos Poços AC e DC	123

TABELAS

ÍNDICE

	Página
1a - Classificação e Procedência dos Rejeitos Radioativos	5
1b - Classificação dos Rejeitos Radioativos	6
2 - Nuclídeos Típicos Gerados em um Reator Refrigerado a Água ⁽⁹⁹⁾	12
3 - Quantidades Aproximadas dos Rejeitos de Baixa Atividade (incluindo TRU) enterrados nos Sítios de Disposição dos EUA ⁽⁹⁰⁾	22
4 - Operações de Enterro nos Laboratórios ⁽²⁾	41
5 - Resumo dos Rejeitos Enterrados nos Laboratórios ⁽²⁾ ..	43
6 - Operações de Enterro nos Estabelecimentos Comerciais ⁽²⁾	44
7 - Inventário dos Rejeitos dos Sítios Comerciais ⁽²⁾	46
8 - Características Geohidrológicas dos Laboratórios dos EUA ⁽²⁾	47a
9 - Características Geohidrológicas dos Estabelecimentos Comerciais dos EUA ⁽²⁾	49
10 - Traçadores Mais Utilizados na Hidrologia e Concentrações Máximas Permissíveis (MPC _w) ⁽⁵²⁾	133
11 - Fatores Hidrogeológicos para a Avaliação de Locais ⁽⁵⁴⁾ ..	73
12 - Resumo dos Mecanismos de Liberação ⁽⁹³⁾	83
13 - Efluentes Radioativos Líquidos Gerados no IPEN ⁽¹¹⁰⁾	103
14 - Rejeitos Sólidos Gerados no IPEN ⁽¹¹⁰⁾	105
15 - Efluentes Radioativos Líquidos que Serão Gerados pelo IPEN, no Futuro ⁽¹¹⁰⁾	106
16 - Rejeitos Radioativos Sólidos que Serão Gerados pelo IPEN, no Futuro ⁽¹¹⁰⁾	108
17 - Variações do Clima na Estação "Cidade Universitária"	115
18 - Resultados de Análises da Água Poço: 2C	170
19 - Resultados de Análises de Água Poço: AC	171

20a - Dados da Velocidade de Fluxo no Poço 2C	156
20b - Dados da Velocidade de Fluxo no Poço 2C	158
20c - Dados da Velocidade de Fluxo no Poço 2C	160
21a - Dados da Velocidade de Fluxo no Poço 1B	157
21b - Dados da Velocidade de Fluxo no Poço 1B	159
22 - Dados da Direção de Fluxo no Poço 2C	167

Avaliação Geohidrológica do Local para Estocagem dos Rejeitos
Radioativos do IPEN-CNEN/SP.

Sérgio Marcelino

R E S U M O

Neste trabalho são descritos os diversos rejeitos radioativos produzidos nas várias etapas do Ciclo do Combustível, assim como, em outros centros geradores de rejeitos. São revistas práticas de disposição e estocagem de rejeitos de baixo e médio nível de atividade em alguns países.

Fez-se uma comparação entre os critérios gerais de seleção e avaliação de locais para a disposição e estocagem de rejeitos de algumas agências internacionais, e tomou-se a IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) como agenciadora dos critérios de seleção de locais, e a NRC (Comissão Nuclear de Regulamentação), para a regulamentação da avaliação de locais.

Em seguida, foram analisados alguns dos rejeitos produzidos nos diversos departamentos do IPEN, parte dos quais, estão e serão estocados, provisoriamente, no sítio do IPEN. Este local foi devidamente analisado quanto as suas características hidrológicas, geológicas, meteorológicas e geográficas.

As análises geohidrológicas foram baseadas em dados experimentais de velocidade e direção do fluxo da água subterrânea, entre outros, obtidos por intermédio da aplicação de técnicas de traçadores radioativos.

Baseando-se em dados práticos, cujos experimentos estão descritos neste trabalho, fez-se a avaliação do local, com ênfase nas suas características geohidrológicas.

Conclui-se que o local, é, dentro dos critérios discutidos neste trabalho, perfeitamente adequado à estocagem dos rejeitos a que se destina.

Avaliação Geohidrológica do Local para Estocagem dos Rejeitos
Radioativos do IPEN-CNEN/SP.

Sérgio Marcelino

R E S U M O

Neste trabalho são descritos os diversos rejeitos radioativos produzidos nas várias etapas do Ciclo do Combustível, assim como, em outros centros geradores de rejeitos. São revistas práticas de disposição e estocagem de rejeitos de baixo e médio nível de atividade em alguns países.

Fez-se uma comparação entre os critérios gerais de seleção e avaliação de locais para a disposição e estocagem de rejeitos de algumas agências internacionais, e tomou-se a IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) como agenciadora dos critérios de seleção de locais, e a NRC (Comissão Nuclear de Regulamentação), para a regulamentação da avaliação de locais.

Em seguida, foram analisados alguns dos rejeitos produzidos nos diversos departamentos do IPEN, parte dos quais, estão e serão estocados, provisoriamente, no sítio do IPEN. Este local foi devidamente analisado quanto as suas características hidrológicas, geológicas, meteorológicas e geográficas.

As análises geohidrológicas foram baseadas em dados experimentais de velocidade e direção do fluxo da água subterrânea, entre outros, obtidos por intermédio da aplicação de técnicas de traçadores radioativos.

Baseando-se em dados práticos, cujos experimentos estão descritos neste trabalho, fez-se a avaliação do local, com ênfase nas suas características geohidrológicas.

Conclui-se que o local, é, dentro dos critérios discutidos neste trabalho, perfeitamente adequado à estocagem dos rejeitos a que se destina.

Geohydrological Evaluation of a Site for the Storage of the Radioactive Wastes of the IPEN-CNEN/SP

Sérgio Marcelino

A B S T R A C T

In this work, radioactive wastes produced in various steps of nuclear fuel cycle are outlined. Practices of storage/disposal of low and medium level wastes adopted in some countries are reviewed.

A comparison of general criteria for selection and evaluation of sites for waste storage/disposal elaborated by various national and international agencies is made. The criteria of International Atomic Energy Agency (IAEA) for site selection and criteria of Nuclear Regulatory Commission (NRC) of U.S.A. for site evaluation are discussed.

The radioactive wastes produced in various departments of "Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares" (IPEN) are described. Part of these wastes are being stored temporarily in a site selected within the campus of the Institute.

This site has been analyzed in detail with respect to the geographical, meteorological, geological and hydrological characteristics.

The geohydrological evaluation has been carried out by obtaining various field data including data of velocity and direction of ground water flow.

The velocity and direction of ground water flow in and around the waste storage site have been determined by the use of radioactive tracer techniques.

Details of the field experiments are furnished and an overall evaluation of the site with emphasis on geohydrologi

cal aspects is made,

Within the criteria described in this work, it is concluded that the present site is adequate and , satisfactory for temporary storage of the low and medium level wastes.

INTRODUÇÃO

Todas as indústrias produzem, como resultado dos seus processos, matérias sólidas, líquidas ou gasosas indesejáveis, que são liberadas na atmosfera, na terra, nos rios ou mares, constituindo a poluição ambiental. Tais matérias são denominadas de rejeitos ou lixos industriais.

Genericamente, todos os rejeitos industriais afetam o homem, seja no seu lazer, no seu trabalho, seja na sua saúde ou bem estar.

Entre os rejeitos que causam dano à saúde do indivíduo, destacamos os metais pesados, os gases tóxicos e os compostos químicos fortes.

As indústrias poluidoras de maior destaque são: a indústria de fertilizantes, a de pesticidas, as químicas, as petroquímicas, e todas aquelas que usam o carvão como parte de seus processos de produção.

Todos os dias, chegam aos pronto-socorros de hospitais de todo o país, pessoas que apresentam um quadro clínico característico: a contaminação química.

Entre as terríveis sequelas da doença de Myramata, causada pelo Mercúrio; do saturnismo, causado pelo Chumbo; das infecções pulmonares, causadas pela aspiração de gases tóxicos como o monóxido de carbono; e as queimaduras, causadas pelos gases ácidos e bases fortes, encontramos um ponto cada vez mais comum: a morte.

Entretanto, estas estatísticas alarmantes, são relegadas a um plano de menor importância, quando a elas comparamos às da instalação de Usinas Nucleares e de sítios de tra-

tamento e disposição de rejeitos nucleares.

Embora estas indústrias não tenham registrado casos fatais estatisticamente importantes, a sua instalação cria um sentimento de repúdio e medo, mesmo em crianças. A indústria nuclear dá a impressão de ter perdido o seu conceito de indústria de produção de bens, para transformar-se em instrumento de catástrofe universal. A enorme divulgação dos efeitos das armas nucleares parece ter criado as raízes de um medo latente, dentro das pessoas, manifestando-se sempre que aparecem palavras como "nuclear", "radioatividade", e "atômica".

Pertence a nós, portanto, a tarefa de esclarecer aos indivíduos do público sobre o domínio que o homem exerce sobre a radioatividade, e sobre esta nova e poderosa energia, a nuclear.

Ao contrário da maioria das indústrias citadas anteriormente, a nuclear segue um esquema rígido de controle de seus poluentes, submetendo-se aos limites, normas e exigências da CNEN.

Consequentemente, o risco de qualquer acidente destas indústrias, é muitas vezes inferior ao das convencionais, sendo uma preocupação constante dos técnicos e engenheiros mantê-lo tão baixo quanto razoavelmente alcançável.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar o local escolhido para estocar os rejeitos radioativos do IPEN, baseando-se nos critérios gerais adotados para este fim, com ênfase especial nos parâmetros geohidrológicos,

Com base nos dados geohidrológicos, isto é, velocidade e direção do fluxo da água subterrânea, obtidos "in situ", estimou-se o tempo e concentração com que radionuclídeos estocados alcançariam o ponto mais próximo em que uma contaminação a-

cidental da água subterrânea pudesse ser consumida pelo homem.

A avaliação consiste na comparação destas estimativas com os níveis máximos permissíveis de concentração na água, assegurando-se que os diversos mecanismos de contenção aqui analisados, permitam que não haja risco ao homem ou ambiente, dentro das filosofias de proteção radiológica.

C A P I T U L O I

I - FONTES DE REJEITOS DA INDÚSTRIA NUCLEAR

Considera-se rejeito radioativo qualquer lixo sólido, líquido ou gasoso proveniente da produção ou do uso de substâncias radioativas.

Existem diversas classificações de rejeitos quanto a sua periculosidade em relação ao homem. Em geral consideramos o conceito de radiotoxicidade, que inclui a energia e o tipo de partícula emitida, a meia-vida e atividade do radioisótopo para avaliar a dose radioativa no homem. Usa-se, também a quimiotoxicidade, que dá uma idéia da toxicidade química do elemento radioativo, como potencialidade de gerar reações ou toxinas letais, a absorção pelo organismo, a capacidade de concentração em órgãos críticos, etc.

Do ponto de vista da disposição ou estocagem dos rejeitos, serão adotadas as categorias normalizadas pelo órgão fiscalizador de cada indústria nuclear, no caso, a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). (Tabela 1a;1b)

Não obstante, porém, do ponto de vista das fontes de geração de rejeitos darei ênfase aos índices de baixa, média e alta atividade (definição conforme Tabela 1b) e as suas formas físicas: sólidos, líquidos ou gasosos, por considerá-las mais didáticas dentro do escopo do trabalho.

Pode-se dividir as fontes produtoras de rejeitos em dois grupos: (a) aquelas que partem do minério até a produção de energia termonuclear (Ciclo do Combustível), e (b) aquelas que fazem outros usos da radioatividade que não os de fissão ou

TABELA 1a. - Classificação e Procedência dos Rejeitos Radioativos

Categoria	Procedência dos Rejeitos
I	- Elementos combustíveis irradiados acondicionados em recipientes cerâmicos ou metálicos; - Partes estruturais de elementos combustíveis irradiados; - Rejeitos líquidos de alta atividade gerados no reprocessamento; - Rejeitos solidificados em matriz monolítica.
II	- Partes estruturais do elemento combustível (reprocessamento) contaminados com produtos de fissão - actinídeos.
III	- Lamas contaminadas durante o reprocessamento; - Resinas; - Solventes; - Equipamentos.
IV	- Resinas; - Concentrados; - Líquidos solidificados; - Filtros de centrais nucleares
V	- Roupas; - Equipamentos de laboratório; - Luvas; - Ferramentas; - Lavanderia; - Papéis, trapos, plásticos, tapetes.

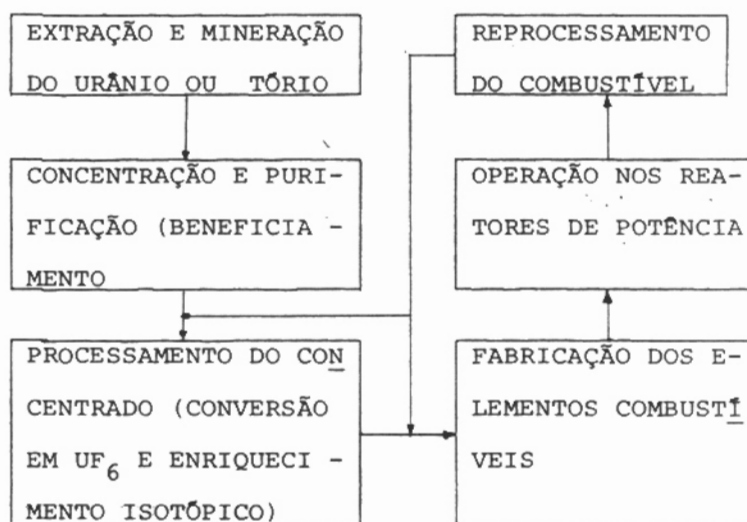
TABELA 1b. - Classificação dos Rejeitos Radioativos

Categoria	Meia-Vida	Nível	Características
I	Longa	Alto	Alta atividade Beta/Gama Quantidade significativa de emissor alfa Alta radiotoxicidade Alta produção de calor
II	Longa	Médio	Média atividade Beta/Gama Quantidade significativa de emissor alfa Média radiotoxicidade Baixa produção de calor
III	Longa	Baixo	Baixa atividade Beta/Gama Quantidade significativa de emissor alfa Baixa e média radiotoxicidade Significante produção de calor
IV	Curta	Médio	Média atividade Beta/Gama Quantidade insignificante de emissor gama Média radiotoxicidade Baixa produção de calor
V	Curta	Baixo	Baixa atividade Beta/Gama Quantidade insignificante de emissor gama Baixa radiotoxicidade Insignificante produção de calor

fusão para geração de energia.

1 - O Ciclo do Combustível:

O ciclo do combustível pode ser esquematizado basicamente como a figura abaixo:



1.1 - Extração e Mineração do Urânio e Tório:

Os processos de extração e mineração são diversificados por dependerem do tipo de minério, qualidade e afloramento, e dos métodos e técnicas mais eficientes de operação.

Os rejeitos por eles gerados não constituem risco sério⁽⁶⁸⁾ por serem, em sua maioria, insolúveis em água, estarem distantes de centros populacionais e serem considerados de baixa atividade⁽⁶⁸⁾.

Constituem-se principalmente de rejeitos líquidos gerados na água de drenagem da mina e de descontaminação da usina, equipamentos e roupas, que contêm uma pequena quantidade de Urânio e a maior parte de seus produtos de decaimento. Os rejeitos gasosos são considerados um pouco mais perigosos devido ao escape do Radônio e filhos, de partículas de Urânio e, depen -

dendo do processo, de gases tóxicos como o H_2S , gases ácidos e sílica

Os rejeitos sólidos são lamas/tortas constituídas, em sua maioria, pelos fragmentos da rocha estéril que contém Urânio e podem conter uma pequena quantidade de Rádio (0,7mg/t), considerado elemento perigoso.

Os rejeitos gerados pelos processos de extração e mineração do Tório, apesar de pouco utilizados, devem ser amplamente difundidos no futuro devido à tecnologia da fusão nuclear e à facilidade de extração (areia monazítica), principalmente no Brasil e Índia. Os rejeitos são mais perigosos que os do Urânio por possuírem produtos de decaimento mais tóxicos (Actínio) e apresentarem alta percentagem de terras-raras em sua extração.

1.2 - Beneficiamento (Concentração e Purificação).

As operações de beneficiamento do Urânio incluem processos químicos e físicos obtendo como produtos finais o U_3O_8 enriquecido, com a possível redução a UF_4 , e sobras.

Os principais rejeitos são os líquidos oriundos dos processos químicos de redução a UF_4 e dos processos de lavagens e lixívias. Estes líquidos podem conter emissores α (filhos do ^{238}U), Tório-234 e Protactínio-234, e os perigosos produtos da série do U e Ra, com destaque para o ^{226}Ra e o ^{230}Th . Deve-se dar ênfase ao Rádio por ser um elemento tóxico, tomando-se o cuidado de torná-lo insolúvel em água, diminuindo o risco.

Os rejeitos sólidos e gasosos aparecem em pequeníssimas quantidades de Rn, U e produtos de decaimento.

1.3 - Processamento do Concentrado (Conversão para UF_6 e Enriquecimento Isotópico).

Os processos de conversão para obtenção do UF_6 e sua purificação geram rejeitos de tipos diferentes, dependendo de serem tratados a flúor seco, ou por extração por solventes. Os contaminantes apresentam baixa radiotoxicidade, constituindo-se essencialmente de poluentes químicos como os nitratos, fluoretos e cloretos.

1.4 - Fabricação dos Elementos Combustíveis:

A fabricação de elementos combustíveis é um conjunto de processos mecânicos, metalúrgicos e químicos que variam de acordo com o tipo de combustível adequado a determinado reator. Em geral, o produto final são pastilhas, cilindros ou pequenas placas de dióxido de Urânio.

Os rejeitos mais perigosos sob o ponto de vista do manuseio são os particulados de Urânio gerados na mecanização dos metais, (alguns são pirofosfóricos), e principalmente na recuperação do Urânio.

A maior quantidade de rejeitos perigosos, porém, é a de líquidos de limpeza, que podem conter U e ^{234}Th em solução de ácidos fortíssimos, como o hidrófluorídrico e o nítrico.

Os sólidos, assim como os anteriores, contêm baixa concentração radioativa, no entanto, podem conter sub-produtos do flúor (CaF_2 por exemplo), o que requer maior atenção aos limites químicos.

1.5 - Operação nos Reatores de Potência:

Para que se especifique com razoável riqueza de informações os rejeitos de operação de reatores de potência, deve-se especificar o tipo de reator, a finalidade a que se des-

tina e a possível presença de um sistema primário de tratamento de rejeitos. Os rejeitos classificados a seguir, são originários de um reator refrigerado a água de circuito fechado, com a finalidade de geração de energia elétrica e com um sistema básico para tratamento dos efluentes líquidos.

Estes reatores têm como principal fonte de rejeitos a água de refrigeração, pois esta entra em contacto direto com o núcleo do reator e carrega consigo uma diversidade de contaminantes gerados pela ativação neutrônica de suas impurezas (sais dissolvidos e produtos da corrosão dos diversos constituintes do reator), e pelos produtos de fissão, oriundos dos próprios produtos de corrosão e de pequeníssimas difusões do encamisamento.

Por mais puras que sejam as águas e por mais anticorrosivos que sejam os materiais, esta contaminação tenderia a aumentar pelas sucessivas reciclagens e pela alta absorção de nêutrons da água, chegando a níveis inadmissíveis para qualquer operador ou sistema de segurança que aí funcionasse.

Esta água, portanto, é purificada através de resinas trocadoras de íons, sem antes passar por tanques de decaimento, para redução da atividade nos trocadores. Mesmo através deste sistema, durante algum tempo, as resinas não mais trocam as impurezas por estas formarem uma espécie de solução coloidal, sendo, portanto, substituída parte da água de refrigeração.

A quantidade de água contaminada eliminada num reator de potência, seria extremamente grande, porém com baixos níveis de atividade.

Em virtude dos nuclídeos constituintes desta água e do custo derivado de sua disposição, muitos países adotaram sistemas básicos de tratamento desta água como filtração, troca iônica, evaporação e desmineralização, seguindo o critério de redução de volume e estocagem.

Assim sendo, os rejeitos radioativos sólidos como as lamas de filtros, sobras de evaporadores, resinas usadas e soluções altamente salinas, constituem a maioria dos rejeitos de atividade intermediária gerados por este sistema.

Os rejeitos gasosos produzidos pela ativação e fissão dos gases dentro e fora do refrigerante (próximos ao vaso de pressão) são muitos, e os seus filtros incorporam-se aos rejeitos acima descritos.

Os rejeitos líquidos constituem-se das águas de descontaminação, lavagem da usina e dos equipamentos, assim como parte da água de refrigeração que não foi totalmente descontaminada pelos sistemas básicos acima descritos.

Ainda cabe ressaltar os processos potenciais de manutenção ou mesmo desmonte da usina, que ampliam o tamanho e o volume dos rejeitos gerados, por exemplo: bombas, válvulas, tubulações, tanques, partes internas do reator e seus efluentes, (detergentes, agentes complexantes, ácidos diluídos na água, etc.), de descontaminação. Tais rejeitos são considerados de nível intermediário a alto.

Os efluentes radioativos de operações normais de reatores não constituem risco significativo à população, desde que convenientemente tratados⁽⁹⁴⁾. São tabelados a seguir (Tabela 2), alguns dos nuclídeos⁽⁹⁴⁾ mais encontrados, suas meias-vidas e prováveis pontos de origem.

Os efluentes de um acidente com fusão de barras combustíveis teriam da ordem de 10^6 Ci de produtos de fissão, que não se restringiriam, em sua totalidade, ao interior do reator.

Nuclídeo	T _{1/2}	Origem
¹³³ Xe (gás)		
⁸⁵ Kr (gás)		
³ H (gás ou liq.)	12,26 a	
⁴¹ Ar (gás)	1,8 h	ar da água
¹⁴ C	5620 a	
¹⁶ N	7,3 s	O ¹⁶ da água
¹⁷ N	4,1 s	O ¹⁷ da água
³⁵ S		
³⁸ K	7,7 min.	
¹³¹ I (gás)	8 d	
¹⁸ F		
³² P		
⁵⁶ Mn	2,6 h	aço
⁶⁴ Cu	12,8 h	aço - 17 - 4PH
²⁴ Na	15 h	na água
¹⁸ W	24 h	aço
⁵⁹ Fe	45 d	aço
¹⁸² Ta	111 d	aço
⁶⁰ Co	5,3 a	aço
⁵¹ Cr	27,8 d	aço
⁶⁵ Ni		aço

Tabela 2 - Núcleos Típicos de um Reator Refrigerado a Água.

1.6 - Reprocessamento de Combustíveis:

Sem dúvida alguma, é a indústria nuclear que gera a maior quantidade de rejeitos⁽⁶⁸⁾ (99,9%).

Os elementos combustíveis pós-irradiação perdem sua eficiência e estabilidade mecânica devido, principalmente, ao acúmulo de produtos de fissão. Mesmo elementos compostos por U natural, perdem sua percentagem de ^{235}U e promovem o acúmulo de Pu.

Os processos que constituem o reprocessamento são bem complexos e englobam fases, estágios e ciclos de purificação, com seus respectivos sistemas de tratamento. Um processo simples pode ser enumerado ⁽¹⁷⁾ como segue:

- 1) desencamisamento dos elementos combustíveis por processos físicos, sob a água;
- 2) dissolução dos elementos combustíveis em ácidos fortes sob condições oxidantes;
- 3) extração do U e Pu com solventes orgânicos, deixando os produtos de fissão em fase aquosa;
- 4) redução do Pu, e sua extração em fase aquosa;
- 5) extração do U em fase aquosa.

Qualquer que seja a atividade dos rejeitos aqui gerados, diminuirá proporcionalmente ao tempo de resfriamento pós-irradiação, nos tanques ou piscinas do próprio reator.

Os gases mais perigosos originam-se da dissolução dos elementos combustíveis e da extração por solventes. São em geral, produtos de fissão voláteis como ⁽¹⁷⁾ ^{133}Xe , ^{131}I , ^{85}Kr , ^{82}Br , ^3H , ^{106}Ru , ^{129}Te e ^{137}Cs .

Outros produtores de gases são os diversos sistemas de coleta, tratamento de gases e ventilação.

Os efluentes líquidos são o objetivo de estudo da maioria dos pesquisadores de diversos países, pois constituem-se na maior fonte de rejeitos radioativos, contendo, na sua primeira fase ⁽⁶⁰⁾, 99,9% dos produtos de fissão gerados no reator.

As principais fontes de rejeitos líquidos de alta atividade são o desencamisamento e dissolução dos elementos combustíveis e a extração e purificação do U e Pu, que contém grande quantidade de produtos de fissão envolvidos. Apesar de possuírem tal atividade, são aqueles que oferecem meios mais fáceis para o seu manuseio, devido ao pequeno volume.

Os líquidos de atividade intermediária, por sua vez, apresentam quantidades significativas e origens diversas, oferecendo manuseio mais difícil, também por sua menor concentração. Originam-se, em grande parte, das operações químicas como a lavagem dos solventes orgânicos e dos regeneradores de resinas de troca-iônica. Outras fontes são as águas de lavagens dos tanques de armazenamento, as soluções de descontaminação (do encamisamento, dos laboratórios), das soluções de limpeza da usina durante a manutenção e dos sistemas de tratamento de efluentes gasosos, que podem conter também o nitrato de mercúrio como contaminante químico.

Os líquidos de baixa atividade constituem grandes volumes, onde podem ser encontrados ⁽²⁾ nuclídeos como ^3H , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{241}Am , ^{241}Pu e $\text{Pu}(\alpha)$ em concentrações variando de 10^{-6} a 10^{-9} Ci/m³. Suas fontes produtoras são semelhantes às dos outros produtores de rejeitos, donde destacam-se os efluentes da purificação do U e Pu de ciclos posteriores, os vapores condensados de concentradores e sistemas de tratamento de gases, as águas de refrigeração e os líquidos provenientes da lavanderia, operações de limpeza e descontaminação em geral.

Os rejeitos sólidos são de difícil estimativa, no que se refere à atividade, quantidade e origem. Uma estimativa precária da atividade é obtida com um detector colocado a uma distância conhecida, e daí, extrapolados resultados.

Os rejeitos sólidos mais radioativos são provenien-

tes dos processos iniciais, como os fragmentos do encamisamento, e os concentrados finais, como as resinas de troca-iônica, filtros, lamas, cinzas (fluoração e do incinerador), precipitados de tanques que freqüentemente são solidificados em cerâmica, vidros, etc., para evitar dissolução. Outros rejeitos sólidos constituem uma miscelânea de roupas, equipamentos usados, purificadores (sílica-gel para Urânio e zeólitos para Iodo), borrachas, papéis e vidrarias, em geral.

2 - Outros Produtores de Rejeitos:

Os outros produtores de rejeitos contribuem para uma pequena parcela do total dos rejeitos produzidos na Indústria Nuclear, e podem ser divididos resumidamente em: Centros de Pesquisa, Produção de Radioisótopos, Hospitais, Indústrias e Aplicação em Transportes.

2.1 - Centros de Pesquisa:

Os laboratórios de Universidades, estabelecimentos de pesquisa governamentais e os laboratórios de pesquisa e desenvolvimento industriais caracterizam-se pela ampla variedade de trabalhos que realizam, cujo caráter pode diversificar-se em função dos projetos de pesquisa em questão.

Os grandes centros de pesquisa, por exemplo: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), HARWEL, e mesmo o IPEN, podem ter um ou mais reatores, agregar sub-centros, como o de processamentos e pesquisas químicas, o de produção de radioisótopos, o de aplicações médicas ou biológicas, até conter plantas-piloto para estudo ou produção semi-industrial.

Os rejeitos produzidos são muito variados pela extensa gama de pesquisas dos sub-centros, reator e planta-piloto.

Os rejeitos gasosos podem advir da água de refrige-

ração do reator (^3H , ^{41}Ar), de processos químicos (I, Ba, Ru), de capelas de manuseio de fontes, de incineradores ou mesmo de rupturas do encamisamento (Xe, Kr). Os mais perigosos sofrem, em geral, uma filtragem e são dispersos por chaminés altas, na atmosfera.

Os rejeitos sólidos mais importantes são as resinas de troca-iônica e os filtros usados do tratamento das águas do reator ou em tratamentos específicos de plantas-piloto e laboratórios químicos. A grande maioria, porém, constitui-se de papéis, tecidos, borrachas, vidrarias, plásticos, metais, excretas biológicos, etc., com ênfase especial nas fontes seladas que já perderam sua vida útil.

Os líquidos originam-se principalmente das águas de refrigeração e regeneração do reator e dos efluentes dos sub-centros de processamento químico. Deve-se dar atenção a pequenas quantidades acidentais, que podem conter radionuclídeos⁽⁹⁴⁾ como Ru, Cs, Sb, Te, Zr, terras-raras e aos detergentes de lavanderia (IGEPAL - CA EXTRA) contaminados com nuclídeos perigosos (por exemplo ^{90}Sr).

2.2 - Produção de Radioisótopos:

A produção de radioisótopos pode ser uma parte das atividades de um centro de pesquisas, como pode ser o objetivo de indústrias ou de determinadas firmas.

Os radioisótopos são produzidos em grande quantidade nos centros de pesquisa, mas, em geral, contêm baixa atividade específica. Os rejeitos gerados são similares aos dos centros de pesquisa. Eles podem vir de processos de ativação no reator, por bombardeamento em aceleradores ou por separação de produtos de fissão. Os mais importantes sob o ponto de vista de estocagem e tratamento são o ^{90}Sr , ^{137}Cs e o ^{85}Kr , e os produtos contendo Iodo, sob o ponto de vista radiossanitário.

Aqueles estabelecimentos que produzem o Tório e o Rádio podem se considerados como fontes específicas de rejeitos.

O Tório, extraído da areia monazítica, sofre várias transformações químicas e físicas, gerando, a cada etapa, rejeitos que podem causar danos aos seus operadores. O tratamento com ácido sulfúrico, a separação química dos terras-raras e os sucessivos processos de purificação com oxalatos e hidróxidos, levam consigo pequena quantidade de Tório e de seus produtos de decaimento que são muito perigosos. O produto final é, em geral, uma pastilha contendo alta percentagem de Th cujo comportamento é dito fértil por gerar o ^{233}U (físsil) como produto de bombardeamento neutrônico.

O Rádio, geralmente extraído de minerais de U inalterados, possui qualidades aproveitáveis na medicina, na indústria metalúrgica e nas aplicações de luminescência de aparelhos óticos e relógios.

Os pequenos estabelecimentos costumam utilizar alguns milicuries de Rádio por mês, enquanto que os maiores usam até dezenas de vezes mais.

O Ra é um elemento muito tóxico ao organismo, e qualquer quantidade deve ser considerada cuidadosamente.

Os rejeitos gasosos são produzidos nas aplicações luminêscntes, sendo percebidos sob a forma de vapores, aerossóis e poeira de Ra.

Os rejeitos líquidos são pequenas quantidades de água de dissolução de pinturas e solventes de estênceis de letreiros.

Os sólidos aparecem numa variedade de aparelhos usados, luvas de borracha, filtros, trapos, garrafas e pequenas pinças de aplicações de luminescência. Os rejeitos sólidos de maior importância são as agulhas, lâminas ou pastilhas, em geral encapsuladas em material inativo, liga de Platina-Irídio,

por exemplo, que perderam seu uso ou que se romperam; neste caso constituindo-se em rejeitos de alta atividade.

2.3 - Hospitais:

Radioisótopos produzidos nas fontes anteriores, vide (item 2.2), podem ser utilizados na medicina e na biologia, para diagnósticos, terapêuticas ou pesquisas.

A maior parte dos rejeitos gerados está na forma líquida, provenientes dos excretas (urina e fezes) de pacientes submetidos e alguma das aplicações de diagnose. Os núclídeos mais usuais são o Iodo (mapeamento da tireóide), o ^{32}P (circulação do sangue), o ^{24}Na (estimativas de volumes e tempos), o ^{14}C (hormônios e drogas) e uma infinidade de outros radioisótopos, específicos do exame desejado (Cr, Fe, Tl, etc.). O ^{198}Au também é um rejeito líquido importante nas aplicações de pequenas irradiações e mapeamentos.

Podemos dividir as aplicações na medicina, ainda, em fontes seladas e traçadores. Estes, em geral de meia-vida curta, tornam-se rejeitos nos excretas e nas carcaças de animais, e aqueles, em geral de meia-vida longa, dificilmente aparecem como rejeitos, mas, neste caso, seriam extremamente perigosos.

Os traçadores com ^{198}Au constituem aproximadamente a metade dos rejeitos, os Iodos a quarta parte, e o restante são Br, Na, P, etc.

As fontes seladas mais usadas são o Tântalo-182 ($T_{1/2} = 111 \text{ d}$), Estrôncio-90 ($T_{1/2} = 28 \text{ a}$), Cério-144 ($T_{1/2} = 290 \text{ d}$), o cobalto-60 ($T_{1/2} = 5,3 \text{ a}$) e algumas com meia-vida curta, como o ^{198}Au e o ^{137}Cs , que tornam-se rejeitos num período de tempo relativamente menor.

2.4 - Indústrias:

Na indústria também encontramos aplicações de traçadores, em diversos processos, e de fontes seladas, a maioria, em muitas análises e aplicações, ditas não destrutivas.

Os traçadores são a maior fonte de rejeitos, neste caso, pois ao determinar tempos de permanência, volume de materiais em evolução, localização de fugas e obstruções em condutos, estudar a contaminação, desgaste, corrosão, eficiência de fluidos, vazões e movimento de sedimentos, os rejeitos são um subproduto, em geral, não recuperável. Os radioisótopos são específicos para cada aplicação.

As fontes seladas normalmente não ~~geram~~ ^{estomam} rejeitos, pois os processos de controle de qualidade, perfilagem de poços, medições de umidade, densidade, nível d'água, gamagrafia, etc, não oferecem risco à integridade dos encapsulamentos das fontes. As fontes mais usadas são o ^{192}Ir , ^{60}Co , ^{170}Tm , ^{90}Sr e ^{137}Cs .

2.5 - Aplicações em Transportes:

A energia nuclear tem sido utilizada como combustível em transportes aeroespaciais e marítimos.

Os transportes aeroespaciais são potencialmente mais perigosos, por oferecerem o risco de retornarem à Terra, contaminando a atmosfera.

Os transportes marítimos oferecem a garantia de diluição no mar, apesar de constituírem risco à tripulação.

Um bom exemplo de quantidades e tipos de rejeitos gerados por um meio de transporte marítimo, pode ser dado pela análise feita no reator do S.S. Savannah após 50 dias de operação.

Produtos de corrosão na resina de desmineralização:
 ^{59}Fe (3,8 Ci), ^{55}Fe (75 Ci), ^{60}Co (75 Ci), ^{182}Ta (103 Ci),

^{51}Cr (148 Ci), totalizando 405 Ci. A atividade contida no refrigerante pode ser avaliada como 99,9% provenientes dos produtos de corrosão (^{51}Cr , ^{182}Ta) e 0,1% dos produtos de fissão (^{137}Cs), totalizando 0,7 Ci de atividade.

C A P Í T U L O I I

II - DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE MÉDIA A BAIXA ATIVIDADE

A disposição de rejeitos sob o solo tem sido usada desde o início das pesquisas nucleares, na década de quarenta.

O volume de rejeitos da indústria nuclear tem aumentado exponencialmente nos últimos anos. Em 1976, foi feito um inventário⁽⁹⁰⁾ das quantidades e volumes gerados nos EUA, chegando a um volume acumulado de $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rejeitos, com $1,3 \times 10^7 \text{ Ci}$ de atividade, contendo aproximadamente 860 kg de Plutônio (Tabela 3). Um estudo das taxas anuais de geração de rejeitos, (Figura 1), mostra a necessidade de novos sítios até 1990 (Figura 1, linha A), o que requer amplos projetos de pesquisa na área de rejeitos, particularmente na seleção e avaliação de locais.

A expansão da indústria nuclear vem acreditando amplamente no enterro de rejeitos, e espera que continue assim, no futuro.

O propósito deste capítulo é descrever as estruturas e tecnologias para disposição de rejeitos radioativos, assim como a base de estudos e os problemas que daí advirem. Este entendimento é básico para qualquer consideração ou avaliação de práticas de disposição de rejeitos existentes ou projetadas, e possíveis modificações.

Com o amplo programa nuclear brasileiro, que envolve o Ciclo do Combustível, há um grande volume de rejeitos previsto para os próximos anos, o que parece exigir o desenvolvimento de tecnologia para seleção e avaliação de sítios provisórios e permanentes para a disposição de rejeitos no Brasil.

TABELA 3 - QUANTIDADES APROXIMADAS DOS REJEITOS DE BAIXA ATIVIDADE (INCLUINDO ALGUNS TRANSURÂNICOS) ENTERRADOS NOS SÍTIOS DE DISPOSIÇÃO DOS E.U.A.

Principal Fonte de Rejeito	Volumes			Conteúdo em Curies			Conteúdo de Pu		Conteúdo de Urânio
	Taxa Anual de Geração (m ³)	Total Acumulado Até 1976 (m ³)	Taxa de Acumulação Anual (Ci)	Total Acumulado (Após Decaimento) (Ci)	Taxa de Acumulação Anual (Kg)	Total Acumulado (Kg)			Total Acumulado (Kg)
Governo Federal	5 x 10 ⁴ - 6 x 10 ⁴ (a)	1,3 x 10 ⁶	6 x 10 ⁵	9 x 10 ⁶	25	740 (b)			5,8 x 10 ³
Comercial, Incluindo os Rejeitos Fora do Ciclo do Combustível	6 x 10 ⁴	4,2 x 10 ⁵	3,6 x 10 ⁵	3,8 x 10 ⁶	15	132			900

(a) Inclui os Rejeitos Transurânicos Estocados Provisoriamente.

(b) Um Adicional de 230 Kg é Estocado Provisoriamente.

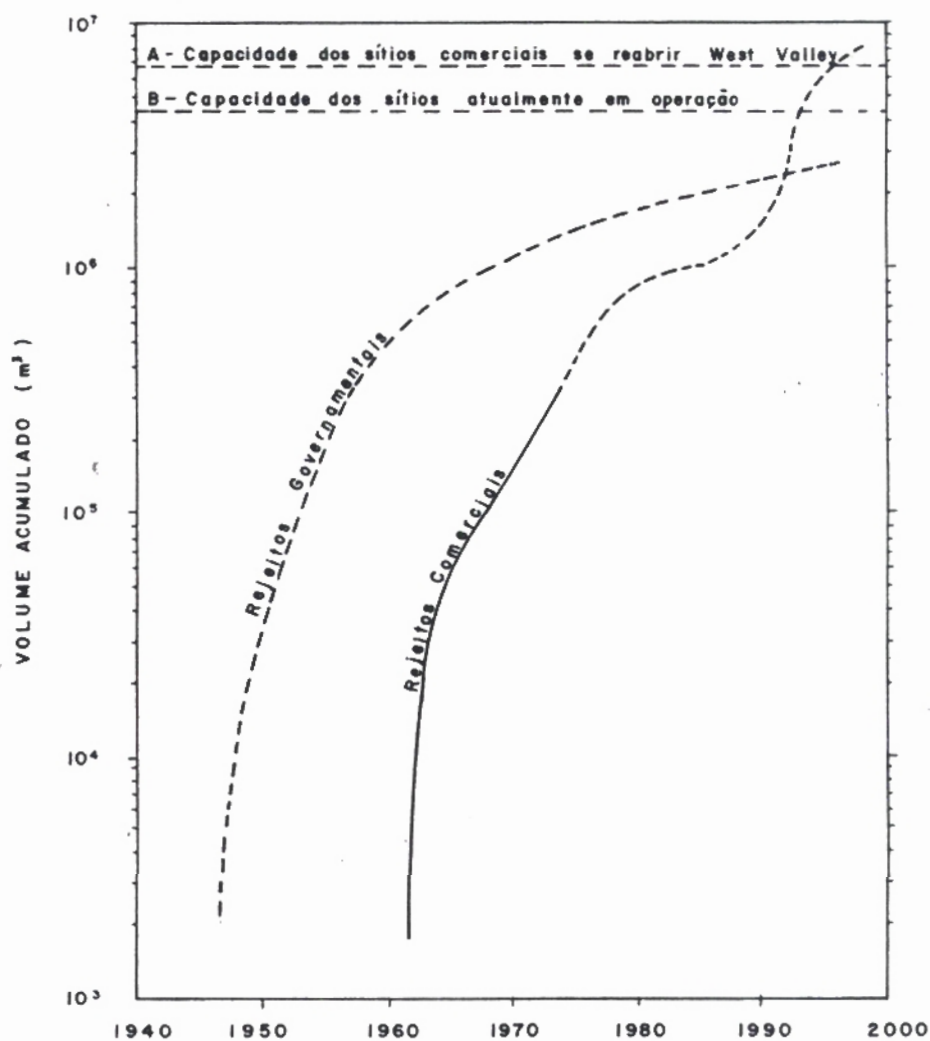


Fig. 1 - Volumes acumulados dos rejeitos governamentais e comerciais de baixo nível dos E.U.A. As linhas tracejadas foram estimadas com base nos 203 reatores, entre construídos, (70), em construção (91), e planejados (42).

1 - Tipos de Disposição:

Os tipos de disposição dividem-se em duas categorias: a disposição de rejeitos líquidos e a disposição de rejeitos sólidos.

A disposição de rejeitos líquidos é feita em diversas estruturas, como descritas abaixo:

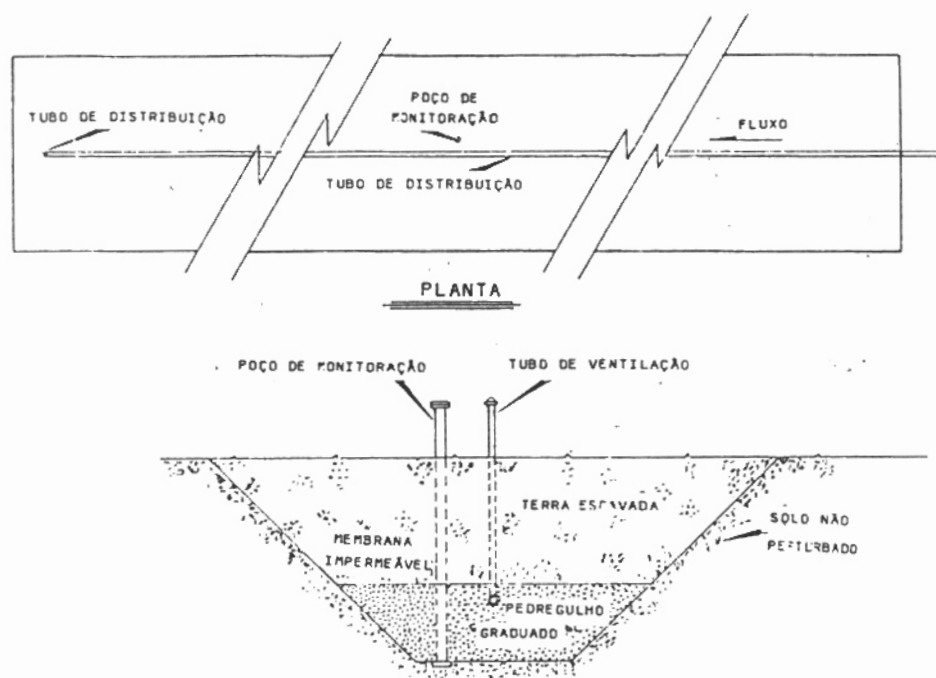
"CRIB": É um sistema de distribuição de rejeitos líquidos através de tubos subterrâneos enterrados em valas longas e estreitas, com aproximadamente 3m de largura no fundo. Estas valas são preenchidas com pedregulhos graduados e terra da própria escavação. Um desenho esquemático pode ser visto na figura 2.

"PIT": É uma escavação na forma de uma lagoa, com medidas, por exemplo, de 70x37x2,5m, preenchida com seixos de 4 a 6 cm de diâmetro. Esta escavação pode ser coberta com terra da escavação e conter tubos de disposição enterrados. Pode, também, ser aberta e o líquido pode ser despejado sobre a lagoa. Este tipo de "pit" é chamado "pit" de percolação, bacia de percolação ou leito de percolação. Caso o rejeito líquido contenha uma grande quantidade de rejeitos químicos, chama-se de "pit" química.

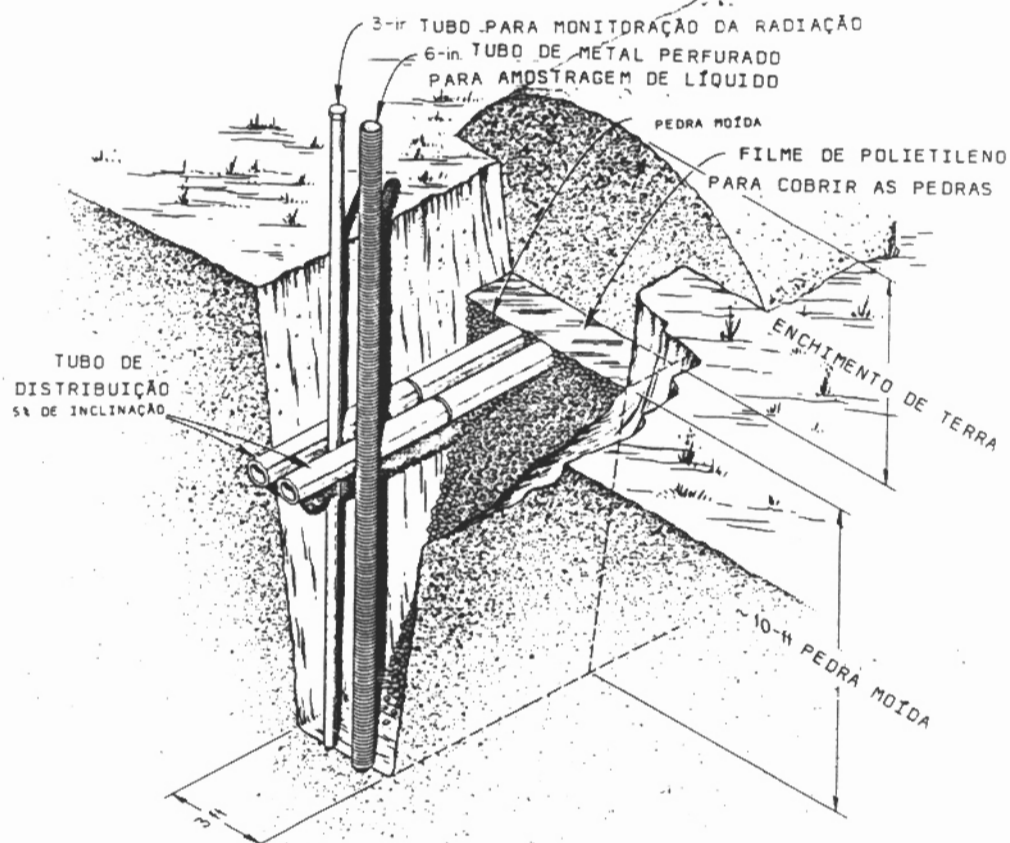
A "pit" também pode ser usada para dispor rejeitos sólidos de baixa atividade, diretamente sob o solo.

Outros tipos de disposição líquida, são as depressões naturais do terreno (swamps), as lagoas ou lagos naturais (lagoons ou ponds), os poços secos onde bombeia-se o líquido radioativo (reverse wells), os tanques de disposição enterrados, as trincheiras para dispor líquidos e, mais recentemente, as hidrofraturas. Algumas destas disposições estão representadas nas Figuras 3 e 4.

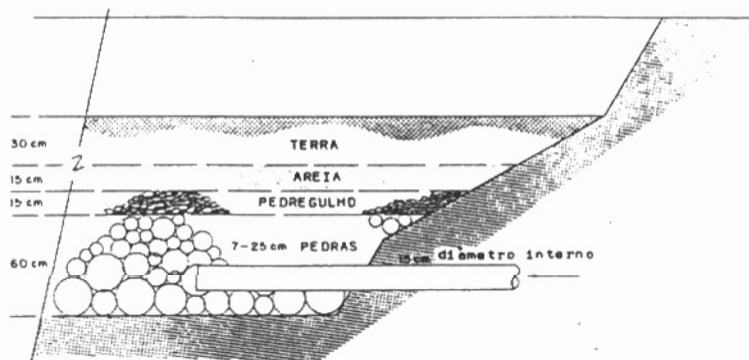
A disposição de rejeitos sólidos é feita, em sua maioria, em trincheiras.



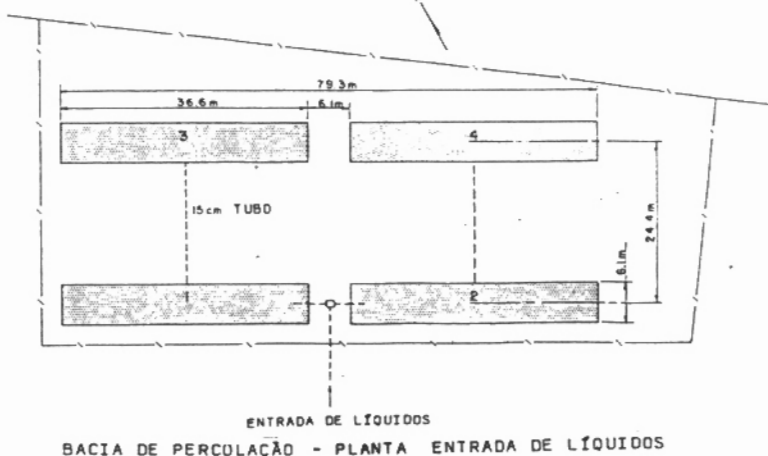
SECÇÃO TRANSVERSAL-"CRIB" TÍPICO DE HANFORD



TÍPICA TRINCHEIRA PARA LÍQUIDOS



BACIA DE PERCOLAÇÃO - SECÇÃO TRANSVERSAL



BACIA DE PERCOLAÇÃO - PLANTA ENTRADA DE LÍQUIDOS

Fig.3- Tipos Convencionais de Disposição de Líquidos

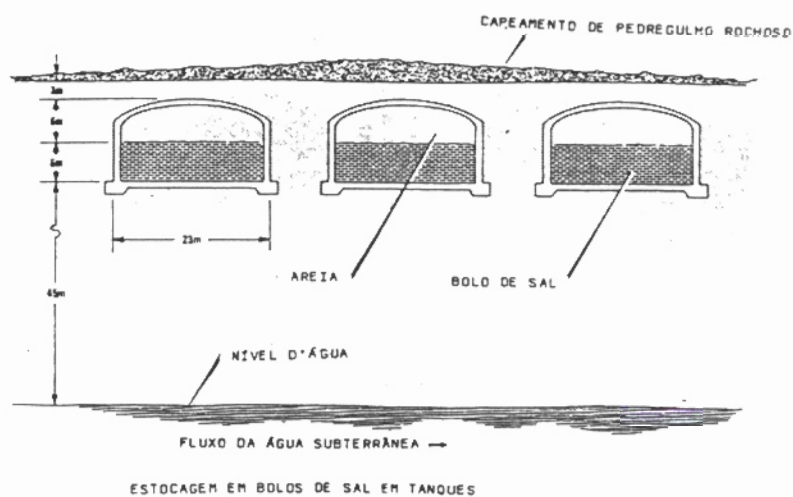
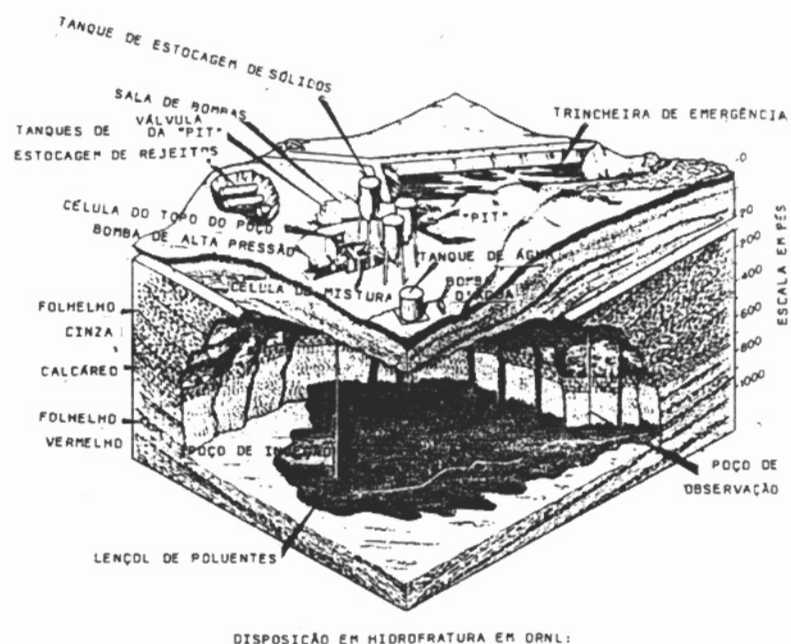


Fig.4- Tipos Recentes de Disposição de Líquidos

TRINCHEIRAS: são valas rasas, estreitas e longas (150m de comprimento, 10m de largura e 6m de profundidade) , destinadas ao enterro de caixas, tambores, etc, de baixo nível de atividade, e em grande volume. Elas são preenchidas até 15 cm do fundo, com predregulho, sendo que a base é, em geral, inclinada na direção de um dos extremos ou da linha central , onde é colocado um tubo de monitoração vertical.

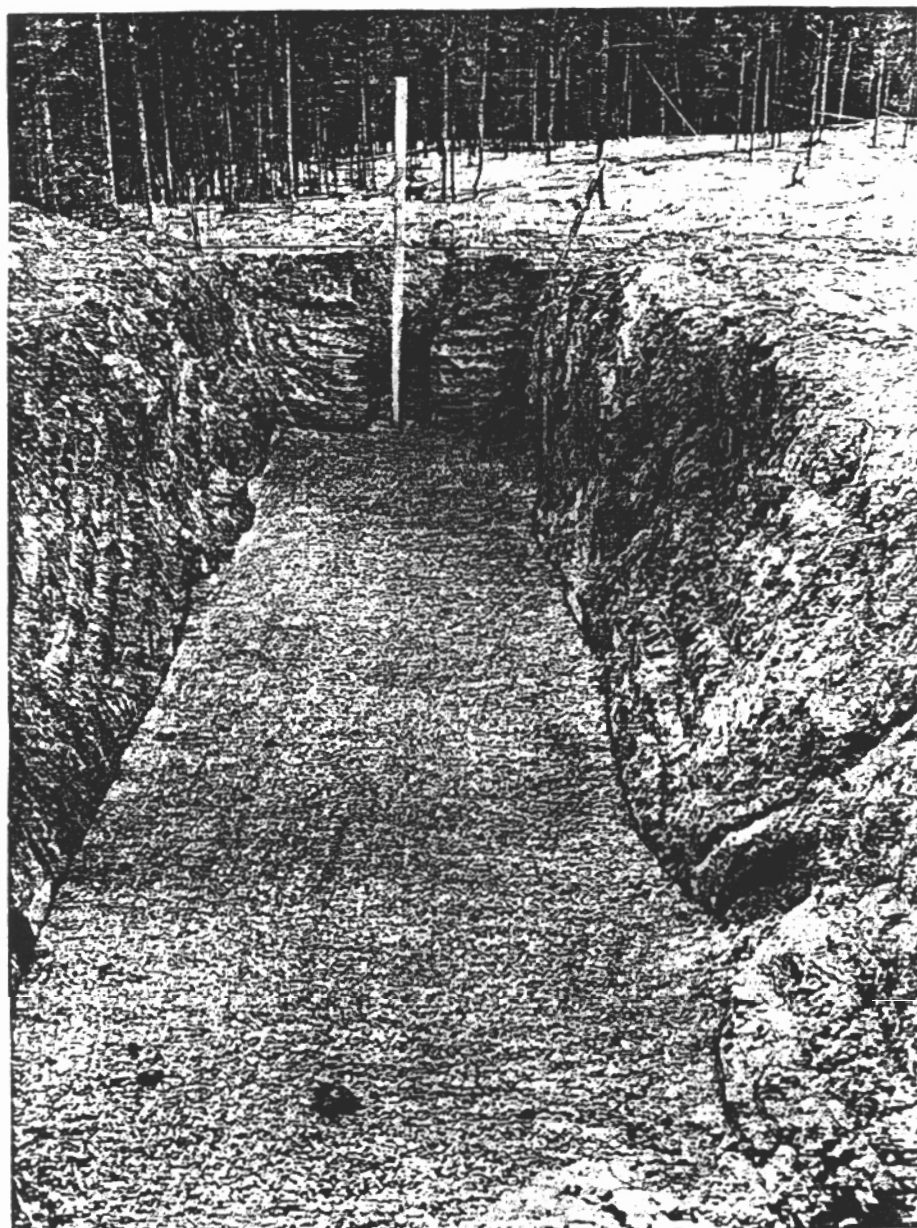
Em algumas trincheiras (lined trenches), impermeabiliza-se a base para evitar que os lixiviantes penetrem verticalmente no solo.

Os rejeitos são colocados em camadas e cobertos com a terra escavada para preencher os vazios até, aproximadamente, 1m da superfície. Esta camada de terra e rejeitos, ao final, é compactada e, em certos casos, coberta com um material impermeável (asfalto, concreto, argila), podendo ser feito um amontoado de terra acima do nível do terreno. Estas medidas diminuem a erosão e a capacidade de infiltração vertical. As fases de disposição em uma trincheira podem ser vistas nas Figuras 5, 6 e 7.

Para a disposição de sólidos de média atividade e de grande porte, são usados outros dispositivos, como os descritos a seguir:

TRINCHEIRAS DE CONCRETO: são estruturas de concreto armado que são usadas, em geral, para dispor tambores e pacotes de média atividade, que são compactados com areia e cobertas com uma tampa de concreto, que pode, ou não ser recoberta com terra da escavação. Um esquema e foto de uma trincheira de concreto podem ser vistos na Figura 8.

MONOLITOS DE CONCRETO: são estruturas de concreto onde são estaqueados os tambores de rejeitos e, depois, preenchidas com concreto até formar um monolito. Estes monolitos são construídos no interior de uma trincheira profunda, ou



SISTEMA DE DRENAGEM COM PEDREGULHO E TUBO COLETOR

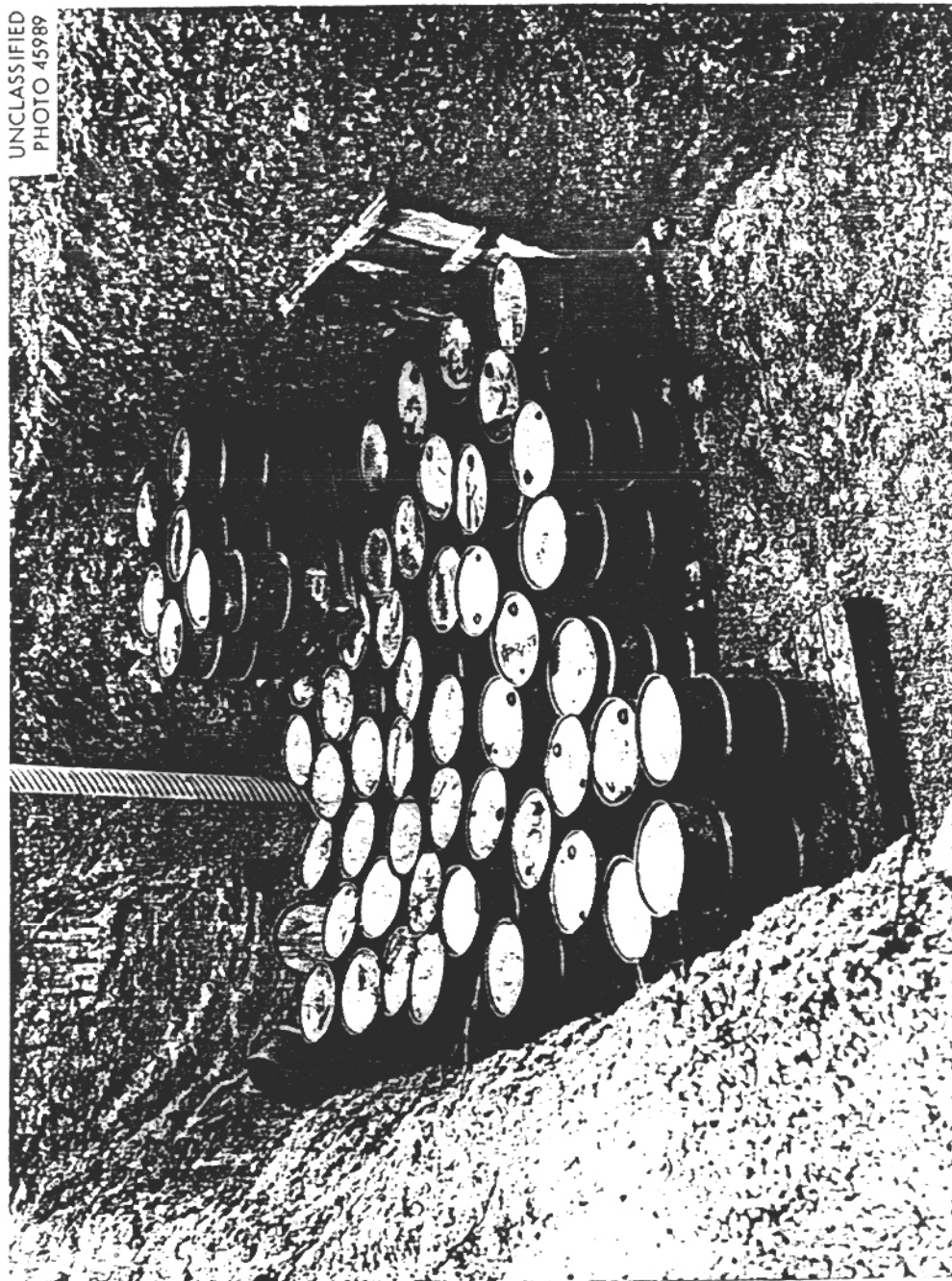
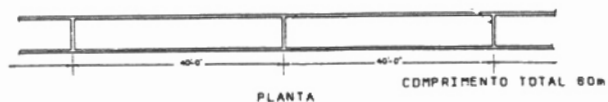
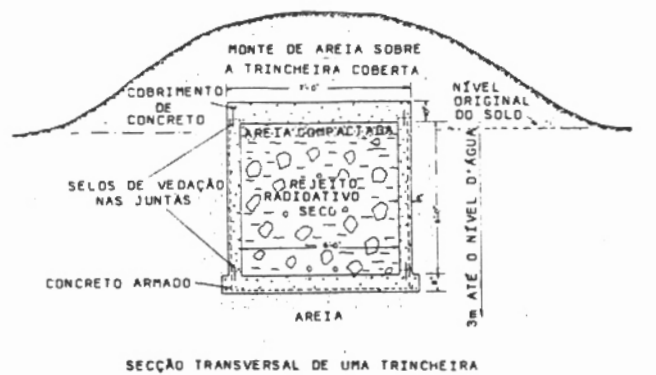


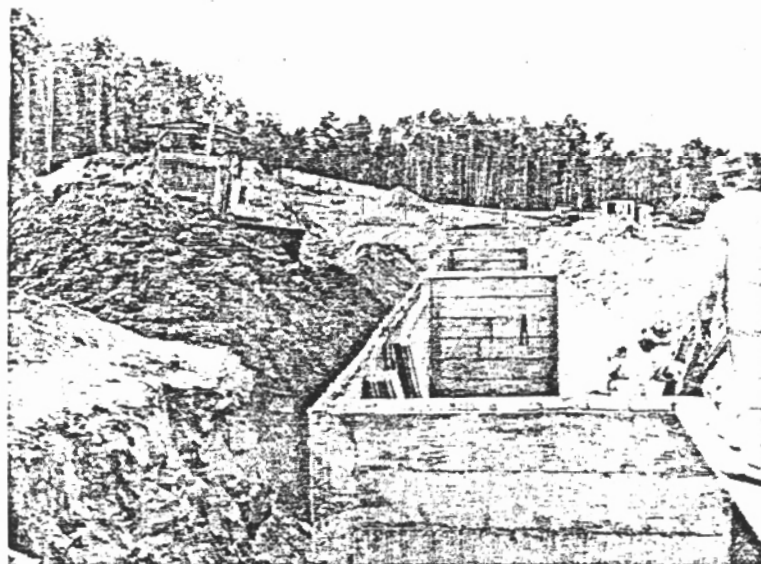
Fig.6- COLOCAÇÃO DOS TAMBURES NA TRINCHEIRA.



Fig.7-CAPEAMENTO DE ASFALTO SOBRE UMA TRINCHEIRA DE TERRA



TRINCHEIRA DE CONCRETO



TRINCHEIRA DE CONCRETO EM CONSTRUÇÃO

Fig.8- Trincheira de Concreto

transportados para um depósito permanente. (vide Figura 9).

POÇOS SELADOS (TILE HOLES): são poços de aproximadamente 60 cm de diâmetro e 3 a 5m de profundidade, revestidos com um tubo de concreto ou de aço até o fundo, onde ele é enterrado em uma base de concreto. Este sistema é usado para depositar tambores com sólidos de alta a média atividade. Após a disposição são selados com uma tampa de concreto ou chumbo para evitar a exposição externa. A Figura 10 , apresenta uma foto e um diagrama ilustrativos.

GALERIAS: são aberturas subterrâneas naturais (intemperismo químico) ou artificiais (minas), utilizadas para estocar sólidos ou líquidos de baixa a média atividade, em tambores vedados. A figura 11 , ilustra a disposição feita numa mina de sal em Asse, na Alemanha.

A filosofia de gerenciamento de rejeitos segue dois rumos distintos: concentrar para estocar ou diluir para dispersar.

Esta segunda filosofia é muito usada para o gerenciamento de rejeitos líquidos de baixa atividade, diluindo-os e despejando-os em lagos, rios e mares.

A primeira filosofia é mais usada para sólidos e líquidos de média e alta atividade. Neste caso, as disposições podem ter caráter provisório, isto é, subentende-se a recuperação do rejeito (disposição sobre bases de concreto a céu aberto), e são chamadas de "estocagem provisória". Podem, também , ter caráter permanente (disposição no mar, Figura 12), e são ditas "disposição permanente".

Cada país possui o seu tipo particular de disposição, como veremos a seguir.

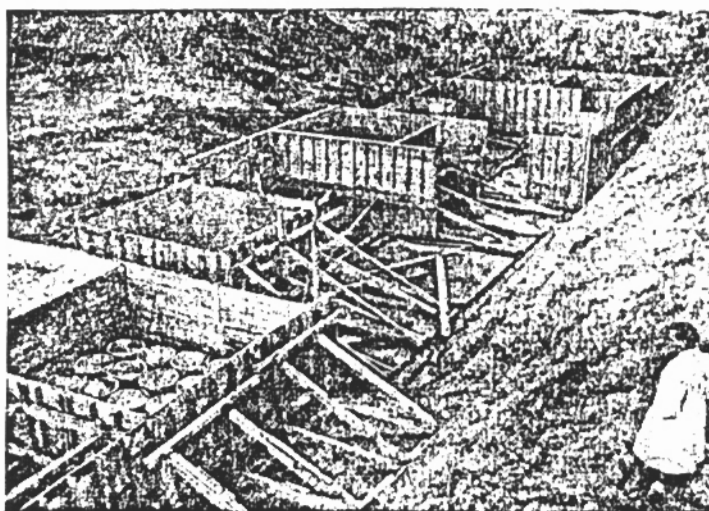
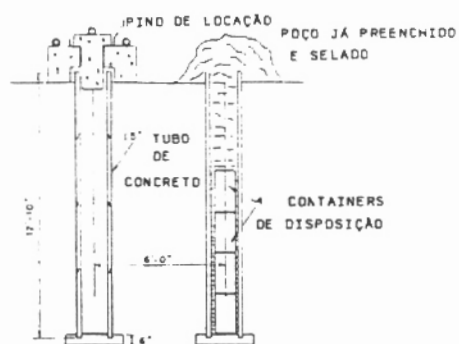
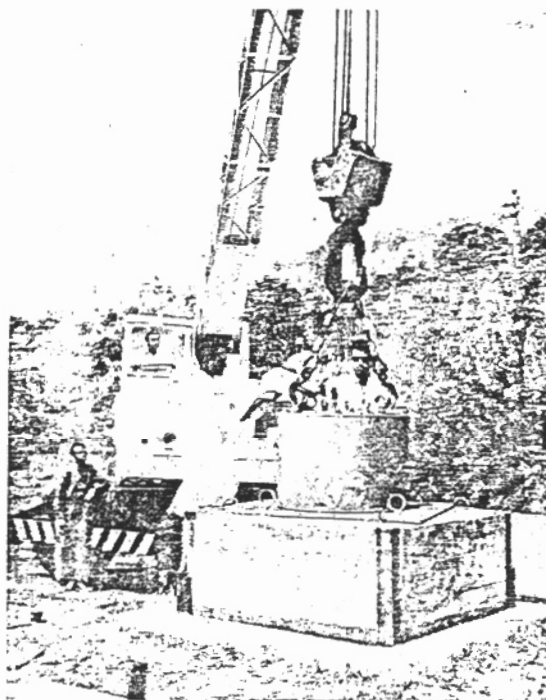


Fig.9- Monolito de Concreto em Construção

POÇOS SELADOS (TILE HOLES)



POÇOS SELADOS (TILE HOLES) DE CONCRETO. SECÇÃO DO POÇO EM USO E APÓS O PREENCHIMENTO.



POÇOS SELADOS DE AÇO

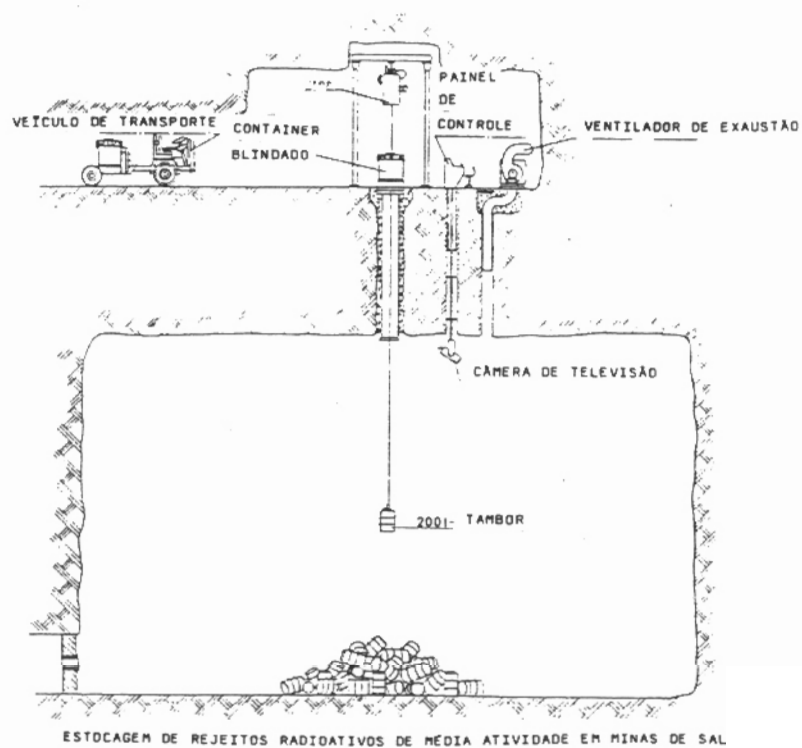
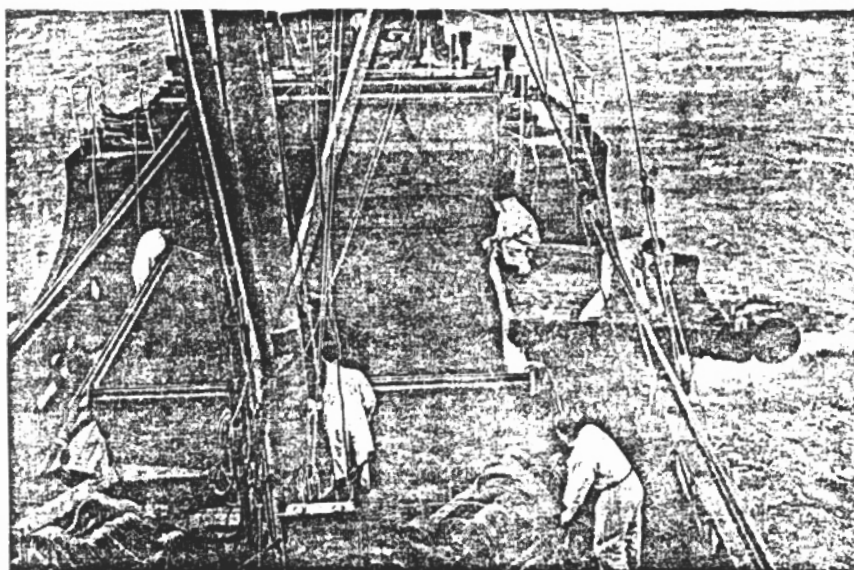


Fig.11- Disposição em Minas de Sal



DISPOSIÇÃO DE SÓLIDOS NO MAR (UKAEA).

2 - Disposição em Diversos Países:

2.1. EUA:

A primeira parte do levantamento a ser apresentado sobre o estudo da disposição de sólidos de baixa atividade nos Estados Unidos, descreve as experiências e práticas de enterro de rejeitos em seis estabelecimentos comerciais, seguidos de cinco laboratórios nucleares dos EUA.

A segunda parte descreve as características geohidrológicas examinadas na escolha de cada local, e os problemas oriundos desta escolha.

Nos EUA, rejeito radioativo de baixa atividade⁹⁰⁾ é aquele que não se origina, diretamente do reprocessamento de combustíveis, e contém menos do que 10nCi/g de núclídeos transurânicos (TRU) emissores alfa, como o Plutônio.

Porém, até 1970, não havia distinção entre os rejeitos transurânicos (TRU) e os rejeitos de baixo nível (LLW); e a maioria dos sítios de baixo nível (LLW) contém transurânicos (TRU).

Quase todos os rejeitos radioativos dos EUA têm sido depositados nos seis estabelecimentos comerciais e nos cinco laboratórios nacionais. Inicialmente, só os laboratórios es tocavam rejeitos, sob a regulamentação da AEC (Atomic Energy Commission), que passou a ERDA (Energy Research and Development Administration). A partir de 1962, entraram em operação os estabelecimentos comerciais para estocar rejeitos e, até 1971, já haviam seis depositórios comerciais em funcionamento. (vide Figura 13)

Os cinco laboratórios regulamentados pela ERDA são:

- 1 - Savannah River Laboratory (SRL), Carolina do Sul;

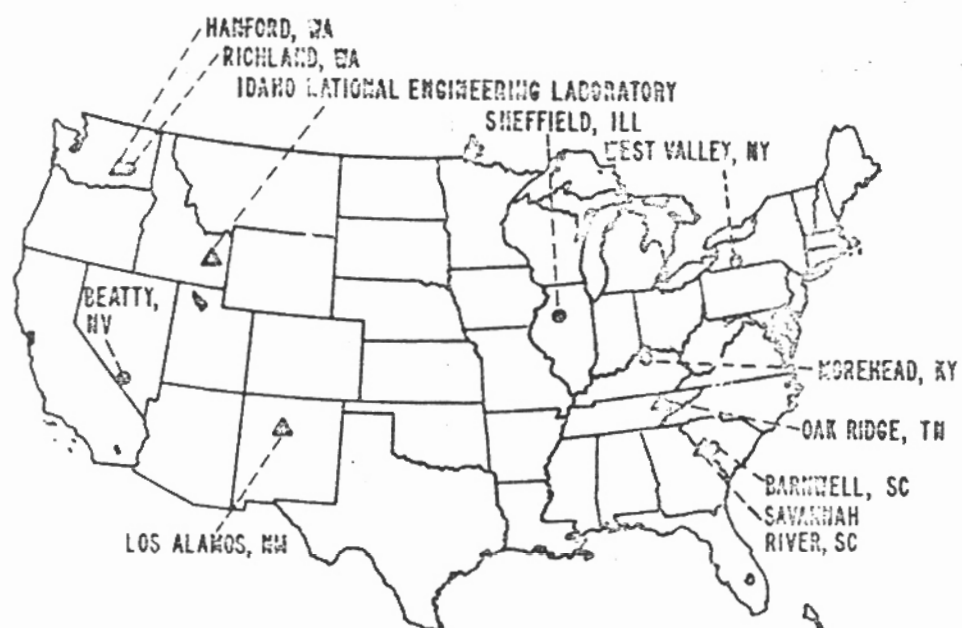


Fig.13- Localização dos Sítios Radioativos Comerciais (●) e dos Laboratórios Nacionais (▲) dos EUA

- 2 - Idaho National Engineering Laboratory (INEL) ,
Idaho;
- 3 - Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Tennessee;
- 4 - Hanford, Washington;
- 5 - Los Alamos Scientific Laboratory (LASL), Novo
México.

Os seis estabelecimentos comerciais são regulamenta-
dos por três companhias:

- 1 - Chem - Nuclear Systems, Inc., (CNS) que opera :
Barnwell, Carolina do Sul;
- 2 - Nuclear Engeneering Company, (NECO), que opera:
Sheffield, Illinois;
Beatty, Nevada;
Richland, Washington;
Morehead (ou Maxey Flats), Kentucky;
- 3 - Nuclear Fuel Services Co., que opera West Valley,
New York.

2.1.1 - Práticas e Experiências de Disposição de Rejeitos nos EUA:

2.1.1.1-Práticas nos Laboratórios

As operações e práticas correntes nos cinco labora-
tórios, para disposição de rejeitos radioativos estão resumi-
das na Tabela 4.

Existe uma padronização que regula a localização ,
dimensões e características físicas das trincheiras e "pits"
de disposição. Entretanto, os procedimentos variam considera-
velmente de um para outro laboratório. Em sítios onde há trin-
cheiras pequenas, costuma-se enchê-las totalmente antes do co-
brimento; nos sítios com "pits" grandes, os rejeitos são cober-

Operação	Savannah River	Oak Ridge	Los Alamos	Idaho	Hanford
Tamanho da trincheira/Pit (m)	6 largura x 6 profundidade x comprimento variável	3 largura x 3 a 4,5 profundidade x 15 a 120 comprimento	8 a 30 largura x 8 a 11 profundidade x 120 a 180 comprimento	Trincheira: 2 a 3 largura x 4 profundidade x 275 comprimento. Pit: 30 lado x 4 profundidade, comprimento variável	1,5 a 5 largura x 4 a 8 profundidade x comprimento variável
Preparativos para a coleta e contenção da água	nenhum; as trincheiras têm poços de monitoração	trincheira inclinada em uma direção; poço de monitoração	nenhum	nenhum	nenhum
Procedimentos de disposição de rejeitos	colocação aleatória em trincheiras	a trincheira é preenchida até 1 m da superfície	Pits preenchidas em camadas; camada final a 1 m da superfície	trincheiras/Pits preenchidas até 1 m da superfície	trincheira preenchida a partir de uma extremidade
Frequência de cobrimento	coberta após a disposição, para o controle do fogo, da contaminação e da radiação	quando é preenchida a trincheira	os combustíveis são cobertos no dia da entrega; outros controla-se a contaminação e a disposição em camadas	assim que a trincheira/Pit é preenchida	diariamente, após a entrega
Tipo de cobrimento final	terra da escavação até a superfície; amontoada, se necessário	terra escavada, até a superfície; algumas seladas experimentalmente -0,5 m abaixo da superfície; replantada	lama vulcânica escavada é compactada com material pesado	preenchida com solo escavado; replantada	terra de escavação até a superfície; amontoada, se necessário
Profundidade do cobrimento final	cobrimento mín. 1,2 m ou o necessário para reduzir a dose a <6mR/h na superfície	no mínimo a 1 m da superfície do solo	cobertura de lama total escavada de no mín. 1,5m, c/0,5 a 1 m acima do nível do terreno	no mínimo a 1 m da superfície	mín. de 2,5m total, ou aquela necessária para reduzir a dose a <1mR/h na superfície
Outros		um mínimo de 1,5m entre trincheiras	mín. de 4,5m entre pits na superfície; mín. de 15cm de lama moída e compactada no fundo da pit antes de preencher com rejeito	um mínimo de 0,6 m de solo no fundo da trincheira/Pit para sustentar os rejeitos	

TABELA 4 - Operações de enterro nos laboratórios.

tos no dia da disposição, para evitar o fogo e controlar a contaminação. Em INEL, a prensagem reduz o volume de rejeitos combustíveis e precede as operações de cobrimento. Em LASL, os rejeitos contaminados com TRU com níveis abaixo de 10nCi/g são selecionados e depositados em "pits" separadas.

O preenchimento das trincheiras e "pits" é efetuado até 1m, aproximadamente, da superfície, quando então é coberta com a camada impermeável até o nível do terreno e, em casos especiais, amontoadas até 1m acima da superfície. Ao contrário dos estabelecimentos comerciais, não há aplicação de técnicas de bombeamento de água. Planta-se uma cobertura vegetal para controlar a erosão.

Os laboratórios precisam manter um sistema de controle do tipo, quantidade, etc, dos rejeitos enterrados, com uma boa demarcação do local. Um resumo do inventário dos rejeitos dos cinco laboratórios está descrito na Tabela 5 .

2.1.1.2 - Práticas nos Estabelecimentos Comerciais:

Em todos os sítios, a trincheira é usada como estrutura primária de disposição. Na Tabela 6, são descritos os procedimentos e especificações das trincheiras adotadas pelos estabelecimentos comerciais.

As dimensões das trincheiras são similares em todos os estabelecimentos, variando de 60 a 260m de comprimento, 8 a 20m de largura e 5 a 8m de profundidade. Todos os sítios especificam que o nível d'água deve estar abaixo da base das trincheiras.

A cobertura pode ser permanente, no caso da trincheira estar preenchida (terra da escavação) ou pode ser temporária (plástico). Em climas áridos, como em Beatty e Richland, cada "pit" é preenchida com rejeito e, depois coberta com a terra da escavação.

As técnicas usadas para cobrir e impermeabilizar os

TABELA 5 - Resumo dos Rejeitos Enterrados nos Laboratórios (7/75).

Sítio	Curies	Transurânico (g)	Urânio (Kg)	Volume (m ³)
Savannah River	4.410.000	7.000	79.000	279.000
Oak Ridge	< 60.000*	13.000	100	179.000
Los Alamos	160.000	13.000	251.000	225.000
Idaho	3.579.000	361.000	288.000	140.000
Hanford	810.000	365.000	600.000	199.000

* Anotação incompleta porque parte do rejeito foi destruída em um incêndio, estimou-se em <60.000Ci.

TABELA 6 - Operações de Enterro de Rejeitos Comerciais

Operações	West Valley	Morehead	Barnwell	Sheffield	Beatty	Richland
Tamanho (m) da Trincheira	180-210x10x6-8	60-150x24x6-8	140x30x5-7	150x15-18x6-8	260x12-15x8	90x8x6-10,5
Preparativos para coleta e contenção da água	Trincheira inclinada (2%) e no fundo do um cano coletor	Inclinação de 1% no min. no fundo. Pit de 0,6x0,6x0,6 no fundo; tubo coletor; vala de argila ao redor da trincheira.	Campo de drenagem 0,6x0,6m com tubos coletores no centro; inclinação de 1%; mínimo de 1 m de areia no fundo da trincheira.	Inclinações do fundo para um extremo e para uma linha central; vala de 0,6x0,6 com brita; tubo coletor	Desnecessário	Desnecessário
Procedimentos de disposição de rejeitos	Enchimento da trincheira começando em um extremo; preenchido até o nível de grade original no centro.	Emborcação aleatória começando em um extremo; preenchido até 0,6 m da superfície.	Trincheira preenchida até 1 m da superfície	Pacotes dispostos aleatoriamente; preenchidos até 0,6 m da superfície	Toda a trincheira preenchida até 1 m da superfície	Toda a trincheira preenchida até 0,6 m da superfície
Frequência de recobrimento	Diariamente	Diariamente	Diariamente	Diariamente	Quando a trincheira está preenchida	Quando a trincheira está preenchida
Tipo de cobrimento final	Com a terra escavada; compactado; solo adicionado	1 m de argila compactada; amontoado; replantada	0,6 m de argila entre o rejeito e a superfície; amontoado adicional	Cobrimento com argila compactada; sup. replantada	Terra que escavou sem compactação	Terra que escavou sem compactação
Profundidade do cobrimento final	Min. 3 m acima do grade, amontoado de no 1,5 m	Cobertura de 1 m; amontoamento 0,6 m acima do grade	Cob. de 3 m na linha central, 1,5 m nas bordas da trincheira	Cob. final de no min. 1 m; amontoamento	Min. 2 m total; amontoamento 0,6 m acima do grade	Min. 2m total; amontoamento de 1 m acima do grade
Outros	Trincheira é escavada depois de preenchida. Os pacotes devem ser autotantes. Min. de 3 m entre trincheiras na superfície	A trincheira é bombeada até secar seguindo da camada final.	Rej. de diferentes fontes são separados por 2,5 m e min. de 3 m entre trincheiras na superfície	Min. 3 m entre trincheiras na superfície.		

rejeitos em trincheiras, variam com o clima, solo e águas subterrâneas do local.

O solo é amontoado com 1 a 3m acima do nível do terreno, sendo que a linha central do monte deve estar de 1 a 2m mais alta.

Estes requisitos não são usados nos sítios de climas áridos. Nos sítios de climas úmidos costuma-se cobrir com solo impermeável (argila, por exemplo), construir redes de drenagem ao redor das trincheiras e plantar grama sobre o monte.

São anotados dados das quantidades, tipos, peso e volume dos rejeitos enterrados, assim como faz-se a sinalização do local com monumentos ou postes de concreto, contendo todas as informações sobre o depositório, como: número da trincheira, data da abertura e fechamento, localização, volume total de rejeito, radioatividade, conteúdo de nuclídeos mais perigosos, etc. Um inventário dos rejeitos depositados nos sítios comerciais pode ser analisado na Tabela 7 .

O licenciamento destes sítios é efetuado pela NRC (Nuclear Regulatory Commission). O contrato de licenciamento contém várias condições, podendo incluir casos especiais sob restrições especiais.

Este contrato, todavia, tem caráter temporário, e a sua renovação exige o cumprimento de certas obrigações contratuais que normalmente são difíceis de se obter, devido à frequente reformulação dos critérios e leis federais.

2.1.2. Características Geohidrológicas dos Sítios de Disposição de Rejeitos dos EUA.

2.1.2.1 - Os Sítios dos Laboratórios:

Os solos de disposição dos cinco maiores laboratórios da ERDA, localizam-se dentro dos limites de seus respectivos laboratórios. Estes sítios foram selecionados, originalmen

TABELA 7 - Inventário dos Rejeitos dos Sítios Comerciais

Sítio	Rejeito Subproduto (Curies, não decaídos)	Materiais Nucleares Especiais a) (Gramas) b)	Material Fonte (Kg) b)	Volume total de Rejeitos (Metros ³)
West Valley	380.000	49.000	386.000	55.500
Morehead	1.500.000	327.000	58.900	95.000
Barnwell	121.000	198.000	67.000	23.000
Sheffield	29.500	34.000	27.000	29.000
Beatty	85.500	635.000	24.300	40.900
Richland	190.000	1.700	5.000	15.500
Total de todos os sítios	2.306.000	1.244.700	568.200	258.900

a) Inclui aproximadamente 80Kg de ²³⁹Pu.

b) Peso dos radionuclídeos no rejeito.

te, devido às suas distâncias a centros populacionais.

Os solos de disposição estão situados nas áreas mais distantes dos laboratórios, fornecendo um isolamento físico considerável.

Os sítios, inicialmente, não foram selecionados com base em determinações geohidrológicas detalhadas.

Os locais eram escolhidos, de acordo com o que parece oferecer uma maior habilidade para conter rejeitos.

Nos últimos anos, foram negociados vários acordos com o "U.S. Geological Survey" para acompanhar as investigações de sítios.

Atualmente, todos os sítios da ERDA empregam geólogos e hidrólogos especializados, para ajudar nas investigações. A Tabela 8 apresenta um resumo das características gerais dos sítios do ERDA.

2.1.2.2 - Os Sítios dos Estabelecimentos Comerciais:

A localização dos solos de disposição baseou-se em exigências estatais. A seleção do sítio abrangeu o exame de vários sítios candidatos, cabendo a decisão final a fatores geohidrológicos e econômicos.

Como veremos, a análise geohidrológica é uma parte essencial dos procedimentos de licenciamento de um sítio. Esta análise fornece uma estimativa, antes do uso do solo, do grau com que as águas entrarão em contacto com o rejeito, dos caminhos que estas águas percorrerão após passarem pelo depósito, da capacidade de absorção ou troca-iônica dos materiais ao longo deste percurso, e da extensão com que as águas de fora dos limites do sítio serão afetadas pela presença deste, em relação ao conteúdo de radionuclídeos.

Algumas das características mais importantes dos seis estabelecimentos comerciais, em relação as suas capacida-

TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DOS LABORATÓRIOS DOS E.U.A.

	Savannah River	Oak Ridge (ORNL)	Los Alamos (LASL)	Idaho (INEL)	Hanford
Precipitação média Anual (mm)	1200	1360	450	200	163
Temperatura Média Anual (OC)	18	14,4	9	6	- 1 a 24°
Nível d'Água (m)	6 a 18	1,5 a 10	274 a 305	175	4 a 25 e 60 a 70
Solo Superficial	Areia e Argila Arenosa	Folhelho Intemperizado e Aterro	Tufo Vulcânico Intemperizado	Areia de Aluvião com Silte e Argila	Depósito Flúvio-Glacial de Argila, Areia e Pedregulho
Espessura de Solo (m)	0 a 10	1,2 a 12	0 a 2	1 a 8	6 a > 70
Distância ao Rio mais Próximo (km)	0,8 (no sítio)	No Sítio	1	3,2	10
Velocidade da Água Subterrânea cm/d	3,3	5 a 74 e 0 a 750	32,87	822	31,3
População num Raio de 80Km do Sítio	---	---	< 200.000	80.000	250.000
Velocidade de Recarga do Lençol cm/a	200	4.380	< 1,2	---	< 0,5
Capacidade de Troca-Iônica (meq/100g)	Moderada 16	Alta	Alta 18 a 23	Moderada	Moderada 6
Rocha Suporte	Metamórficas e Sedimentares	Folhelho	Tufo Vulcânico	Lava Basáltica	Lava Basáltica
Passagens do Fluxo para fora do sítio	Poros na Areia	Fraturas dos Folhelhos e Poros no Aterro	Fraturas; Poros na Areia	Poros na Areia	Através de Poros na Areia
Clima	Úmido	Úmido	Árido	Árido	Árido

des de contenção de rejeitos, estão descritas na Tabela 9 .

Os valores fornecidos por esta tabela são estimados de um conjunto de valores ou valores médios aproximados. Alguns variam de ponto a ponto, sazonal ou anualmente. Os dados de permeabilidade baseiam-se em um número limitado de análises, geralmente de amostras deformadas obtidas em poços de amostragem.

O solo tende a ser anisotrópico e heterogêneo. O enterro de rejeitos sólidos é feito a baixas profundidades, na zona de transição entre o solo e a rocha matriz. A incerteza dos dados desta região reflete uma falta de estudos específicos da zona de transição.

Todas as trincheiras ou "pits" escavados nos sítios têm profundidades de 15m ou menos.

Nas regiões onde o nível d'água se encontra a baixas profundidades, os rejeitos são molhados pelo menos por algum tempo. Nas regiões onde a zona saturada ultrapassa os 50m de profundidade, os rejeitos raramente são atingidos pela água.

A capacidade de absorção dos materiais dos solos dos sítios é difícil de se estimar quantitativamente em virtude da falta de dados. Esta capacidade varia de um solo para outro, sendo que as argilas, comumente, apresentam uma alta capacidade de absorção, os siltes, uma capacidade moderada, e as areias uma baixa capacidade de absorção.

Baseando-se neste princípio e em algumas medidas, foram estimadas as capacidades de absorção da Tabela 9 .

2.1.3. Problemas Gerados nos Sítios de Disposição de Rejeitos dos EUA.

Os dados aqui expostos são os resultados de um programa intensivo de cinco anos, iniciado em 1975 pelo "U.S. Geological Survey" para fornecer linhas básicas para a seleção e gerenciamento de futuros sítios de disposição sob o solo, a serem instalados nos EUA.

	West Valley	Morehead ou Maxey Flats	Barnwell	Sheffield	Beatty	Richland
Precipitação média anual (mm)	1.016	1.170	1.200	890	100	160
Temperatura média anual (°C)	7	13	18	10,5	19	12,5
Nível da água (m)	0 a 7	10 a 15	10 a 20	5 a 20	80 a 90	100
solo superficial	Till Glacial; argila siltozada; argila areia	Folhelho intemperizado; argila areia	areia, argila argilosa, siltes e argilas não consolidadas	Loess e depósitos glaciais intemperizados; areia, argila, silte e pedregulho	Sedimentos aluvionais (areia e pedregulho) e lacustres não consolidados.	Argila, areia e pedregulho
Espessura do solo (m)	0 a 170	3 a 5	0 a 10	20 a 30	> 175	> 150
Distância ao corpo de água mais próximo (m)	500 (no sítio)	500	1,7 Km	no sítio	3 Km	10 Km
Permeabilidade (cm/d)	0,5			0,04 a 40	0,02 a 0,1	variável
Rocha suporte	Folhelho	Folhelho	argila, argila e arenito da formação Tossaloosa	Folhelho, argilito, arenito e carvão	metamórfica e sedimentar	Lava basáltica
Capacidade de absorção ou troca-iônica	alta	alta	moderada (16 meq/100g)	baixa (15 meq/100g)	moderada	moderada
Passagens Principais do fluxo para fora do sítio	Fraturas no folhelho e lentes de intemperismo glacial	Fraturas no folhelho	Poros das areias	Poros de Tills (pedregulhos)	Fluxo aerado pelos poros	Fluxo aerado através dos poros
Clima	Úmido	Úmido	Úmido	Úmido	Árido	Árido (ameno e seco)

TABELA 9 - Características Geohidrológicas dos Estabelecimentos Comerciais dos EUA.

2.1.3.1 - Problemas nos Laboratórios:

Hanford: Os rejeitos depositados em Hanford podem ser esquematizados como na Figura 14. Estes são depositados em sedimentos flúvio-glaciais não saturados e não consolidados, cuja espessura varia de 6 a mais de 60m. O nível d'água situa-se entre 4 e 25m em um clima árido caracterizado pela baixa pluviometria e grandes variações de temperatura.

Alguns estudos de reconhecimento concluíram que, mesmo com uma precipitação de 163mm, pode ter infiltrado uma quantidade significativa da precipitação. Estes estudos indicaram que havia alguns radionuclídeos presentes na água subterrânea, abaixo e à jusante do solo de disposição de rejeitos sólidos.

Contudo, a disposição concomitante de rejeitos líquidos diretamente no solo, contribuiu para mascarar os resultados.

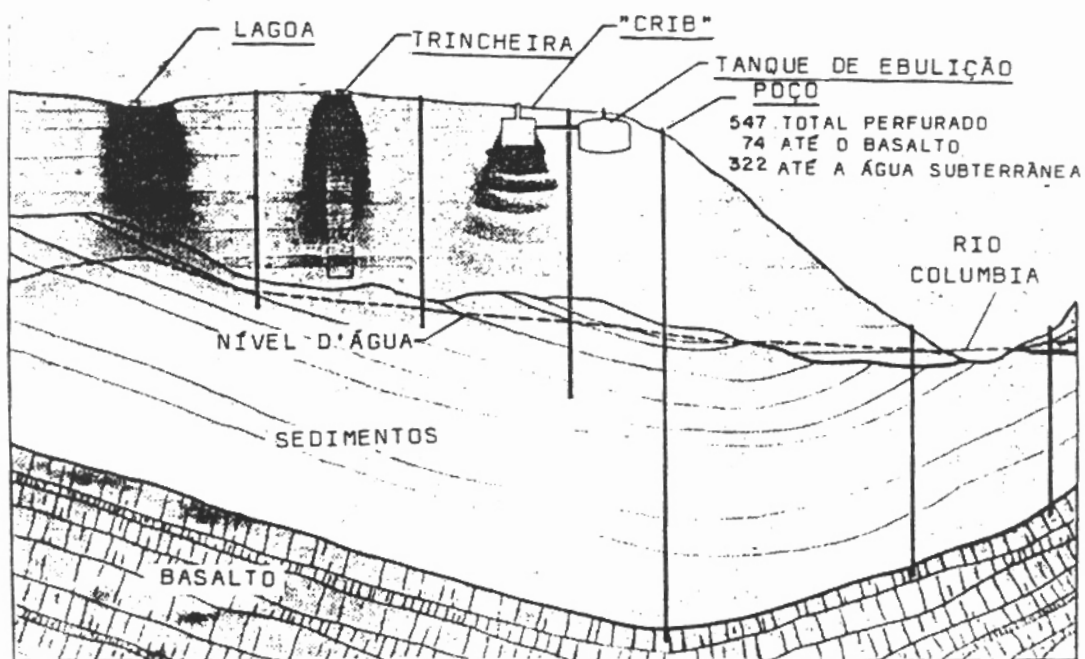
Houve falhas ocasionais do cobrimento (campeamento) das trincheiras e início de alguns sinistros nos rejeitos expostos.

Aparentemente, os problemas a longo prazo serão gerados pela probabilidade de sucção por raízes profundas e intrusão de pequenos animais.

Los Alamos Scientific Laboratory (LASL)

Este laboratório situa-se a 2100m de altitude e suas trincheiras são escavadas em tufos vulcânicos de permeabilidades desuniformes através de fraturas. Apresenta um clima árido de 450mm de precipitação e temperatura média de 9°C. O nível d'água situa-se entre 274 e 305m de profundidade.

Neste caso, o Trítio foi o radionuclídeo que gerou maior contaminação, até agora. Ele migrou 32m lateralmente, e mais do que isto verticalmente, nestes cinco anos.



SECÇÃO ESQUEMÁTICA DO SÍTIO DE HANFORD
MOSTRANDO AS PRÁTICAS DE DISPOSIÇÃO

Fig.14- Disposição de Rejeitos em Hanford

Algumas abelhas encontradas nas imediações apresentaram uma concentração de Trítio 230 vezes maior do que a despejada.

O Plutônio migrou 8m através do tufo intemperizado.

Idaho National Engineering Laboratory (INEL)

O solo de INEL é constituído por sedimentos como areia, silte e argila não consolidados, com uma espessura variando de 1 a 8m. Estes sedimentos estão acima de camadas de basalto intercaladas com sedimentos com mais de 220m de espessura. O nível d'água do aquífero do Rio Snake está a mais de 175m de profundidade.

O clima de INEL é árido, como os anteriores, e apresenta precipitações de 200mm anuais e uma temperatura média anual em torno de 6°C.

Embora o clima seja árido, o sítio já foi inundado pelo menos duas vezes, em cinco anos, provocando infiltração de água nas trincheiras.

Foram encontrados ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{241}Am e $^{234,238,240}\text{Pu}$ em amostras coletadas a mais de 80m do solo onde foram enterrados os rejeitos sólidos. Algumas "pits" antigas situadas sobre o material sedimentar, tiveram escapes de ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{241}Am , com migração até 2 a 3m, embora a maioria destes não tenha ultrapassado os primeiros 60cm.

Os estudos de migração de Plutônio neste sítio são muito importantes, porque ele contém a maior parte (370 kg) do Plutônio depositado no solo dos EUA. (Figura 1)

As análises feitas até agora (1980) não constatarem a presença de nuclídeos no aquífero do Rio Snake.

Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

O sítio de ORNL está situado sobre quatro formações

geológicas principais, todas com inclinações pronunciadas. Duas são de calcáreo, uma arenito e a outra um folhelho com calcáreo, com uma capacidade de troca-iônica apreciável (9,6 meq/100g). O calcáreo é uma formação heterogênea, com muitas cavernas e bastante fissurada, enquanto que o arenito tem permeabilidade e porosidade baixas. A quarta formação, o folhelho Conasauga, é mais homogênea que as outras, mas é complexa e tem camadas esparsas de calcáreo, que causam variações na direção e magnitude da água subterrânea.

Além da anisotropia geológica, ORNL está situado em um clima úmido, com uma precipitação média anual de 1360mm e uma temperatura média de 14.4°C no ano. O nível d'água situa-se a baixa profundidade (0 a 12m) e a distância entre os rios superficiais é pequena.

Com isto, algumas trincheiras tendem a acumular água, fazendo elevar o nível d'água e submergir os rejeitos enterrados.

Foram detectadas nuvens de traçador na água subterrânea, a mais de 100m das trincheiras. Demonstrou-se o transporte de alguns isótopos, como o ^{60}Co , por agentes orgânicos complexos das "pits".

Houve erosão em algumas trincheiras, fazendo com que parte dos rejeitos ficasse exposta.

As trincheiras contribuem para a maioria do ^{90}Sr e ^3H transportados ao Rio Clinch.

2.1.3.2 - Problemas nos Sítios Comerciais:

Maxey Flats ou Morehed: Maxey Flats está localizada sobre folhelhos Paleozóicos e arenitos Mesozóicos e as trincheiras são escavadas no folhelho intemperizado.

O clima é úmido, 1170mm por ano, e a temperatura média anual varia em torno de 13°C.

Assim como em ORNL, a água subterrânea tende a se acumular nas trincheiras já preenchidas com rejeito.

Foram detectados ⁹⁰Co, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H e Plutônio na água subterrânea e em amostras de sedimentos tirados próximo às trincheiras.

Detectou-se um nível de Trítio elevado nas vacas da redondeza.

West Valley: Está localizado sobre um till glacial de espessura variável entre 0 e 170m em um clima úmido de precipitação média anual de 1016mm e uma temperatura média anual de 7°C.

Houve acumulações de água nas trincheiras, com transbordamento e espalhamento de contaminantes. Mais recentemente a água foi bombeada e tratada.

Estudos indicam que houve uma migração lateral de ⁹⁰Co, ¹³⁷Cs e ³H até alguns metros da trincheira.

Análises feitas na base das trincheiras mostraram uma migração de Trítio a mais de 2,5m ⁹⁰ verticalmente, enquanto que o Césio parece ter sido absorvido nos primeiros 10cm.

Barnwell: é o único sítio comercial operando no Leste dos EUA onde mais de 80% dos rejeitos daquele país são gerados. Está assentado sobre uma camada espessa de sedimentos não consolidados de areias, siltes e argilas. O nível d'água situa-se a 11m da superfície. O clima é úmido, precipitação de 1190mm e temperatura média de 18°C.

Aparentemente, não houve detecção de nuclídeos na água subterrânea, embora algumas amostras tenham mostrado uma migração lateral de pelo menos alguns metros da trincheira, de Trítio e de Carbono orgânico dissolvido.

Sheffield: Está situada sobre depósitos glaciais de argila, silte, areia e pedregulho de 3 a 15m de espessura sobre uma camada de folhelho consolidado da era Paleozóica.

O clima está entre úmido e semi-úmido, com uma precipitação média anual de 850mm e uma temperatura média anual de 10,5°C. O nível d'água está entre 1 e 15m .

Foram feitos alguns poços de monitoração em túneis de monitoração, construídos com 88m de comprimento e 2m de diâmetro. Estes poços demonstraram a presença de ^{60}Co e uma atividade elevada de Trítio ^{90}T a 3m do solo de uma das trincheiras.

Beatty: Foi o primeiro sítio comercial aberto nos EUA, em 1962, no deserto de Amargosa. Esta região desolada possui uma precipitação de 100mm anuais e uma temperatura média de 19°C, em todo o ano. Este sítio está localizado acima de sedimentos lacustres e aluvionais não consolidados, com espessura de até 175m. O nível d'água está a mais de 90m de profundidade.

Não houve detecção de migrações, mas poderia haver uma difusão do vapor de Trítio.

Alguns problemas ocorridos por uso de equipamentos contaminados fez com que o sítio ficasse fechado para verificação de contaminações decorrentes, que não aconteceram.

2.1.3.3 - Conclusões:

Os estudos realizados indicam nitidamente uma predominância de migrações em sítios de climas úmidos, onde a profundidade da zona saturada situa-se entre os primeiros 30m.

O Trítio parece ter sido o contaminante mais importante considerando o movimento de migrantes, uma vez que o ^{137}Cs e o ^{90}Sr foram retidos parcialmente pelas propriedades de troca dos solos. Alguns migrantes têm sido levados por complexos orgânicos como os ácidos acético, propiônico, isobutírico, butírico e valérico, variando de pH entre 74 3,7 e 8,5.

Foram observadas as seguintes características similares a todos os sítios de clima úmido:

- Todos os sítios recebem uma precipitação média anual acima de 1000mm, sendo esta a principal fonte de recarga ao sistema geohidrológico do sítio;

- O solo de disposição de todos estes sítios tem , em geral, uma permeabilidade muito baixa que provoca a infiltração da água através do cobrimento das trincheiras até que esta transborde. O solo impermeável não permite que a água que entra, escoe através da zona aerada do fundo ou da lateral, resultando em acumulação da água da chuva;

- A migração de contaminantes apresenta similaridades em todos os sítios elas envolvem (1) escoamento superficial; (2) migração lateral através da zona aerada; e (3) migração subterrânea através de juntas, fraturas e lentes de areia;

- A alta capacidade potencial de troca-iônica do meio associada a sua formação geológica pode ser facilmente sobrepassada porque a maior parte das migrações acontece fora das trincheiras, promovendo um "curto-circuito" através de um dos caminhos descritos acima. Este tipo de contaminação parece mais provável do que o fluxo intergranular através dos sedimentos finos de alta capacidade de troca-iônica;

- A distância das trincheiras ao ponto de descarga mais próximo através de fluxos laterais é de 15m ou menos, ao passo que a distância ao caminho de migração subterrânea é de 30 a 150m.

- As operações de disposição alteraram consideravelmente as características geohidrológicas originais dos sítios: O fato de escavar trincheiras, enchê-las com material de alta porosidade e cobri-las com um campeamento relativamente permeável de terra, pode resultar em uma infiltração maior do que em

condições normais.

As condições apresentadas até agora, levam a crer que os sítios de disposição, originalmente, careceram de uma investigação geohidrológica detalhada, o que motivou o fechamento¹⁰⁰ de West Valley, em 1975, de Maxey Flats, em 1977 e de Sheffield, em 1978. Em outubro de 1979 foram fechadas Richland e Beatty, sendo reduzido o volume de rejeitos aceitos por Barnwell, até 1981.

Estes acontecimentos promoveram uma série de modificações nas leis federais dos EUA, e foi designado um comitê para a reavaliação das condições geohidrológicas dos sítios, com técnicos especializados. Foi proposto à NRC, um estudo detalhado do licenciamento de locais para a disposição de rejeitos de baixo nível de atividade, levando em conta os impactos ambientais.

Os primeiros estudos permitiram a reabertura¹⁰⁰⁾ de Beatty, em dezembro de 1979, e o cancelamento da redução de rejeitos em Barnwell, em novembro do mesmo ano.

A NRC publicou³⁵⁾ o seu estudo final em novembro de 1982 através do artigo 10CFR parte 61, discutido amplamente no capítulo seguinte.

2.2. Inglaterra:

No centro de pesquisas de Harwell e AERE, os rejeitos líquidos de baixa atividade sofrem um tratamento intenso e são liberados⁴⁰⁾ no Rio Tâmsa, sob limites rigorosos. Os rejeitos líquidos de atividade média são solidificados, vedados em tambores e, após um certo decaimento, lançados ao mar (vide Figura 12).

Os rejeitos sólidos sofrem uma seleção prévia nos laboratórios, dividindo-os em possivelmente ativos e provavelmente ativos. Os sólidos de baixa atividade são prensados em

tambores de aço e depositados no mar. Os rejeitos sólidos de média e alta atividade são colocados em trincheiras de concreto (Figura 8) impermeabilizadas com asfalto e cobertas com tampas de concreto removíveis. Há, também, a disposição em poços selados revestidos com aço e selados com tampas de concreto ou chumbo (Figura 10).

As disposições de Windscale e UKAEA, situam-se⁷²⁾ próximas à vila Drigg, onde são despejados os rejeitos gerados pelas indústrias químicas de reprocessamento. A área de disposição totaliza 250 acres, sendo 50 para as operações de disposição em trincheiras.

A maioria dos sólidos é despejada em trincheiras (Figuras 5, 6, 7) cobertas com uma camada impermeável de argila, e não devem chegar a menos de 1m da superfície.

Os rejeitos líquidos de baixa atividade seguem uma tubulação, após o tratamento, que descarrega no mar.

2.3. Canadá:

A área de grande interesse sob o ponto de vista de disposição de rejeitos situa-se à beira do Rio Ottawa, e é chamada Chalk River Plant (CRP). O solo de disposição⁴⁷⁾ é predominantemente arenoso (2meq/100g), com uma pequena fração (10%) de argila (26meq/100g), constituindo um solo de baixa capacidade de troca-iônica.

As disposições sob o solo são favorecidas pelo isolamento do sítio e pelo grande fator de diluição do rio ($10^5:1$), (Figura 15).

Os rejeitos líquidos de baixa atividade são tratados e dispersos no Rio Ottawa, diluídos em um grande volume de água ($100\text{m}^3/\text{min}$).

Os rejeitos líquidos de atividade intermediária, são descarregados em "pits", de percolação (Figura 3). Os exceden

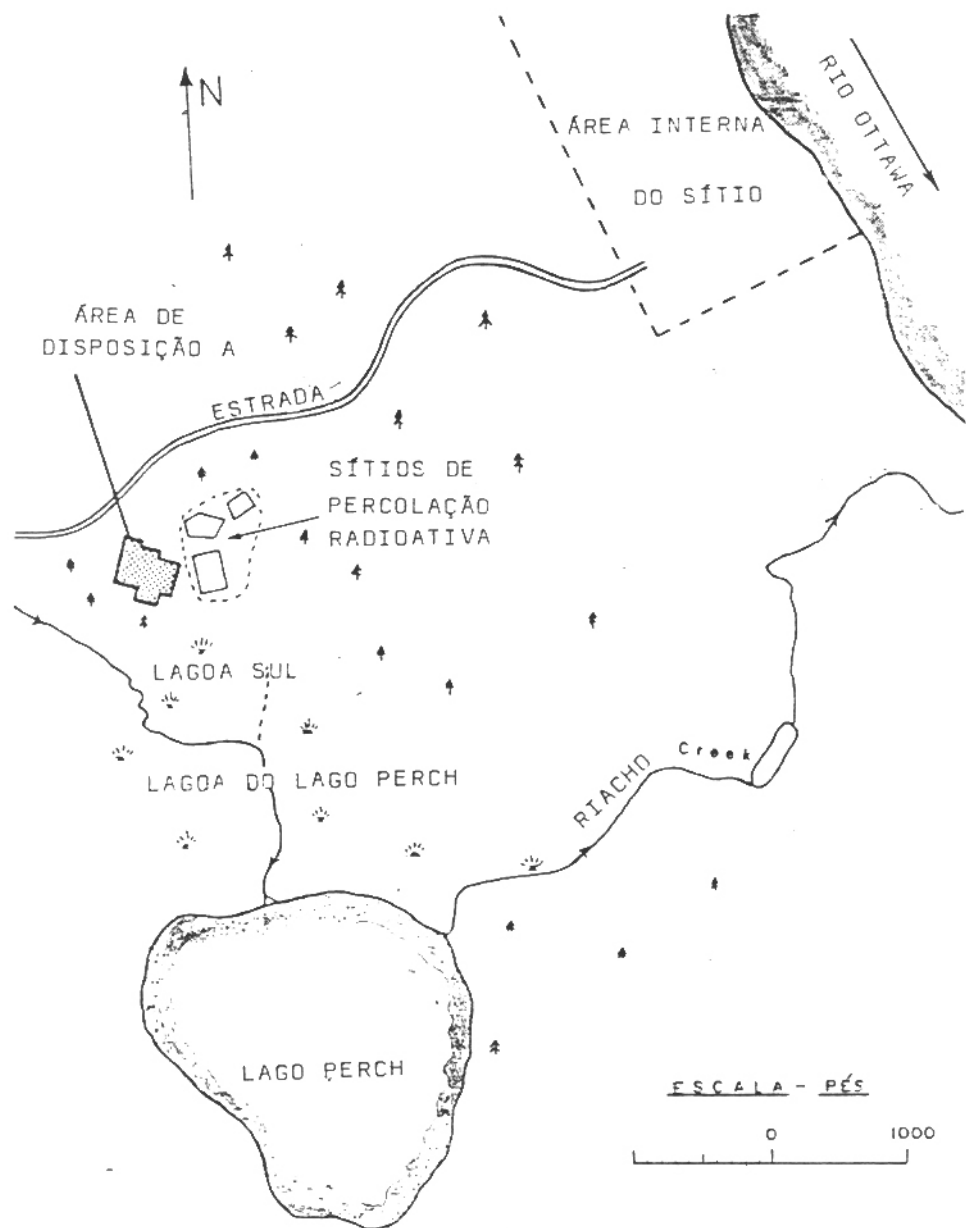


Fig.15- Área de Disposição em Chalk River

tes dos rejeitos, principalmente os de efluentes químicos, são liberados em "pits" químicas.

Os rejeitos sólidos eram todos enterrados devido ao alto custo da incineração e à grande disponibilidade de terra. O solo, neste local, constitui-se de uma camada de areia fina de 4m de espessura, que cobre alternadamente rochas glaciais (till) e graníticas. O nível d'água varia de 7 a 10m de profundidade, abaixo do depositório.

Os rejeitos sólidos de baixa atividade, aqueles com alguns microcuries por pacote, são ensacados em papelão ou plástico cobertos com areia e compactados em trincheiras ³⁾ de 300m de comprimento, 5m de largura e 3,5m de profundidade.

Os rejeitos sólidos de atividades maiores ⁵¹⁾ (média a alta), são estaqueados em monolitos de concreto (Figura 9).

Os rejeitos sólidos e líquidos migram em direção ao Lago Perch, e deste, pelo Rio Perch, até o Rio Ottawa (Figura 15).

2.4. Alemanha:

A maioria dos rejeitos da Alemanha são estocados em galerias ⁴⁹⁾ artificiais construídas para exploração de Sal na cidade de Asse. Estas galerias recebem uma impermeabilização no piso, onde são estocados os tambores contendo rejeitos de baixa atividade, armazenados em pilhas, em locais amplos denominados quartos de estocagem (Figura 11).

Os rejeitos de média atividade são conduzidos através de um cabo até o fundo de uma câmara de estocagem hermeticamente fechada, que possui janelas de chumbo e câmeras de televisão para controlar as operações de estocagem (Figura 11).

2.5. Outros Países

Muitos outros países adotam as mesmas soluções para dispor seus rejeitos radioativos, como a França, onde os rejeitos sólidos de baixo nível de Saclay são prensados em tambores e estes estaqueados em monolitos de concreto (Figura 9); a Tcheco-Eslováquia, que dispõe em galerias de Sal, em corredores de 30m de comprimento, 2m de largura e 2m de altura, em câmaras de 8x5x3m; no Japão, onde os rejeitos não combustíveis são estocados em trincheiras de concreto e na Austrália, no laboratório de Lucas Heights, onde os rejeitos são colocados em poços de 1m de diâmetro, e 3m de profundidade.

No Brasil, devem ser projetados locais para a disposição de rejeitos de baixa a média atividade, a médio prazo, uma vez que algumas indústrias do Ciclo do Combustível entrarão em funcionamento nos próximos anos.

Portanto, para que o Brasil possa gerenciar seus rejeitos de baixo nível de atividade, é necessário um amplo projeto de pesquisas para desenvolver critérios de seleção e avaliação de locais sem que haja risco de haver contaminação inaceitável do meio ambiente e do homem.

C A P Í T U L O I I I

III - SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RÁDIOATIVOS.

A indústria nuclear ressentia-se de não dispor de uma normalização dos critérios de seleção de sítios desde a década de cinquenta, tendo de desenvolver um campo de pesquisas específico nesta área, cujos gastos e resultados provenientes nem sempre resultaram em seleções satisfatórias, como vimos no capítulo anterior.

Baseando-se na necessidade de regulamentações, tanto por exigência dos produtores de rejeitos e dispositores, quanto pela opinião pública, as agências de proteção radiológica iniciaram um amplo campo de pesquisas nesta área, desde 1972, pela EPA⁷³⁾, juntando os seus resultados aos das experiências anteriores. Desde então a base de dados teve um desenvolvimento de 2000 a 5000 por cento. Várias foram as agências que desenvolveram critérios para o selecionamento de sítios, destacando-se a Environmental Protection Agency (EPA (SSC)⁸³⁾, United States Atomic Energy Commission (USAEC)²¹⁾, United States Geological Survey (USGS)³¹⁾, Western Federal Region Council (FEDERAL REGION IX)³⁰⁾, e mais recentemente a International Atomic Energy Agency (IAEA)⁵⁴⁾ e Nuclear Regulatory Commission (RNC)⁷⁸⁾.

1 - Critérios de Seleção de Sítios para a Disposição de Rejeitos:

Independentemente da Indústria Nuclear, que se responsabilize pela escolha de um local adequado para a disposição de seus rejeitos de baixa atividade próximos à superfície,

ela provavelmente utilizará um processo de seleção de sítio bem estruturado, guiado por determinados critérios de seleção de sítios.

Cada processo de seleção de sítio utilizado por um ou outro produtor de rejeitos poderá variar consideravelmente devido à ampla variedade de fatores como, a distribuição geográfica dos produtores; os parâmetros geológicos, hidrológicos, meteorológicos, climáticos, ecológicos, e sócio-econômicos. Contudo, os processos de seleção de sítio, seguidos em diferentes aplicações, dividirão os mesmos princípios básicos.

Estes princípios foram analisados pelas agências citadas acima, sendo que suas concordâncias e discrepâncias podem ser visualizadas pela Figura 16.

Em termos gerais, a ótima concordância entre os critérios de seleção da IAEA e NRC Part. 61, a revisão e atualização destas agências (1981 e 1982, ⁽³⁵⁾ respectivamente) e o fato dos seus critérios estarem baseados nas diversas publicações da EPA, justificam a escolha das agências IAEA e NRC para fundamentarem os critérios de seleção e de avaliação que analisarei daqui por diante.

Apesar dos inúmeros critérios de seleção e avaliação que devem ser examinados, prevalece como objetivo maior deste exame o de assegurar que o local, suas operações e possíveis acidentes, não provoquem contaminações, atuais ou futuras, que ultrapassem os limites máximos permissíveis ⁵⁸⁾ determinados para a segurança e saúde do homem e de seu meio ambiente.

O NRC estabelece ⁷⁶⁾ como objetivos de operação o seguinte:

- 1) proteger a saúde e segurança do público, trabalhadores e do ambiente, durante um longo período (300 a 500 anos);
- 2) proteger o intruso inadvertido em potencial, no projeto e nas operações de um depositório, incluindo barreiras

FIG 16 NUREC/ CP-0028 U1P31-54 - COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE DIFERENTES AGÊNCIAS, 1960-1981

Nº	CRITÉRIO	ORIGEM	EPA SSC 1974	NRC P.61 1981	USGS 1974	IAEA 1981	EPA RWC 1978	FED REGQ 1978	AEC 1960
1	As características naturais do sítio devem evitar o movimento de contaminantes a lugares onde afete o homem	EPA SSC	C	C	C	C	C	C	C
2	O sítio deve ter um sistema hidrogeológico simples	EPA SSC	C	C	C	C	-	C	-
3	O sítio não deve ter água superficial e áreas inundáveis	EPA SSC	C	C	C	C	-	C	C
4	A área de aterro não deve estar em rocha fraturada e deve estar separada da rocha se fraturada (implantação em permeabilidade intergranular)	EPA SSC	C	C ₁	C	C	-	C	e
5	O movimento dos contaminantes na zona aerada deve ser lento (décadas de espera)	EPA SSC	C	C ₁	C	C	-	C ₁	C
6	A disposição deve estar a vários metros do lençol ou	EPA SSC	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	-	C ₁	C ₁
7	A zona de disposição pode estar abaixo do nível d'água se as condições hidrogeológicas forem favoráveis	EPA SSC	C	C	C	C	-	e ⁽¹⁾	C
8	O sistema hidrogeológico deve ser previsível (apto à modelagem)	EPA SSC	C	C	C	C	C	C	-
9	O sítio pode ser monitorado	EPA SSC	C	C	C	C	C ₁	C	-
10	Geomorfologia estável, e baixa erosão e sua probabilidade	EPA SSC	C	C	C	C	-	C	C
11	O sistema subterrâneo deve ser conhecido (distribuição tridimensional, etc)	EPA SSC	C	C ₁	C	C	C ₁	C	-

Nº	CRITÉRIO	ORIGEM	EPA SSC 1974	NRC P.61 1981	USGS 1974	IAEA 1981	EPA RWC 1978	FED REG. 1978	AEC 1960
12	Não deve haver fluxo de água subterrânea a áreas indesejáveis (captação de águas, rocha fraturada).	EPA SSC	C	C	C	C	C	C	C
13	Os contaminantes devem ficar retidos dentro do sítio por centenas de anos	EPA SSC	C	C	C	C	-	C	-
14	É indesejável grandes flutuações do nível d'água	EPA SSC	C	C	C	C	-	e ⁽¹⁾	-
15	Devem ser conhecidos os parâmetros do sistema hidrogeológico regional de fluxo	EPA SSC	C	C	C	C	C _i	C	-
16	As predições de performance do sítio devem incluir modelagem matemática simulada	EPA SSC	C	C	C	C	C	C	-
17	É desejável a possibilidade de tomar ações remediadoras	EPA SSC	C	C _i	C	C	-	C	-
18	O contacto entre o rejeito e a água deve ser minimizado	EPA SSC	C	C	C	C	-	C	-
19	A zona limite deve ser 20 a 50% maior que o movimento estimado para os contaminantes (para a segurança e expansão do sítio)	EPA SSC	C	e	C	C	-	C	C
20	O sítio não deve localizar-se em zonas inundáveis ou sujeitas à inundação por um tempo de recorrência de 100 anos	NRC P.61	C _i	C	C _i	C	-	C	-
21	A descarga da água subterrânea na superfície do sítio não deve originar-se do local de disposição	NRC P.61	-	C	-	-	-	-	-
22	Devem ser evitadas áreas sujeitas a processos tectônicos destrutivos	NRC P.61	C _i	C	C _i	C	-	C _i	-

Nº	CRITÉRIO	ORIGEM	EPA SSC 1974	NRC P.61 1981	USGS 1974	IAEA 1981	EPA RWC 1978	FED REG.9 1978	AET 1960
23	Deve ser determinada a capacidade de retenção do sítio para radionuclídeos específicos	IAEA 1981	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C ₁	-
24	O processo de seleção do sítio está sujeito à aceitação através de um processo que revisa o potencial de impacto ambiental	IAEA 1981	C	C	C	C	C	C	-
25	Pode-se considerar o uso de barreiras de engenharia para compensar a falta de algumas barreiras naturais do sítio	IAEA 1981	C	C	C	C	C	C	C
26	Não se confia em controles institucionais de engenharia que requerem manutenção pelo homem por mais de cem anos	EPA RWC	-	C	-	-	C	-	-
27	As condições hidrogeológicas devem aumentar o isolamento dos rejeitos no tempo	EPA RWC	-	-	-	-	C	-	-
28	Os elementos hidrogeológicos, ecológicos, uso da terra e sócio-econômicos do sítio devem ser considerados	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	C ₁	C	-
29	Não pode haver pontos de uso de água próximos ao sítio	AEC	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	-	C ₁	C
30	Roche predominantemente xistosa é desejável; quanto mais espessa melhor	AEC	e	e	e	e	-	e	C
31	Rígido (solo) argiloso ou predominantemente argiloso, de pelo menos 20m de espessura é desejável	AEC	e ⁽³⁾	e ⁽³⁾	e ⁽³⁾	e ⁽³⁾	-	e ⁽³⁾	C
32	A água subterrânea do sítio deve estar hidráulicamente isolada do terreno vizinho	AEC	-	-	-	-	-	-	C
33	Clima suave e precipitação moderada são desejáveis	AEC	-	-	-	-	-	-	C
CRITÉRIOS E FATORES ECOLÓGICOS /BIOLÓGICOS									
34	Deve ser previsível o impacto biológico total de um dia do sítio	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C	-

Nº	CRITÉRIO	ORIGEM	EPA SSC 1974	NRC P.61 1981	USGS 1974	IAEA 1981	EPA RWC 1978	FED REG.9 1978	AEC 1960
35	Devem ser determinados os efeitos potenciais em cada fator ou elemento ecológico causados pelas atividades de disposição, deslocamento e proteção do sítio	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C	-
36	Devem ser determinadas relações ecológicas, comunidades biológicas e grupos críticos de população	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C	-
37	As mudanças significativas das relações acima devem ser analisadas	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C	-
38	Fatores críticos à contenção e deslocamento de rejeitos devem ser analisados (plantas, animais etc)	FED REG.9	C ₁	C ₁	C ₁	C	-	C	-
CRITÉRIOS E FATORES RELACIONADOS AO USO DA TERRA E STATUS									
39	Gerenciamento das fontes de suprimento de água	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	C
40	Operações de mineração e pedidos para aproveitamento da terra	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
41	Permissões e facilidades	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
42	Recreação ao ar livre	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
43	Áreas de interesse especial ou especialmente projetadas	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
44	Zoneamento estadual e regional, e planos de uso da terra	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
45	Atividades e usos na agricultura	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-

Nº	CRITÉRIO	ORIGEM	EPA SSC 1974	NRC P.61 1981	USGS 1974	IAEA 1981	EPA RWC 1978	FED REG.9 1978	AEC 1980
<u>FAITORES E CRITÉRIOS SOCIO-ECONÔMICOS</u>									
46	Proximidade do sítio aos produtores de rejeitos	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
47	Adequabilidade dos sistemas de transporte e infra-estruturas	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	C
48	Comprometimento da terra pelos rejeitos resultando em perda econômica e intrusão do homem na previsão de recursos exploráveis	FED REG.9	-	C	-	C	C	C	-
49	Desejo de uma baixa densidade populacional	FED REG.9	C	C	C	C	-	C	C
50	A terra deve pertencer ao Estado ou à Nação	FED REG.9	-	C	-	C	-	C	C
51	Impacto na comunidade e nos empregos	FED REG.9	-	C	-	C	C	C	-
52	Constrangimento político e institucional (incluindo aceitação do público)	FED REG.9	-	-	-	C	-	C	-
53	Os valores da terra devem ser baixos e não deve rebaixar o valor de terras vizinhas	AEC	-	C ₁	-	C ₁	-	-	C ₁
LEGENDA: C sim, inclui C₁ sim, implica que - não fala sobre o assunto e área de mudança significativa, ou desacordo (1) não necessária/porque há disponibilidade de áreas grandes com lençol freático profundo (2) não existia este requisito para o E.I.S. (3) não, a não ser que o sítio e a trincheira recebam tratamento de engenharia amplo ou que o rejeito seja acondicionado									

eficientes;

- 3) assegurar a saúde e segurança das pessoas durante o período de operação (30 anos) e efetuar o fechamento apropriado do sítio ao final deste período;
- 4) minimizar a necessidade de manutenção e inspeção por um longo período, assegurando a estabilidade do sítio após seu fechamento.

Os passos básicos a serem seguidos por um processo de seleção consistirão primeiramente da definição de uma região de interesse, como a área definida pelos contornos geográficos de um Estado ou de uma região. Um segundo passo seria a análise desta região de interesse para identificar sítios potenciais. Um terceiro passo, seria um exame detalhado destes sítios, que incluiria a avaliação de certos critérios como a adequabilidade do sítio, projeto e operação da infraestrutura, classificação dos rejeitos e características, e requisitos institucionais. O quarto e último processo definiria, da seleção feita, o sítio preferido entre os outros candidatos.

De acordo com o NRC e IAEA, o processo de adequabilidade do sítio, estabelecido no passo anterior ao de seleção final não deve eliminar os sítios úteis e sim discriminar os inúteis. Concordam ainda, que a caracterização detalhada do sítio deva ser feita no último passo de seleção e que, somente se, neste passo aparecerem condições adversas, é que esta caracterização será feita em mais de um sítio.

Porém, parece haver consenso geral entre a NRC e IAEA, que a avaliação do sítio, é o passo que assume importância preponderante, (particularmente nos seus critérios geohidrológicos), no processo de seleção de sítios.

Os critérios de seleção, segundo a agência de proteção radiológica IAEA ⁵⁴⁾ são:

1.1. Considerações Gerais:

O propósito da disposição no solo é o de evitar que quantidades inaceitáveis (Tabela 10) ($> MPC$) de radioatividade atinjam o homem, por intermédio do confinamento dos radionuclídeos no sítio, durante o período normalizado. Isto requer a determinação da capacidade de retenção do sítio para estes radionuclídeos e a predição do impacto que a disposição causaria ao homem e ao seu meio ambiente.

A adequabilidade de um sítio para a disposição de rejeitos radioativos depende da extensão na qual suas características podem evitar ou retardar certos mecanismos de risco (discutidos no item 2.2.2).

Um dos princípios fundamentais para a disposição de rejeitos no solo é que as características hidrogeológicas naturais do sítio sejam suficientes para confinar os radionuclídeos, até que eles decaiam a níveis aceitáveis. Sob o aspecto de custo, esta seria a opção de escolha mais barata e, sob qualquer aspecto, o estudo hidrogeológico é obrigatório.

A maior parte das informações necessárias à seleção de sítios e a sua avaliação está contida nos processos hidrogeológicos, cujos critérios serão discutidos no item (2).

A disposição de rejeitos no solo de sítios é uma ação governamental ou industrial de grande monta, que pode ter sérios impactos ambientais. Em virtude destes, os sítios devem possuir condições físicas e biológicas compatíveis, sendo necessário um estudo de verificação de todos estes processos.

1.2. Estudo da Seleção de Sítios:

Após o planejamento e os estudos gerais terem indicado a necessidade de um repositório no solo, a seleção de um sítio procede de maneira seqüencial, baseando-se em três princípios:

- 1) o repositório está localizado em terras do governo para garantir seu controle por muito tempo;
- 2) a seleção do sítio contará com o auxílio de diferentes especialidades técnicas incluindo geologia, hidrologia, ecologia, biologia, proteção radiológica, engenharia e administração;
- 3) uma agência deve ter a responsabilidade máxima pela organização do processo de seleção de sítios.

O estudo consiste-se de 3 fases: exame da área , seleção preliminar do sítio e sua confirmação.

1.2.1. Exame da Área:

Uma equipe de especialistas identifica áreas gerais e prossegue com uma avaliação superficial das condições hidrológicas e ambientais, baseando-se em conhecimentos documentados e pessoais.

1.2.2. Seleção Preliminar:

Investigando-se as áreas candidatas em três níveis: revisão da literatura mapotécnica, reconhecimento do terreno e análise detalhada do sítio, (que poderia ser uma fase final de seleção, porque tais análises só seriam feitas nos sítios mais promissores).

1.2.3. Confirmação do Sítio:

De acordo com as recomendações do ICRP-26⁵⁸⁾, a fase final da seleção seria uma otimização dos gastos em proteção radiológica, utilizando-se de uma análise custo/benefício.

Como pré-requisito para esta análise, deve-se fazer o cálculo da dose de radiação coletiva que seria esperada do uso do sítio para a disposição dos rejeitos. Cada sítio usa este dado para determinar os melhoramentos de engenharia que

devem ser aplicados.

Esta análise de dose para determinar os procedimentos de proteção adequados, necessita seguir as seguintes recomendações do ICRP ⁵⁸⁾:

- a) determinar as características de lixívia, retenção e custos das opções da forma e condicionamento escolhidas para o lixo;
- b) avaliar o grau de proteção do rejeito contra a água, incluindo custos de barreiras de engenharia;
- c) fazer a avaliação geológica, hidrológica e ecológica detalhada para entender os prováveis caminhos de transporte de radionuclídeos e estimar quais as quantidades que podem ser liberadas e em qual tempo;
- d) equacionar um modelo analítico para predizer as possíveis atividades e seus impactos na dose coletiva.

1.3. Fatores para o Selecionamento do Sítio:

Um sítio promissor pode ser selecionado considerando quatro fatores fundamentais, detalhando-os suficientemente para decidir o envio de recursos para uma investigação mais detalhada.

Estes fatores são: hidrogeologia, ecologia, uso da terra e fatores econômico-sociais.

1.3.1. Fatores Hidrogeológicos:

As considerações hidrogeológicas lidam com a disponibilidade, localização e movimento da água; propriedades do meio e suas subcamadas; e processos que possam romper o depósito, introduzir água no rejeito, expô-lo, ou de algum modo fazê-lo retornar ao homem e ambiente. Sugere-se a ordem de importância nas fases de investigação representada na Tabela 11.

TABELA 11 - FATORES HIDROGEOLÓGICOS DA AVALIAÇÃO DE LOCAIS

<u>ANÁLISE LITERÁRIA / MAPOTÉCNICA</u>	
- Geologia - Topografia - Precipitação - Evapotranspiração - Ponto de Água Superficial mais Próximo - Ponto mais Próximo de Uso ou de Descarga da Água	
<u>RECONHECIMENTO DO TERRENO</u>	
<u>PRELIMINAR</u>	<u>INTERMEDIÁRIO</u>
- Tipo do Meio para Disposi ção - Direção Preferencial do Vento - Altitude - Estabilidade de Taludes - Potencialidade de Cheias, Terremotos ou Erosão - Profundidade do Nível da Água - Profundidade da Rocha Fra turada	- Falhas Geológicas - Local de Disposição: - capacidade de sorção - espessura - permeabilidade e porosidade efetiva - propriedades de engenharia - estrutura - Gradiente Hidráulico - Histórico Hidrológico - Complexidade Hidrológica - Suprimento Adequado d'Água - Monitoração - Balanço Hídrico

ANÁLISE DETALHADA DO SÍTIO

- Distribuição Tri-dimensional
- Geologia do Local:
 - química da água
 - estratigrafia
 - capacidade de troca-iônica
 - umidade da zona aerada
 - tensão do solo úmido
 - transmissibilidade
- Flutuações Naturais do nível d'água
- Dados Sobre Vazões de Rios Próximos e Subterrâneos
- Mapa do Nível d'Água
- Medidas Possíveis para o Manuseio da Água Subterrânea

1.3.2. Fatores Ecológicos:

Deve-se considerá-los com o objetivo de:

- a) prever o impacto ambiental em termos de seus componentes físicos, químicos e biológicos causados pelo estabelecimento e operação de um repositório;
- b) estabelecer a taxa de efeitos potenciais causados pela disposição de rejeitos, pelo deslocamento da atividade e por outras mudanças nas condições iniciais da área e vizinhanças;
- c) avaliar a significância destas mudanças e efeitos sobre a ecologia como uma ajuda na seleção do sítio.

1.3.3. Uso da Terra:

As considerações mais importantes são:

- a) sistemas de transporte;
- b) aproveitamento das fontes d'água;
- c) fontes minerais e operações potenciais;
- d) agriculturas;
- e) recreação;
- f) áreas especiais ou já estabelecidas para uso do governo ou protegidas por leis.

1.3.4. Fatores Sócio-Econômicos:

As considerações importantes são:

- a) proximidade de fontes de rejeitos;
- b) adequabilidade aos acessos e meios de transporte;
- c) novas fontes de suporte, apoio ou suprimentos previstas pela transferência da terra para disposição;
- d) densidade populacional;

- e) proprietário da terra e seu uso;
- f) impacto sobre a sociedade;
- g) constrangimento político.

2 - AValiação DE SÍTIOS PARA A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS.

2.1. Considerações Gerais:

A avaliação de sítios é interpretada pelas agências de proteção radiológica como sendo uma das etapas mais importantes da seleção de sítios. Na prática, porém, a escolha de um sítio tem sido, na maioria dos casos, baseada em critérios mais convenientes, como por exemplo a proximidade do centro produtor; transferindo à avaliação de sítios o caráter de pós-selecionamento, isto é, a responsabilidade de conclusão sobre a viabilidade da seleção.

Este enfoque fez com que os estudos, experiências e demais fontes de informação científica concentrassem-se sobre a avaliação de sítios e, principalmente, seus critérios.

A disposição de rejeitos radioativos é um sistema complexo que depende da combinação apropriada de muitos fatores. Por ser um sistema, há um número infinito de combinações de fatores que podem levar a uma disposição segura; contudo, na vida real, não encontramos nenhuma combinação que preencha todos os fatores do sistema. Muitos dos fatores são controlados pelo produtor de rejeitos, enquanto outros estão sob o controle dos operadores da disposição. Com o objetivo de que cada parte saiba o que esperar da outra, o NRC estabeleceu critérios técnicos mínimos para cada componente do sistema. Cada um destes componentes técnicos contribui para que o sistema alcance mais facilmente os objetivos básicos de segurança.

A avaliação de sítios estabelece condições que ga-

ranter a habilidade do sistema em controlar exposições fora do sítio por migração de radioisótopos, que asseguram estabilidade por um longo período, e que reduzem a probabilidade de intrusão.

Os requisitos mínimos para a avaliação de um sítio são direcionados a quatro aspectos chaves ⁷³⁾:

- 1) Eliminar o contato do rejeito com a água durante as operações e após o fechamento, o quanto for possível;
- 2) Assegurar a estabilidade do sítio e sua infra-estrutura por um longo tempo;
- 3) Aumentar a confiança nas predições da capacidade de operação do depositório;
- 4) Localizar o sítio onde haja pouca probabilidade de atividades humanas futuras que possam resultar em intrusão humana.

As agências de proteção radiológica, assim como a NRC, ao estabelecerem os requisitos mínimos para a adequabilidade de um sítio, pressupõem que estes sejam interpretados em conjunto com outros, (o projeto do sítio, a infra-estrutura de operações, o fechamento do sítio, a separação e classificação dos rejeitos, a forma e empacotamento dos rejeitos e controles institucionais), que ajudam a assegurar o isolamento dos rejeitos durante o seu risco de radiocontaminação, e prover a estabilidade do sítio de disposição após seu fechamento.

Como exemplo de base, podemos citar os requisitos técnicos mínimos ⁷³⁾ para a avaliação de sítios do NRC, que está relacionado às características geológicas, hidrológicas e demográficas do sítio de disposição, são elas:

- 1) O sítio de disposição radioativa deve ser capaz de ser caracterizado, modelado, analisado e monitorado;
- 2) O projeto de selecionamento do sítio deve prever o cres

cimento populacional e desenvolvimentos futuros de modo que seu local não venha a ser afetado quanto a sua operação e seus objetivos de disposição;

- 3) Devem ser evitadas as áreas com recursos minerais que , se explorados, venham a interferir nos objetivos da disposição;
- 4) O sítio deve ser bem drenado e livre de áreas sujeitas a inundações ou cheias freqüentes. O tempo de recorrência mínimo para instalação do sítio é de 100 anos, para planícies de inundação e regiões costeiras;
- 5) Deve-se minimizar as áreas de drenagem à montanha do sítio, para diminuir o escoamento superficial, reduzindo assim o risco de erosão ou inundação da área;
- 6) O sítio deve conter um lençol subterrâneo profundo o suficiente para evitar que haja intrusão da água subterrânea nos rejeitos. A comissão fará excessão neste caso, quando provar-se conclusivamente que as características de disposição resultem numa velocidade de difusão predominante sobre a de migração dos radionuclídeos, e que ela não afete os objetivos de operação desejados;
- 7) Nenhuma descarga de água subterrânea no interior do sítio deve originar-se da unidade hidrológica usada para disposição;
- 8) Deve-se evitar áreas onde processos tectônicos como falhas, dobramentos, atividade sísmica ou vulcanismo venham a alterar e prejudicar a operação do sítio e as predições de impactos de longo período, definido pela modelagem;
- 9) Deve-se evitar áreas onde processos geológicos superficiais, como o intemperismo, possam afetar a operação ou as características previstas na modelagem;

10. A seleção do sítio deve evitar locais ou áreas próximas, cujas atividades possam impedi-lo de alcançar seus objetivos de operação... ou mascarar significativamente o programa de monitoração ambiental.

A Figura 17 mostra a correlação entre cada critério e os aspectos chave estabelecidos anteriormente.

2.2. Critérios de Avaliação:

Todos os sítios de disposição apresentam características diferentes, e que devem ser estudadas e examinadas detalhadamente, sempre com o objetivo de não ultrapassar os limites estabelecidos por norma, como exemplificados nos itens anteriores.

Para que haja uma maior compreensão dos critérios que devem ser avaliados, são descritos o caminho da contaminação e os mecanismos de risco, que fundamentam as análises que seguirão.

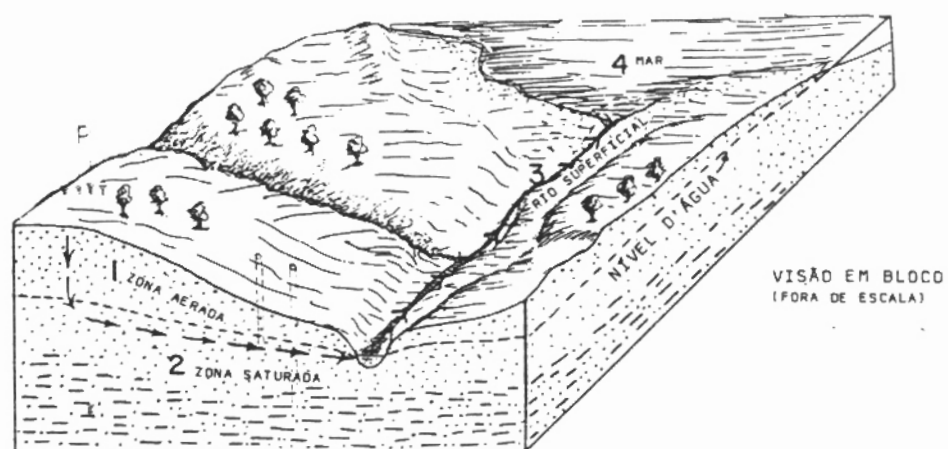
2.2.1. Caminho da Contaminação:

Ao dispormos um material radioativo no solo, seja na forma de sólidos enterrados sob o solo, em trincheiras ou em poços rasos, seja na forma de líquidos despejados em lagoas, depressões artificiais ou injetados no solo, o ar e a água serão os principais meios de transporte dos contaminantes ao homem, dentre estes, a água é o principal contaminante, pois oferece os maiores riscos e caminhos entre o sítio de disposição e o homem.

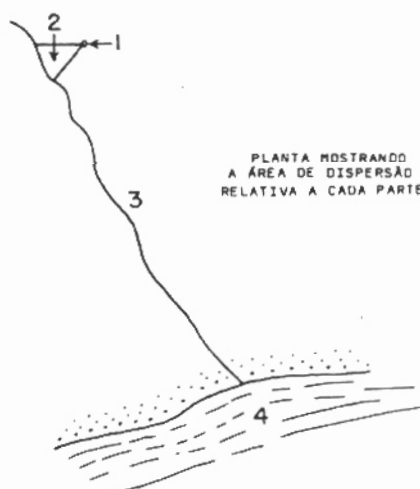
A água ao precipitar-se sob a forma de chuva, segue três caminhos. Parte evapora-se ou é captada pelas raízes, parte escoia pela superfície da terra, chamada escoamento superficial, e parte infiltra-se no solo, chamada infiltração (Figura 18a).

Fig. 17 CORRELAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS MÍNIMOS E OS ASPECTOS CHAVE

CRITÉRIOS DO N.R.C §60.50(A)	ELIMINAR O CONTATO COM A ÁGUA	ASSEGURAR ESTABILIDADE POR UM LONGO PERÍODO	AUMENTAR A CONFIANÇA NA MEDIÇÃO	PROTEGER O INTRUSO INADVERTIDO	
1			X		
2		X	X	X	
3		X	X	X	
4	X	X			
5	X	X			
6	X		X		
7	X		X		
8		X	X		
9		X	X		
10			X		



a)



b)

Fig.18- Sistema de Equilíbrio Solo-Água-Ar

Como a maioria dos sítios é dotada de uma rede de drenagem superficial, as duas últimas partes somam-se para servirem de recarga ao lençol freático.

Esta água que se infiltra tende a carregar parte da contaminação dos rejeitos, ou por processo químico ou físico de deterioração dos rejeitos, ou por simples contaminação acidental, através da zona aerada (insaturada) até atingir o lençol subterrâneo. Este a levará pela zona saturada até um corpo d'água superficial, como, por exemplo, um rio (figura 18b).

2.2.2. Mecanismos de Risco:

Os mecanismos de risco podem ocorrer por exposição dos rejeitos ou transporte superficial provocados por processos erosivos ou catastróficos, por captação em rios e poços oriundos da dissolução e transporte dos contaminantes pela água subterrânea, por absorção vegetal dos fluxos capilares transportados verticalmente, por gases gerados por decomposição bacteriológica dos rejeitos orgânicos, por intrusão de animais pequenos e do homem causando dispersão, ou por acidentes durante o manuseio (transporte, disposição, etc) dos rejeitos. (Figura 19)

Os critérios de avaliação tentam otimizar os diversos parâmetros que diminuem ou suprimem os mecanismos de risco (Tabela 12) à segurança e saúde do homem e do seu meio ambiente, evitando que as contaminações ultrapassem o máximo valor permissível.

Dentre aqueles apresentados, o mais difícil de se prever e evitar, é o lixiviamento e transporte pela água subterrânea. Para que haja uma maior compreensão destes processos é necessária uma análise das reações químicas e do comportamento físico dos rejeitos com o solo.

Fig19-TRANSPORTE DOS SÍTIOS DE DISPOSIÇÃO SOB O SOLO

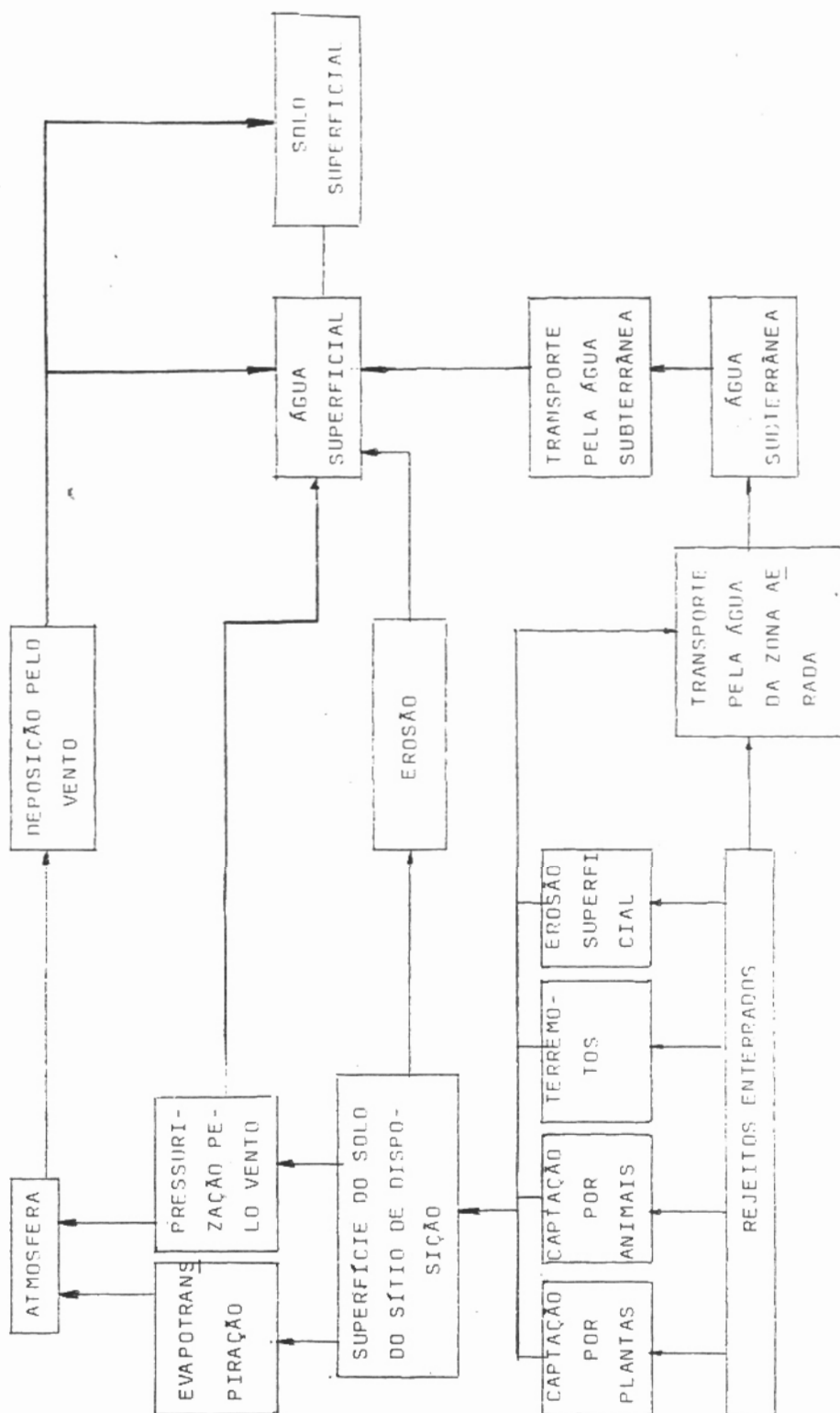


TABELA 12 - RESUMO DOS MECANISMOS DE LIBERAÇÃO

RHO-LD-81

Tipo de Liberação	EVENTO		Conseqüências	Ação Ratificada
	Inicial	Secundário		
Aguda	Terremoto	Exposição do rejeito	a) Ressuspensão b) Erosão	Preencher as fendas e áreas destruídas
Aguda	Inundação	Aumenta a probabilidade de transporte	a) Erosão b) Dano em estruturas na superfície c) Aumento do transporte à água subterrânea	Projeto do local e de Equipamentos
Crônica	Erosão	Transporte de Radionuclídeos pelo Vento ou Água	Exposição de Rejeitos de Meia-Vida Longa	Projeto do Local e de Equipamentos
Crônica	Mecanismos de Liberação de Água	transporte à: a) Água Subterrânea b) Superfície	a) Ressuspensão b) Transporte para Fora do Sítio pela Água Subterrânea	Projeto do Local e de Equipamentos
Crônica	Captação por Plantas	a) Transferência à cadeia alimentar b) Ressuspensão	Aumento da Probabilidade de Dose Dentro/Fora do Sítio	Projeto do Local e de Equipamento
Crônica	Animais	a) Rejeito exposto b) Ressuspensão c) Transferência à cadeia alimentar	Aumento da Probabilidade de Dose Dentro/Fora do Sítio	Projeto do Local e de Equipamentos

2.2.2.1 - Reações Químicas do Rejeito com o Solo:

As reações químicas como troca-iônica, filtração coloidal, precipitação reversível ou mineralização irreversível, retardam o movimento do material radioativo em relação à solução, contribuindo para que haja maior decaimento radioativo antes da solução alcançar pontos acessíveis ao homem.

Das reações apresentadas, as mais importantes são a precipitação e a troca-iônica.

A precipitação é uma reação química que pode remover parte da atividade da solução radioativa em casos relativamente particulares. O pH do solo influi substancialmente; se ele é alto, podemos esperar a precipitação de hidróxidos, sais básicos e elementos terras-raras; se a água subterrânea contiver CO_2 dissolvido em saturação, possivelmente precipitará o ^{90}Sr . Caso o pH do solo variar de alcalino a neutro, tenderá a haver a precipitação do Zr, Nb, La, Ce, Ru e outros. Em condições um pouco mais alcalinas (solos de gipsita, por exemplo) poderá ocorrer precipitação do ^{90}Sr , que será ainda maior em solos fosfatados. Outro caso particular é a presença de calcita ou aragonita, que transformam-se parcialmente em hidroxiapatita que contém uma estrutura capaz de acomodar Sr e Pu.

Em termos gerais, a precipitação raramente ocorre em espécies aniônicas e permanece inalterada perante agentes complexantes (dissolvem), agentes solubilizantes (alteram o pH) ou mesmo soluções de rejeito com alto conteúdo salino.

A troca-iônica, ao contrário da precipitação, ocorre sempre. Diversifica-se no grau, em virtude das diferentes soluções radioativas e composições percentuais de minerais argilosos e orgânicos distribuídas em cada solo.

A grande maioria das informações sobre a reação de troca-iônica são determinadas empiricamente, devido à complexidade de soluções e solos. Experiências acumuladas por estudos,

experimentos de laboratório e observações de monitoração de campo fornecem as seguintes informações^{17)40) 51)}:

1. a reação de troca-iônica, em geral, predomina sobre todas as outras reações químicas, por reter mais atividade;
2. a reação de troca-iônica é também maior para os cátions que para os ânions, sendo comumente chamada reação de troca-catiônica;
3. a reação de troca-iônica baseia-se em fundamentos já usualmente conhecidos como a força de ligação, que aumenta com a carga e decresce com o raio iônico, sugerindo as seqüências: $\text{Li} < \text{Na} < \text{K}; \text{Rb} < \text{Cs}$ e $\text{Mg} < \text{Sr} < \text{Ba}$;
4. as soluções radioativas catiônicas podem formar complexos químicos quando em contacto com agentes quelantes (exemplo EDTA);
5. a reação de troca-iônica compete algumas vezes com a sorção seletiva de certos minerais, para baixas concentrações;
6. alguns autores demonstraram que a mobilidade dos íons decrescia na seqüência: $\text{NO}_3^- > \text{Ru} > \text{Ce}^+ > \text{Sr}^{2+} > \text{terras-raras III} > \text{Pu IV}$;
7. a reação de troca-iônica na zona não saturada varia também com a velocidade de remoção;
8. a reação de troca-iônica decresce na presença de sais por haver competição com os íons não radioativos. Por exemplo, a remoção do ^{90}Sr decresce na presença de ânions na ordem: $\text{PO}_4^{3-} > \text{C}_2\text{O}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$;
9. a troca-iônica altera-se bastante com o pH, sendo o ^{90}Sr muito sensível a este fator;
10. a reação de troca-iônica não proporciona retenção de

atividade muito estável podendo ser removida do solo por lixiviamento com soluções com diferentes teores salinos ou valores de pH.

As propriedades que avaliam solos quanto à sua capacidade de retenção comumente usadas são: a capacidade de troca-iônica, a capacidade de saturação e o coeficiente de distribuição (K_d).

A capacidade de troca-catiônica é uma propriedade do solo que indica o número de íons intercambiáveis contidos numa determinada unidade de peso de solo. A unidade mais usada é o miliequivalente de íons contidos em 100g de solo (meq/100g); equivalentes porque compara-se a um padrão químico de solo. Estes¹⁷⁾ valores podem variar de 0,5 a 150 meq/100g, ou mais.

As argilas apresentam diferenças acentuadas entre suas diferentes estruturas quanto à capacidade de troca-catiônica: vermiculita > montmorilonita > illita > caulinita.

A capacidade de saturação de um solo dá uma idéia da quantidade máxima de atividade que ele pode suportar. Sua definição em laboratório pode ser expressa em termos percentuais da atividade injetada numa coluna e da atividade emergente. O tempo que a solução leva para atravessar a coluna e alcançar tal percentual em geral chama-se tempo de quebra ou "breakthrough". Este processo dinâmico pode ser de grande valia para estimativas de campo.

O coeficiente de distribuição (K_d), é uma medida quantitativa da afinidade de certos íons pelo solo e é obtido da razão entre a quantidade de soluto retida no solo, por unidade de massa do solo, e a quantidade de soluto restante na solução, por unidade de volume da solução, após o equilíbrio. Sua unidade é geralmente expressa em ml/l.

Em geral, o K_d ¹⁷⁾ é muito sensível ao pH da solução, sendo quase nulo para soluções ácidas e aumentando rapida-

mente com o aumento do pH.

É uma medida que varia enormemente com a concentração dos íons em solução, que deve ser pequena em comparação com os íons da solução hospedeira para que se torne significativa.

O coeficiente de distribuição (K_d) é muito importante para estimar as velocidades relativas dos nuclídeos (v_n) e da água subterrânea (v_f) em função de parâmetros do solo, como a porosidade (n) e a densidade (ρ). Estudos foram desenvolvidos, estabelecendo-se a seguinte relação:

$$\frac{v_f}{v_n} = 1 + \frac{1 - n}{n} \rho K_d \quad (46)$$

2.2.2.2 - Comportamento Físico dos Rejeitos no Solo:

Para melhor visualizarmos o comportamento⁵¹⁾ físico dos rejeitos, analisaremos o sistema solo-água-ar, típico de um aquífero não confinado de forças piezométricas, gravitacional e tensão superficial, em equilíbrio, representado pelo modelo hidrológico da figura 18a.

Quando a chuva cai sobre a superfície (P) ela tem três caminhos a percorrer. Primeiramente escoar pela superfície e é captada por riachos e conduzida diretamente ao rio - este é o modelo rápido de transporte. Em segundo lugar, ela pode infiltrar-se no solo e alcançar o lençol freático. Em terceiro lugar, a chuva que cai pode ser absorvida pelas raízes de vegetais após penetrar parcialmente no solo ou evaporar-se diretamente pela temperatura alta do solo e do ar.

A segunda rota é mais importante que as demais por favorecer o lixiviamento e transporte dos contaminantes, além de constituir a fonte de recarga do aquífero.

O termo lençol d'água define o contorno entre as zonas aerada e de saturação. Ele dirige-se normalmente, para um rio recarregando-o continuamente por percolação. Os poços perfura-

dos na primeira camada apresentam um nível d'água coincidente com o lençol freático. Os que atravessam a camada impermeável, em geral, apresentam nível d'água mais alto devido ao efeito de artesianismo que acontece quando o aquífero artesianos aflo- ra a uma altitude superior à do estrato que o cobre.

Num sistema, como mostrado na Figura 18a, os rejei- tos seriam enterrados ou descarregados na zona aerada.

A contaminação desenvolver-se-ia da zona aerada para a saturada, através da água lixiviante.

Os fenômenos físicos predominantes seriam a veloci- dade de recarga, inicialmente vertical, na zona aerada, e a ve- locidade de filtração da água subterrânea, posteriormente hori- zontal, na zona saturada.

Os fatores intervenientes no primeiro estágio se- riam o peso da água e a adsorção dos radionuclídeos após a lixiviação. No segundo, entrariam a velocidade de difusão, de dispersão e outras. Em termos gerais pode-se assumir o 1º está- gio como predominantemente gravitacional, o 2º estágio como proporcional à velocidade do fluxo da água subterrânea, despre- zando-se em ambos a velocidade de difusão molecular.

A quantidade de contaminação e de água que percola- rá através do solo dependerá da taxa de recarga, das diferen- ças de temperatura e peso específico entre a solução e seu veí- culo, do pH e concentração da solução, das heterogeneidades do solo e do tipo de solo, entre outros.

Estudos com traçadores mostraram que a nuvem conta- minante tende a divergir em função da configuração dos contor- nos piezométricos, que definem as condições locais. Uma vez al- cançada a zona saturada, ela tende a dirigir-se para as zonas de menor gradiente e assumem a forma de um cigarro. Seu tama- nho aumenta progressivamente devido à difusão contínua, tanto ao longo como através da sua passagem.

Em muitos laboratórios foram usadas liberações contínuas de grandes concentrações e não houve contaminação acima de alguns mil ppm (Figura 20).

Em condições que envolvam diversos aquíferos, onde há camadas aquosas intercaladas sucessivamente por camadas impermeáveis, o estudo das interconexões torna-se mais complexo. Pode haver uma acumulação isolada de água subterrânea contaminada, acima do aquífero, formando um lençol localizado, mas tal contaminação é temporária, variando com a velocidade de infiltração, taxa de recarga e transmissibilidade dos solos parcialmente saturados que envolvem e suportam a zona de disposição.

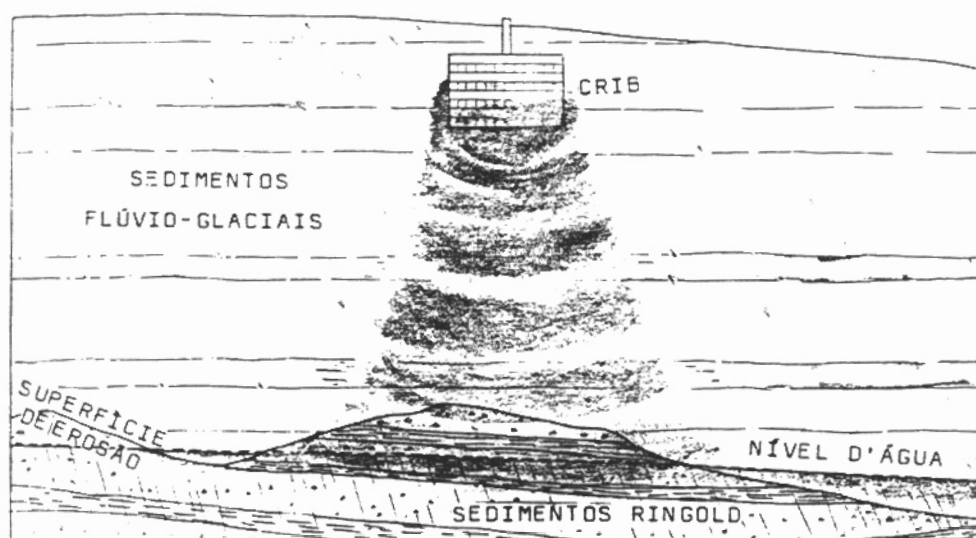
2.3. Avaliação Geohidrológica:

A geohidrologia é uma ciência que está relacionada com as propriedades, distribuição e movimento da água abaixo da superfície da terra (isto é, no solo e nas rochas).

A avaliação geohidrológica, porém, é interpretada em termos muito mais abrangentes que os da definição, pois considera o *resumo de critérios geológicos e hidrológicos*.

A geologia influi substancialmente na análise de efeitos catastróficos como o vulcanismo, sismologia, a presença de dobras e falhas, zonas sujeitas a deslizamentos, liquefação e resistência de taludes. Contudo, a geologia de solos é a que se aplica diretamente sobre a avaliação de locais, especialmente na determinação do tipo, origem, estratificação e granulometria do solo; espessura das camadas; definição dos contornos geológicos (topografia) analisando elevações e cavidades, e o intemperismo.

A hidrologia, sem dúvida alguma, é a essência da avaliação de sítios, pois seu estudo e exame pode subdividir-se em: hidrologia superficial - que engloba a precipitação, as bacias de drenagem, os corpos d'água (rios, lagos, lagoas, fon-



SECÇÃO TRANSVERSAL SOB UM "CRIB"

tes, etc), analisa suas vazões e determina sua probabilidade de erosão e enchentes; e hidrologia subterrânea - que estuda a in filtração da água no solo considerando as suas propriedades, a recarga do lençol subterrâneo, sua profundidade, velocidade , direção e vazão. Enfim, a hidrologia estuda todos os processos que compõem o ciclo hidrológico, desde a precipitação até a recarga subterrânea dos rios e sua evaporação.

Estudando minuciosamente todos os itens e sub-itens do que foi exposto, chegamos à conclusão que os parâmetros geo hidrológicos mais sensibilizantes são: a precipitação; a área da bacia de drenagem; o tipo geológico de solo e seu perfil ; a capacidade de sorção do solo e da água; a velocidade de recarga do lençol freático e sua profundidade, a velocidade da água subterrânea, a sua direção e a distância até seu ponto de emergência mais próximo, e a densidade populacional.

Os diversos trabalhos que tratam sobre o assunto sub dividem a avaliação em critérios gerais, levando em consideração o que, e porque se deve conhecer cada critério, seu inter-relacionamento com outros, os critérios específicos ideais e as conclusões sobre o assunto.

O meu trabalho trata especificamente sobre aqueles critérios geohidrológicos que intervêm sobre a disposição de rejeitos sólidos de baixa atividade no solo baseado nas normas básicas de proteção radiológica e nos mecanismos de risco já citados anteriormente.

2.3.1 - Pré-requisitos Básicos:

Considero como pré-requisitos todos os processos de análise que são genéricos ou específicos demais para serem nor malizados e avaliados em conjunto com aqueles que analisarei . Em virtude disto, os pré-requisitos são estabelecidos "a prio ri" e não estão sujeitos a modificações durante o processo de

avaliação.

Os requisitos básicos são:

- o local não está sob o perigo de efeitos catastróficos ou de grande porte;
- não serão considerados os custos e as decisões políticas como prevalescentes;
- as bases de cálculo para estimativa de caminhos preferenciais, concentrações máximas e tempos de trânsito considerarão somente o ambiente natural sem contar com a integridade de containers e barreiras de engenharia;
- os rejeitos devem estar na forma sólida, auto-portante e com seu volume, quantidade, composição física, química e isotópica pré-determinados. Não devem conter materiais com alto conteúdo d'água, soluções químicas explosivas ou pirofosfóricas e radionuclídeos cuja meia-vida, tipo e energia de radiações emitidas não satisfaçam à classificação adotada pela instituição.

2.3.2 - Critérios Específicos:

Os critérios específicos ^{2), 51), 73), 54), 75), 43), 19) 66), 50), 34), 93)} analisados serão a geologia, a hidrologia superficial e subterrânea, e a geografia. A análise subdividir-se-á em deveres, interrelacionamento, fatores favoráveis e fatores desfavoráveis ou de risco. Quase todos os critérios baseiam-se no tempo de retenção (tempo que um solo leva para reter os contaminantes), e tempo de trânsito (tempo que os contaminantes levam para chegar ao ponto de descarga mais próximo), que determinam o único meio de extinguir a radioatividade, que é o tempo de decaimento (tempo durante o qual o contaminante vai perdendo a sua radioatividade exponencialmente).

2.3.3 - Deveres:

a) Geologia

Devemos analisar o solo em sua composição química , granulométrica e mineralógica, camada por camada. Estas informações darão base para definir as suas propriedades sorcivas , estimar a sua distribuição de permeabilidades, verificar as suas propriedades de resistência como estabilidade de taludes e facilidade de escavação.

Devemos determinar a espessura do solo e de suas camadas. Assim podemos estimar o tempo que a contaminação levará para atravessá-lo, se suas dimensões serão suficientes para acomodar todos os rejeitos que para ali se destinam e se poderá garantir fisicamente a exposição sobre o solo.

Devemos verificar se a permeabilidade e a porosidade são suficientes para uma boa drenagem.

Devemos certificar-nos que o local não possui recursos naturais economicamente exploráveis.

Os solos granulares devem conter uma pequena percentagem de argila para haver uma boa sorção.

b) Hidrologia Superficial

Devemos conhecer as características físicas, químicas e quantificar a precipitação e a vazão dos rios. Estes dados ajudam a determinar a capacidade de diluição, de dispersão, sorção e reconcentração nos rios que são recarregados pelo lençol freático contaminado. Fornecem dados sobre os tempos de transporte, cheias, caminhos preferenciais dos radionuclídeos, e velocidades de escoamento e infiltração.

c) Hidrologia Subterrânea

Devemos compilar dados sobre o nível d'água, para

assegurar que as suas flutuações máximas não atinjam o depósito de rejeitos.

Devemos determinar a velocidade da água subterrânea e sua direção para estimar mais precisamente o tempo de trânsito e analisar os caminhos preferenciais. Assim podemos delimitar uma área além da qual o uso da água não tenha restrições.

Devemos estimar o tempo de trânsito, os caminhos críticos e o tempo de retenção considerando as condições mais desfavoráveis: mínima retenção no solo, sem diluição no lençol e nos rios; velocidade da água subterrânea máxima.

Devemos certificarmo-nos que as características sorcivas do solo, para os radionuclídeos mais críticos (Sr, Cs , Ru e Co), contribuirão para atenuar suas atividades até que estas alcancem os máximos valores permissíveis, durante um período determinado.

d) Geografia

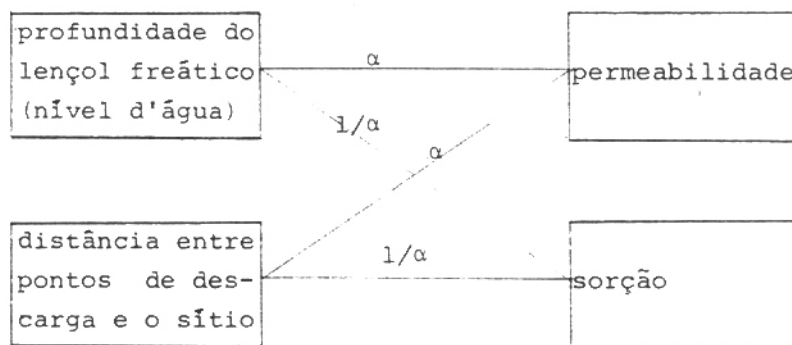
Devemos determinar os pontos de captação de água mais próximos do local de disposição, para estimar o tempo de trânsito.

Devemos localizar o depósito próximo a acessos para transporte, utilidades e próximo ao produtor de rejeitos.

A área do sítio deve ser suficiente para dispor todos os rejeitos de projeto.

2.3.4 - Interrelacionamento:

A figura a seguir e a figura 18b representam resumidamente o interrelacionamento de alguns critérios específicos:



A precipitação controla muitos dos critérios acima mencionados. Quanto maior a precipitação, maior o escoamento superficial, menor é a distância entre rios e maior é a velocidade de infiltração.

O lençol freático é controlado também pela precipitação, dependendo de sua frequência e intensidade, mas varia com outros fatores como a permeabilidade, a evapotranspiração, a sorção do solo e a topografia.

Em regiões áridas, o solo geralmente é permeável e a precipitação é muito intensa e de baixa frequência. Neste caso, o nível d'água tende a ser profundo. Nas regiões úmidas, a permeabilidade dos solos, tende a ser menor, e a precipitação é pouco intensa e mais freqüente. Neste caso, o lençol freático aproxima-se mais da superfície.

Nessas duas regiões, o lençol freático aproxima-se da superfície em regiões baixas e aprofunda-se em regiões altas, confundindo as suas curvas de nível com as topográficas.

Como os contaminantes movem-se na mesma direção da água subterrânea, mas em velocidades menores, os tempos de retenção e de trânsito são alterados pelas condições acima citadas.

O tempo de retenção aumenta com a sorção do solo e com a profundidade do lençol freático, diminui com a velocidade

de de infiltração e com a permeabilidade do solo.

O tempo de trânsito diminui com a velocidade do fluxo de água subterrânea, com a permeabilidade da zona saturada e com ^{o aumento} a distância ao ponto de descarga ou uso mais próximos. Varia em função da direção de fluxo e aumenta com sorção da água subterrânea e do solo saturado.

A velocidade e a direção do solo são dependentes do gradiente hidráulico (variação do nível com a distância $\Delta H/\Delta L$) e da permeabilidade e porosidade dos solos saturados.

2.3.5 - Condições Favoráveis:

a) Geologia

O solo apresenta condições favoráveis quando é uniforme, não consolidado, argiloso, altamente sorcivo e com baixa concentração de sais solúveis. Topografia levemente ondulada favorece juntamente com uma camada de solo espessa.

A rocha não fissurada, não muito alterada e com baixo conteúdo de sais é favorável.

b) Hidrologia Superficial

As condições de hidrologia superficial mais favoráveis são: baixa precipitação, bacia de drenagem pequena e com poucos rios, ausência de escoamento superficial no sítio, velocidade de infiltração baixa ou nula, e grande volume dos rios e lagos distantes do sítio.

c) Hidrologia Subterrânea

A permeabilidade baixa e a porosidade alta são condições muito favoráveis.

O nível d'água é facilmente medido e quanto mais profundo, melhor.

A velocidade do fluxo de água subterrânea bem lenta é favorável, assim como uma direção que conduza a locais de baixa densidade demográfica, de pouco ou nenhum uso da água, e que estejam bem distantes do local.

São favoráveis as condições subterrâneas de grande sorção e de alta capacidade de troca.

Obviamente as condições mais favoráveis são um longo período de retenção e de trânsito, com uma baixa densidade populacional.

d) Geografia

As condições mais favoráveis são: distante de centros populacionais, distância grande entre o sítio e os pontos de provável uso, local isolado, de grande altitude e próximo ao mar ou grande rio.

2.3.6 - Condições Desfavoráveis ou de Riscos:

a) Geologia

O solo muito permeável aumenta a velocidade de infiltração, diminui a sorção e conseqüentemente o tempo de retenção, aumentando a velocidade e concentração que os radionuclídeos chegam ao lençol freático.

O solo impermeável é favorável mas pode constituir o risco de inundar com precipitações intensas. Neste caso inclui-se o caso de solos planos.

A altitude é uma condição favorável porque, em geral, há baixa densidade populacional e o lençol é mais profundo. Porém, nos locais populosos a altitude pode constituir o risco de acelerar a velocidade da água subterrânea devido ao gradiente hidráulico e de ser uma zona mais susceptível a erosões.

A rocha fissurada, muito intemperizada ou sujeita ao

intemperismo químico (calcita e gipsita) acelera a velocidade de fluxo subterrâneo, diminuindo os caminhos críticos e o tempo de trânsito.

Os solos com alto teor de sais ou completamente inertes diminuem sensivelmente o tempo de retenção por sorção.

As características tectônicas das rochas e solos, como falhas, dobramentos, sismicidade, vulcanismo ou fraturamentos tendem a aumentar os riscos de deslizamentos, integridade de estruturas, estabilidade de taludes e até fenômenos como o da areia movediça ou liquefação.

b) Hidrologia Superficial

As precipitações altas aumentam os riscos de erosões com exposição dos rejeitos, inundações e encurtamento dos caminhos críticos de contaminação.

O escoamento superficial não deve existir, pois é o meio mais rápido de contaminação de corpos d'água.

Bacias de drenagem grandes aumentam os riscos por encurtarem os caminhos críticos.

A velocidade de infiltração alta aumenta a lixívia dos rejeitos e a velocidade de recarga do lençol freático, diminuindo a capacidade de sorção e aumentando o risco dos contaminantes chegarem mais rapidamente e em maior concentração aos pontos de provável uso da água subterrânea (solos) ou superficial (rios).

Há risco de que os contaminantes diluídos em um corpo d'água venham a ser reconcentrados ou em sedimentos aluvionais, ou em organismos do meio-ambiente.

c) Hidrologia Subterrânea

O nível da água muito raso aumenta o risco da água capilar ou a subterrânea, entrar em contacto com lixo. As variações do nível d'água são difíceis de se predizer, fazendo

com que os projetos aumentem seu fator de segurança.

A água que se infiltra ou aquela que percola verticalmente tende a lixiviar ou decompor os materiais sólidos enterrados e, até, corroer os "containers" aumentando assim a velocidade de contaminação do lençol e o risco desta alcançar o homem.

As velocidades altas aumentam o risco de contaminação por diminuírem o tempo de trânsito.

A sorção apresenta mecanismos de risco, como já vistos, difíceis de se predizer. O seu valor, se for muito baixo, possibilita uma maior velocidade de contaminação pois diminui o tempo de retenção e pode ser considerado um risco caso a retenção no solo seja considerada na avaliação do local.

d) Geografia

A situação geográfica do local de disposição é um fator muito importante no que se refere à potencialidade de riscos. Um dos riscos mais evidentes é a distância a centros populacionais; se esta for curta, há probabilidade de intrusão atual ou futura do homem no local ou em áreas restritas onde a água subterrânea possa não ter alcançado os limites permitíveis.

Outro fator de risco é a distância do sítio a corpos d'água que, quanto menor, menor o tempo da contaminação alcançá-los.

O sítio distante dos centros produtores de rejeitos, constitui um risco maior para transporte e manuseio destes, durante o percurso.

O local onde situa-se o sítio pode interferir com prioridades futuras e estas constituírem risco durante as suas atividades.

2.4 - Conclusões:

Os resultados de tais estudos delimitam áreas de maior segurança ~~e menor custo~~.

As análises devem basear-se nos parâmetros que afetam a dispersão dos rejeitos e nos que suportam suas consequências. Esta análise tenta conciliar os componentes que definem o problema da disposição de rejeitos, a sua dispersão e a possibilidade desta interferir com o ambiente e com o homem.

Uma seleção prévia exclui áreas sujeitas a calamidade naturais.

O interrelacionamento entre água superficial ou subterrânea e densidade populacional restringe bastante o número de locais para disposição, uma vez que a água é o principal meio de transporte, ~~lixiviação~~ ^{lixiviação}, dispersão e migração de radionuclídeos.

Grandes volumes d'água superficial, em geral, diminuem o risco de contaminação por oferecerem um local adicional para diluição. Porém, estes volumes geralmente ocorrem em áreas densamente povoadas.

Nos países de alta densidade populacional, prefere-se que as áreas de disposição sejam próximas do mar ou em pequenas ilhas.

As ilhas pequenas e áreas costeiras também são boas soluções por diminuírem o risco de transporte, evitando ao máximo o transporte terrestre.

A disposição de rejeitos em formações rasas, sob o ponto de vista econômico e de risco de transporte, não deve divergir da localização das plantas de reprocessamento. Ambas devem ficar próximas, reduzindo o risco de transporte a um único estágio, servindo tanto para a análise como para o controle do sítio.

C A P Í T U L O I V

I V - OS REJEITOS DO IPEN

O IPEN é um dos Institutos que lideram a pesquisa nuclear no Brasil e na América Latina.

Desde que o reator de pesquisas, tipo piscina , IEAR-I atingiu a sua criticalidade, em 1957, numerosos projetos e pesquisas têm sido executados pelos diversos centros deste Instituto. Além destes, estão sendo planejados programas , especialmente no campo do Ciclo do Combustível.

A produção de radioisótopos e sua aplicação em diversos setores, tem aumentado sempre.

De todas estas atividades aparecem rejeitos radioativos de vários tipos, categorias (Tabela 1b) e quantidades . Neste capítulo, é feita uma tentativa de descrever os rejeitos radioativos líquidos e sólidos atuais e futuros gerados pelos diversos departamentos do IPEN.

Estas estimativas, embora não muito atuais, não diferem muito dos valores reais, uma vez que estão baseadas em literaturas publicadas recentemente.

Nos laboratórios de produção de isótopos são produzidos vários radioisótopos, como o Iodo-131, Cromo-51 , Fósforo-32, Enxôfre-35, Tecnécio-99, Ouro-198, etc., em grande quantidade, alguns Curies semanais, que dão origem a muitos rejeitos líquidos de meia-vida curta.

Nos laboratórios da Radiofarmácia e da Radiobiologia, aparecem rejeitos provenientes do uso de muitos milicuries de Iodo-131, Cromo-51, Tecnécio-99, para a preparação de proteínas marcadas; do uso de Cobalto-60, para a preparação de vitamina B12 marcada; do uso de Trítio, para a troca-iônica com proteínas; e do uso de Carbono-14, para a preparação de

amino-ácidos marcados. Planeja-se o uso de atividades da ordem de milicuries de Índio-113, Tecnécio-99, Selênio-75, Cobalto - 58, Trítio-3 e Carbono-14.

Nos laboratórios de Radioquímica , são usados quase todos os radioisótopos de meia-vida relativamente curta, e que não excedam atividades da ordem de milicuries.

Nas experiências que usam o Urânio irradiado e produtos de irradiação, da ordem de alguns milicuries, só há probabilidade de gerar rejeitos de baixa e média atividade.

Os rejeitos gerados nos laboratórios de Física são da ordem de microcuries e em volumes desprezíveis.

Os laboratórios da Metalurgia Nuclear , produzem muitos elementos combustíveis com Urânio natural e, em quantidades relativamente grandes. Isto dá origem a papéis contaminados e lixos radioativos sólidos de baixo nível de atividade.

Os laboratórios de Engenharia Química , geram rejeitos líquidos e sólidos no processo de purificação do Urânio, na produção de UF_4 , pela planta-piloto, e no reprocessamento de Tório, em escala de laboratório. Outros rejeitos resultam dos projetos de treinamento e pesquisa para reprocessamento de amostras irradiadas e óxidos de Urânio e Tório.

A operação e manutenção do Reator dá origem , principalmente, a soluções de regeneração de resinas de troca iônica usadas, contendo produtos de corrosão ativados, materiais irradiados, e contaminados, que constituem lixo.

Nos laboratórios de Medicina Nuclear e de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e Indústria , são geradas quantidades pequenas e até desprezíveis, de rejeitos.

A quantidade total de rejeitos líquidos gerados nos últimos anos pelos laboratórios do IPEN, foi muito pequena, como mostra ⁽¹¹⁰⁾ a Tabela 13 . Aproximadamente $2m^3$ /ano de rejeitos líquidos estavam realmente contaminados.

TABELA 13 - Efluentes Radioativos Líquidos Gerados no IPEN.

Departamento	m ³ /a	mCi/ml	Σ Ci/a	Fonte	Isótopos	Tratamento
CPMR (TP)	0,8 - 1 600	$10^2 - 10^3$ $10^6 - 10^7$	1 - 20 0,1 - 0,5	LABORATÓRIOS QUENTES ÁGUA DE LAVAGEM	I-131, Cr-51, P-32, S-35, Te TRAÇADOR	→DECAIMENTO→DILUIÇÃO→ESGOTO
CPF (TP)	0,1 - 0,2 200	$10^2 - 10^3$ $10^6 - 10^7$	3 0,1 - 0,3	LABORATÓRIOS ÁGUA DE LAVAGEM	I-131, I-125, Cr-51 TRAÇADOR	→DECAIMENTO→DILUIÇÃO→ESGOTO
CRQ (TFR)	0,1 200	$10^5 - 10^6$ $10^7 - 10^8$	1 0,05	LABORATÓRIOS ÁGUA DE LAVAGEM	→TODOS OS ISÓTOPOS DE MEIA-VIDA CURTA TRAÇADOR	→DECAIMENTO→DILUIÇÃO→ESGOTO
CMN (MM)	-	-	-	-	-	-
CEQ (MQ)	20 - 40 0,1	< 10ppm U -	- -	PURIFICAÇÃO DE U LABORATÓRIOS	U NATURAL Th-232, U-233, Pa-233	→ESGOTO →DECAIMENTO→DILUIÇÃO→ESGOTO
CFB (TB)	0,2	$10^2 - 10^3$	0,2	LABORATÓRIOS	I-131, Cr-51, T	→DECAIMENTO→DILUIÇÃO→ESGOTO
COMR (REN)	500	< 10^9	-	PIAS DE TROCA-IÔNICA DO REATOR	-	→ESGOTO
CFN	-	-	-	-	-	-
CEN	-	-	-	-	-	-
CARM	n	e	g	ℓ i	g i	b ℓ e
CARREI	-	-	-	-	-	-

A quantidade de rejeitos radioativos sólidos é substancialmente maior que o volume de efluentes líquidos. São produzidos, aproximadamente, $25\text{m}^3/\text{ano}$ de rejeitos radioativos sólidos nos diversos laboratórios do Instituto, como visto na ⁽¹¹⁰⁾Tabela 14.

A produção de rejeitos líquidos e sólidos para os próximos anos, foi estimada com base nas atividades futuras dos laboratórios do IPEN, como mostram ⁽¹¹⁰⁾as Tabelas 15 e 16.

1 - FILOSOFIA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NO IPEN

O IPEN, como muitos outros países, adota as seguintes filosofias para a disposição e tratamento de seus rejeitos:

- diluir e dispersar (se as condições geográficas e os limites do MPC ⁽⁵⁸⁾ permitirem;
- concentrar e estocar (estocar provisória ou permanentemente, após imobilização/solidificação apropriada, com cimento, betume, vidro, cerâmica, etc).

A disposição de rejeitos líquidos no Rio Pinheiros é uma prática controlada e guiada pelas normas da CNEN ¹⁸⁾. Estas normas são baseadas em regras e regulamentos internacionais (ICRP) estabelecidas a muitos anos atrás ⁵⁸⁾.

A maioria dos países tenta manter as concentrações de descarga de seus radionuclídeos abaixo (1/10, ou menos) dos valores recomendados internacionalmente, como é o caso do IPEN. Informações mais detalhadas sobre as práticas de descarga estão disponíveis na ^{(82) (91) (94)} literatura.

Em suma, as práticas adotadas pelo IPEN, são:

- todos os rejeitos líquidos que contêm radionuclídeos de meia-vida curta, são descarregados no rio, após diluição e decaimento adequados;
- os rejeitos líquidos que não podem ser descarregados no

Deptº	m ³ /a	mCi/a	mRem/h	Fonte	Espécie	Isótopos	Tratamento e Disposição
CPMR (TP)	5	100	90% < 100 10% > 100	laboratórios	papel, vidro, PVC, pe	I-131, Cr-51, P-32, Au-198, S-35, Te	Decaimento → enterro
CRF (TP)	4	10	< 100	laboratórios	papel, vidro, PVC, pe	I-131, I-125, Cr-51	Decaimento → enterro
(TFR) CRQ	3	10	< 100	laboratórios	papel, vidro, PVC, pe	Isótopos com meia-vida curta	Decaimento → enterro
CMN (NM)	1	10g U nat.	< 10	laboratórios	papéis, lixos	U natural	enterro
CEQ (MQ)	3	10g U nat.	< 10	planta de purifi- cação de urânio	papéis, lixos	U natural	enterro
	2	kg	< 10	"	Lamas de U nat.	U natural	enterro
	1	-	< 10	laboratórios	papéis	Th-232 e filhos	enterro
	1	-	< 10	produção de UF ₄	papéis, lixos	U natural	enterro
CRB (TB)	1	10	< 10	laboratórios	papéis, carcaças	I-131, Cr-51 T	Decaimento → enterro
COMR (REN)	2	10	< 10	prédio do reator	papéis, materiais conta- minados	traçadores	Enterro
	0,5	10 ³	10 ³	reator	material irradiado	metal irradi., Ir-192 fontes de Eu-152, etc.	estocagem no reator
CFN (TFF)	n	e	g	ℓ i	g i	b ℓ	e
CEN (REN)	-	-	-	-	-	-	-
CARM (TB)	n	e	g	ℓ i	g i	b ℓ	e
CARREI (TE)	-	-	-	-	-	-	-

TABELA 14 - Rejeitos sólidos gerados no IPEN.

TABELA 15 - Elementos Radioativos Líquidos que serão Gerados pelo IPEN, no Futuro.

Departamento	m ³ /a	mCi/ml	Σ Ci/a	Fonte	Isótopos	Tratamentos propostos
CPMR (TP)	1-2	$10^{-2}-10^{-3}$	10-40	Laboratórios quentes	I-131, Cr-51, P-32, A-198, S-35, In-113, Se-75, Co-58, Tc-99m	Precipitação + solidificação
	0,1	1-10	1-10	"	Isótopos de Telúrio, produtos de fissão, U-235 irradiado	Precipitação + solidificação
	1000	$10^{-6}-10^{-7}$	0,1-1	Água de lavagem	Traçadores de todos os isótopos	→ Esgoto
CRF (TP)	0,2-0,5	$10^{-2}-10^{-3}$	3	Laboratórios	I-131, I-125, Cr-51, In-113	Precipitação + solidificação
	200	$10^{-6}-10^{-7}$	0,1-0,3	Água de lavagem	Tc-99m, Se-75, Co-58, T, C-14	Decaimento + diluição + esgoto
CRQ (TFR)	0,1-0,5	$10^{-4}-10^{-5}$	1	Laboratórios	Todos os isótopos de meia-vida curta	→ Precipitação + solidificação
	0,01	$10^{-4}-10^{-5}$	0,1	Laboratórios	U irradiado, produto de fissão, elementos radioativos	→ Precipitação + solidificação
	200	$10^{-6}-10^{-7}$	0,1	Água de lavagem	Traçadores de todos os isótopos	→ Decaimento + diluição + esgoto
CMN (MM)	0,2	-	1-10	Célula quente	Produtos de fissão e Urânio irradiado na forma sólida	→ Solidificação
CEQ (MQ)	20-40	<10ppm U	-	Purificação do U	U natural	→ Esgoto
	2	$10^{-1}-10^{-2}$	10-50	Células quentes	Produto de fissão, U, Th e Pu irradiados	→ Solidificação
	55	<1ppm Th	-	Purificação do Th	Th e filhos do Th	→ Diluição + esgoto
CRB (TB)	0,1	<10mg Pu/ℓ	-	Caixas de Pu.	Pu	→ Solidificação
	0,2	$10^{-3}-10^{-4}$	0,2	Laboratórios	I-131, Cr-51, Co-58, T, C-14	→ Precipitação + solidificação
COMR (REN)	500	<10 ⁻⁹	-	Plas de troca iônica do reator		→ Esgoto

TABELA 15 - Elementos Radioativos Líquidos que serão Gerados pelo IPEN, no Futuro. (continuação)

Departamento	m ³ /a	mCi/ml	Ci/a	Fonte	Isótopos	Tratamento propostos
CFN (TFF)	-	-	-	-	-	-
CEN (REN)	-	-	-	-	-	-
CARRM (TB)	0,1	10^{-6} - 10^{-7}	$\leq 10^{-4}$	Laboratórios	I-131 e Au-198	→ Precipitação → solidificação
CARREI (TE)	0,5	10^{-4} - 10^{-5}	$\leq 10^{-3}$	Laboratórios	I-131, Br-82, T	→ Precipitação → solidificação
CPRD (NP)	3-5	10^{-2} - 10^{-3}	≤ 1 -10	Laboratórios	Produto de fissão de todos os isótopos	→ Precipitação → solidificação
Tratamento de Rejeitos e descontaminação	200	10^{-6} - 10^{-7}	$\leq 0,1$	Água de lavagem	Traçadores de todos os isótopos	→ Decaimento → diluição → esgoto

TABELA 16 - REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS QUE SERÃO GERADOS PELO IPEN, NO FUTURO

Departamento	m ³ /a	mCi/a	mRem/a	Fonte	Espécie (Tipo)	Isótopos	Gerenciamento Proposto
CPMR (TP)	6-8	200	≤ 200	Laboratório Quente	Papel, PE, PVC, Vidro Filtros	I-131, Cr-51, P-32, Au-198, S-35, In-113, Se-75, Co-58, etc	Decaimento-Enterro
	0,5	200	≤ 200	Laboratório Quente	Papel, PE, PVC, Vidro Filtros	Produto de Fissão, Te e U irradiado	Prensagem-Concreto-Estocagem
	5	Traçador	≤ 10	Filtro da Ventilação	Madeira, Papel, Fibra de vidro	Traçador	Prensagem-Concreto-Estocagem - ou para rejeitos Convencional
CRF (TP)	5	200	≤ 200	Laboratório	Papel, PVC, PE, Vidro e Carcaças	I-131, I-125, Cr-51, In-113, Se-75, Te-99m, Co-58, Tl-201	Decaimento-Enterro
CRQ (TFR)	3	100	≤ 100	Laboratório	Papel, PE, PVC, Vidro	Todos os isótopos com meia-vida curta, U irradiado, Produto de Fissão, Elemento Radioativo	Prensagem-Concreto-Estocagem
CMN (MD)	3	---	≤ 10	Filtros de Laboratório	Papel, PVC, PE, Material de Filtro	U natural, U enriquecido	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para rejeitos Convencional
	1	10 ⁺³ - 10 ⁺⁴	> 200	Células Quentes	Papel, PE, PVC, Metal, Ferramentas, Filtros	U irradiado, Produtos de Fissão	Concreto-Estocagem
	1	1-2 g Pu	≤ 10	Caixas com Luvas	Papel, PE, PVC, Metais, Ferramentas, Filtros	Pu-239, Pu-240, U	Concreto-Estocagem
CEQ (MQ)	5	10-100 g U	≤ 10	Planta de Purificação de Urânio	Papel, Vidro, PE, etc	U natural	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para rejeitos Convencional
	2	Kg U	≤ 10	Planta de Purificação de Urânio	Lamas contendo U	U natural	Concreto-Estocagem
	2	10 ² - 10 ³	> 200	Células Quentes	Papel, Vidro, PE, PVC, Filtros	U irradiado, Produto de Fissão, Pu no Traçador	Concreto-Estocagem

TABELA 16 - REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS QUE SERÃO GERADOS PELO IPEN, NO FUTURO - Continuação

Departamento	m ³ /a	mCi/a	mrem/a	Fonte	Espécie (Tipo)	Isótopos	Gerenciamento Proposto
CEQ (MQ)	0,5	1 - 10gU	< 10	Produção de UF ₆	Papel, Vidros, PE, PVC, Filtro	U natural	Prensagem-Concreto-Estocagem
	1	10 - 100g Th	< 100	Planta de Purificação de Tório	Papéis, Vidros	Tório e Filtros	Prensagem-Concreto-Estocagem
	5	Traçador	< 10	Filtros da Ventilação	Madeira, Papel, Fibras de Vidro	Traçador	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para Rejeito Convencional
CRB (TB)	1	10	< 10	Laboratório	Papel, Vidro, PE, Carcaças	I-131, Cr-51, Co-58, T	Decaimento-Enterro
COMR (REN)	2	< 100	< 10	Prédio do Reator	Papel, PE, Material Contaminado	---	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para Rejeito Convencional
	0,1 - 0,5	10 ³ - 10 ⁴	>200-1000	Reator	Material Irradiado	---	Concreto-Estocagem
CFN (TFP)	n	e	g l	i	g i	b l	e
CEN (REN)	2	< 10	< 10	Reator-Acelerador	Papel, PE, Material Contaminado	---	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para Rejeito Convencional
	0,5	>200-10 000	>200-10.000	Reator-Acelerador	Material Irradiado, Alvos etc	---	Concreto-Estocagem
	5	< 10	< 10	Filtro da Ventilação	Madeira, Papel, Fibras de Vidro	---	Prensagem-Concreto-Estocagem ou para Rejeito Convencional
CARRM (TB)	n	e	g l	i	g i	b l	e
CARREI (TZ)	0,5	< 100	< 100	Laboratório	Vidro, PE, PVC, Papel, Alumínio	I-131, T, Vidro mais Alumínio Irradiado	Prensagem-Concreto-Estocagem
CPRD (NP)	3 - 5	> 1000	1000	Laboratório	Papel, PE, Vidro, Metal	Produtos de Fissão Todos os Isótopos	Prensagem-Concreto-Estocagem
Descontaminação do Tratamento de Rejeitos	5	< 10	< 10	Filtros de Ventilação	Madeira, Papel, Fibras de Vidro	---	Prensagem-Concreto-Estocagem - ou para Rejeito Convencional

rio, são estocados em tambores apropriados, para futuro tratamento;

- todos os rejeitos sólidos são estocados e deixados para decaimento. Estes rejeitos incluem: rejeitos combustíveis, rejeitos não combustíveis, como metais e vidros quebrados, materiais irradiados, materiais estruturais, fontes de radiação inutilizadas; e diversas cápsulas com material não identificado.

Em virtude do crescimento constante da quantidade de rejeitos que não podem ser descarregados ou tratados no momento, e têm de ser estocados, foi selecionado um sítio, no IPEN, para a estocagem temporária de rejeitos.

Os capítulos seguintes descrevem e avaliam o sítio destinado à estocagem provisória dos rejeitos do IPEN.

C A P I T U L O V

V - O SÍTIO DO IPEN

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), iniciou em 1981 os trabalhos para a construção de uma pequena instalação para estocar e prensar os rejeitos radioativos sólidos de baixa a média atividade gerados nos seus diversos departamentos.

1 - O Local:

A área do local é de 1500m^2 , com 30m de largura e 50m de comprimento. Consiste de uma área coberta, aproximadamente 900m^2 , onde está instalada uma prensa (10t), e uma área destinada à construção de 12 plataformas de concreto, de 27m^2 cada uma.

O local é totalmente cercado com telas de arame de 2m de altura, com arame farpado no topo (vide Figura 21).

2 - O Tipo de Estocagem:

A estocagem tem caráter provisório, e consiste-se de plataformas de concreto ($9 \times 3 \times 0,25\text{m}$) que têm capacidade para armazenar 112 tambores de aço-carbono galvanizado de 200l.

Atualmente, os tambores são preenchidos com rejeitos sólidos em sacos de 40l e prensados no local. Após a prensagem, os tambores são estocados em duas plataformas já construídas, ao lado de prédio da prensa. Os tambores são, então, cobertos com uma lona de plástico impermeável. Os tambores estocados não devem ultrapassar a taxa de exposição de 10mR/h a 1m de distância, conforme exigências de transporte de material 52).

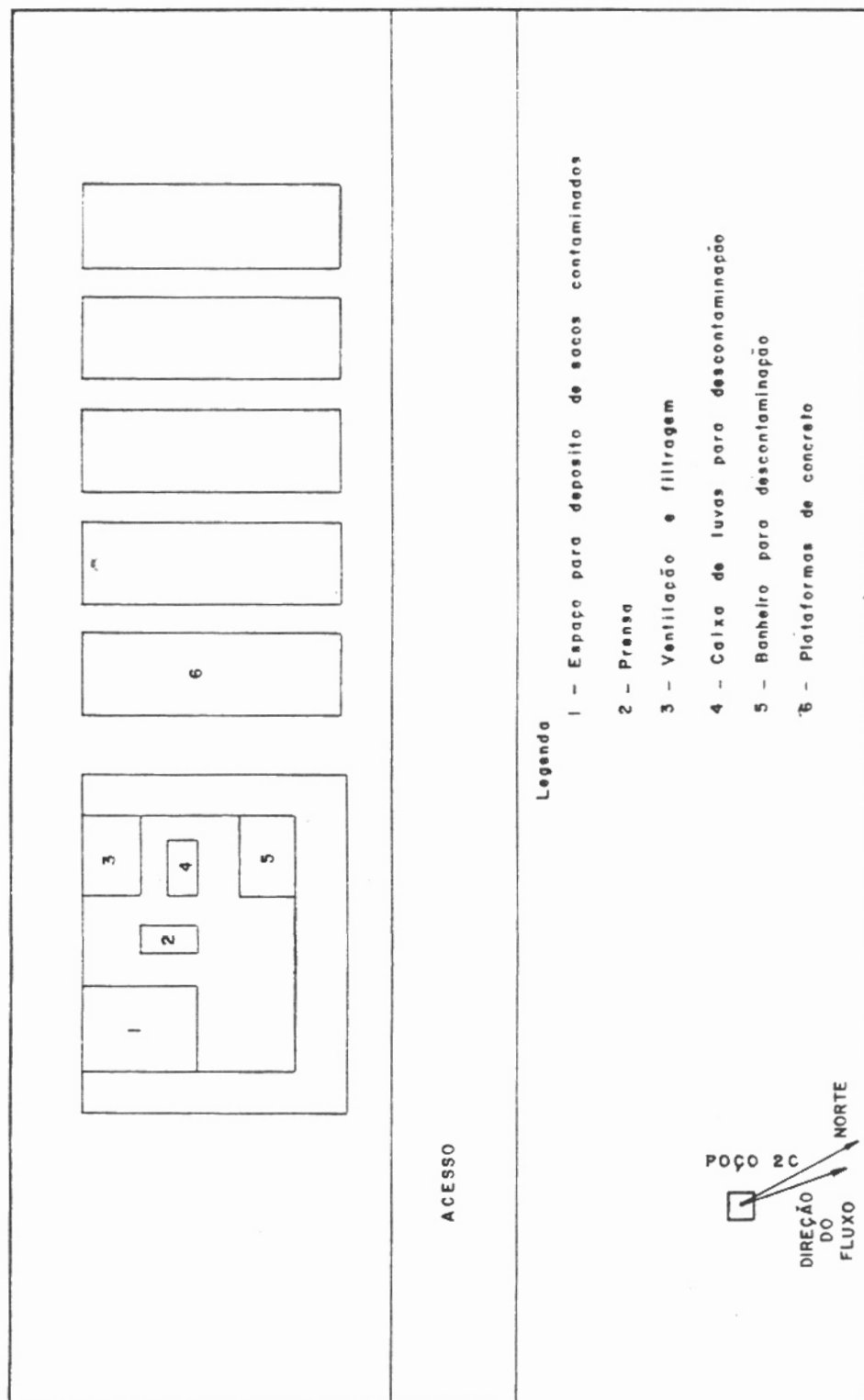


FIG.21- Planta do Sítio do IPEN e Localização do Poço 2C

3 - Situação:

O sítio está localizado ao lado do Departamento de Proteção Radiológica (NP), no IPEN-CNEN/SP, na Cidade Universitária, a aproximadamente 1860m do Rio Pinheiros, na zona Oeste de São Paulo (vide Figura 22).

4 - Clima:

O clima da região é tropical temperado, com um período seco no inverno, e um período de chuva no verão.

A precipitação média anual, em torno de 1400mm, e a evaporação média anual de 1420mm, indicam que só ocorre escoamento superficial nas épocas de chuvas intensas e irregulares. (vide Tabela 17)

A temperatura média situa-se próxima dos 19°C, sofrendo variações médias entre 13,5 e 24,5°C, durante todo o ano.

A umidade relativa do ar é de, aproximadamente 80%, favorecendo o clima úmido da região.

5 - Topografia:

O local encontra-se em um patamar a cerca de 778 m de altitude, numa encosta da colina onde está assentado o Instituto. Esta e outras colinas delineiam o terreno varzeano típico da região, com altitudes máximas que raramente ultrapassam os 800m. A superfície da várzea está na cota 730m, onde situa-se o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a Escola Politécnica, que margeiam a Raia Olímpica e o Rio Pinheiros. (vide Figura 23)

fig.22- LOCAL DE ARMAZENAMEN-
TO DOS REJEITOS RADIO-
ATIVOS.

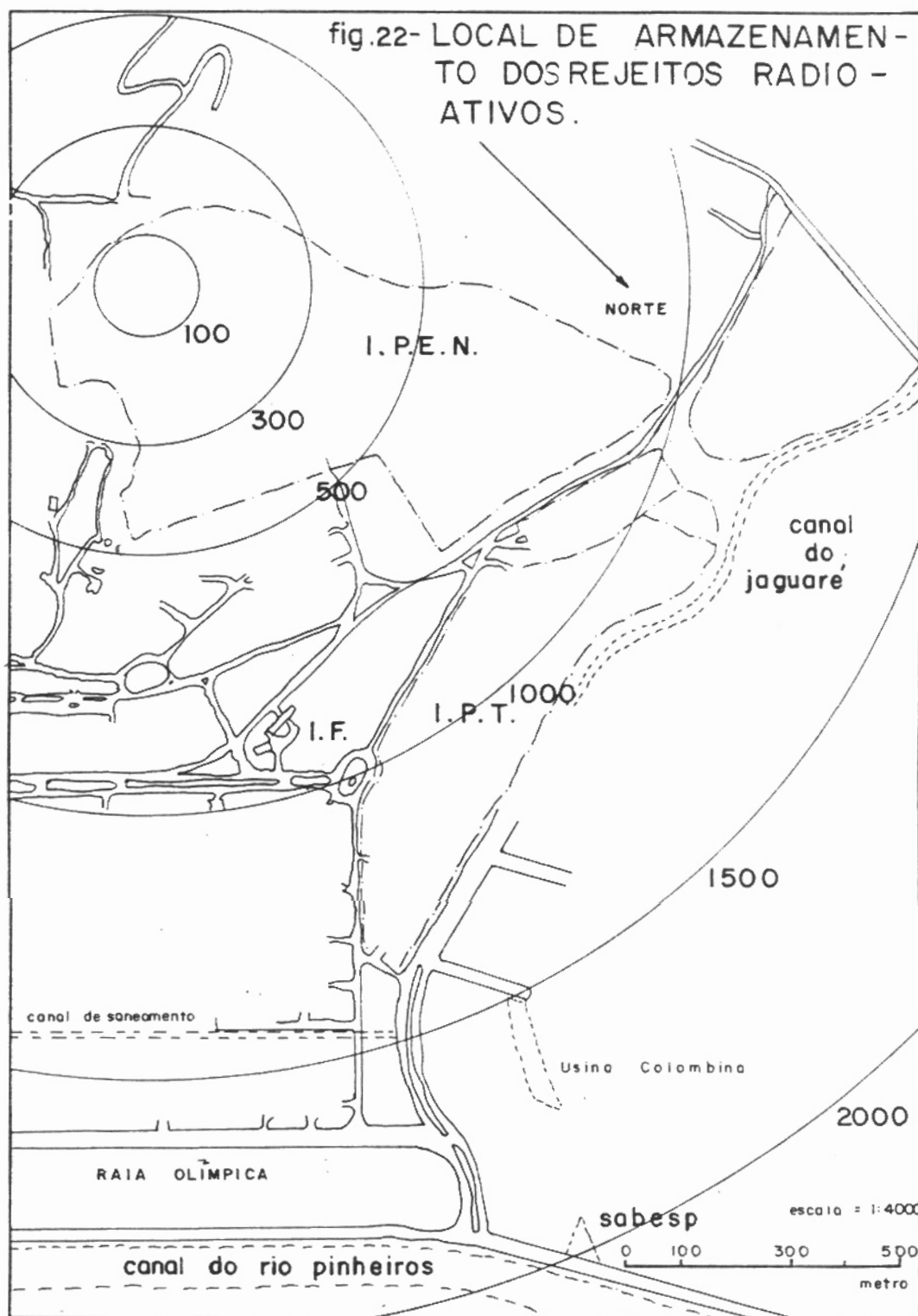
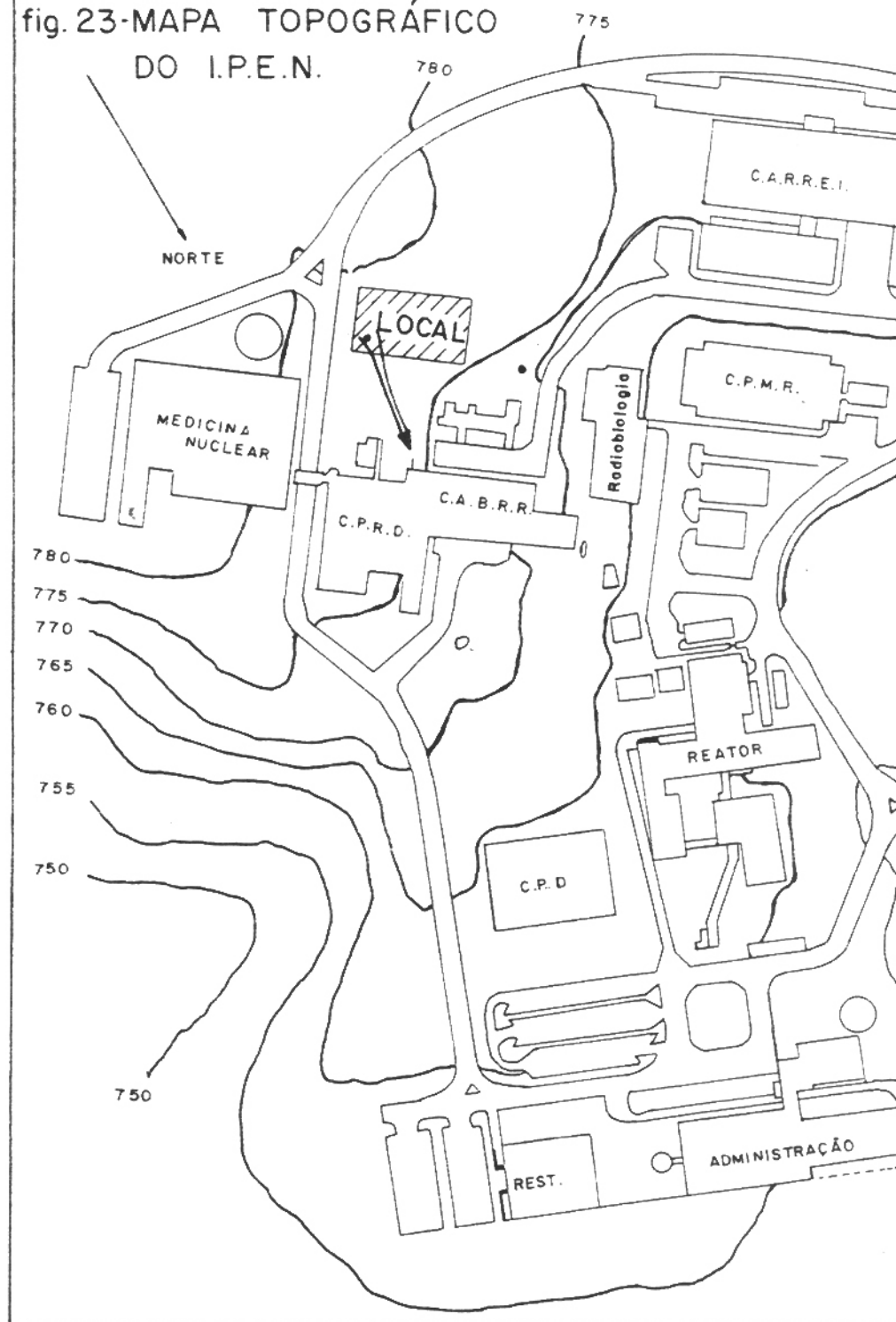


TABELA 17 - Variações do Clima na Estação "Cidade Universitária"

Precipitação (mm)				
	1979	1980	1981	1982
JAN	202,6	203,1	168,8	256,4
FEV	138,6	296,8	62,8	336,0
MAR	112,3	144,9	127,7	148,2
ABR	68,3	99,5	87,0	43,7
MAI	97,0	2,8	42,1	57,5
JUN	3,1	44,5	67,0	204,6
JUL	43,4	21,5	49,0	38,4
AGO	70,3	16,0	14,5	72,7
SET	134,7	56,5	17,5	11,3
OUT	134,6	58,9	172,1	177,7
NOV	184,9	128,1	166,3	154,4
DEZ	123,2	290,8	100,5	248,4
TOTAL	1313,0	1363,4	1075,3	1749,3

Evaporação				
	1979	1980	1981	1982
JAN	151,1	144,3	126,7	157,48
FEV	130,8	130,6	152,8	181,80
MAR	134,6	145,2	137,6	122,70
ABR	116,1	94,4	110,7	123,90
MAI	87,5	90,5	85,2	92,69
JUN	78,5	74,7	72,4	66,30
JUL	86,6	95,4	76,3	184,94
AGO	98,8	95,9	100,4	106,64
SET	96,7	107,3	141,6	151,50
OUT	151,2	164,6	111,4	146,63
NOV	145,6	145,1	135,8	144,0
DEZ	135,8	166,0	154,8	97,96
TOTAL	1413,0	1454,2	1405,8	1476,6

fig. 23-MAPA TOPOGRÁFICO
DO I.P.E.N.



6.- Demografia Local:

Uma representação da demografia do local ⁽¹¹¹⁾ de disposição pode ser vista na Figura 24, que representa a distribuição radial da população num raio de 3 Km do local.

7 - Geologia Regional:

A região geológica onde situa-se o sítio é caracterizada por sedimentos Terciários da Bacia de São Paulo, onde predominam ⁶⁵⁾ as argilas pouco arenosas. A coluna estratigráfica ³²⁾ regional pode ser generalizada como segue:

- a) Sedimentos aluvionares quaternários geralmente argilosos com variações até 10m de profundidade;
- b) Sedimentos Terciários flúvio-lacustres e fluviais da Bacia de São Paulo. A sua espessura varia de 40 a 150m, tornando-se menos espessa na Região Oeste;
- c) Embasamento Cristalino de gnaisses do Pré-Cambriano, com ocorrência de fendilhamentos e fraturas entre 70 e 280m de profundidade.

8- Geologia Local:

No terreno onde se situa o sítio, predominam as argilas pouco arenosas (vide Figura 25). A camada superficial é formada por uma argila silto-arenosa, avermelhada, com capacidade de troca-catiônica entre 0,7 e 2,0meq/100g ²⁸⁾, devido à predominância de minerais argilosos como a caulita e a illita.

Esta camada é pouco espessa (3,5 a 6,0m), e é seguida por um leito de areia de granulação fina a média, contendo uma pequena fração de argila, de espessura entre 30cm e 4,0m.

Em seguida, encontra-se uma camada argilosa de 6,0

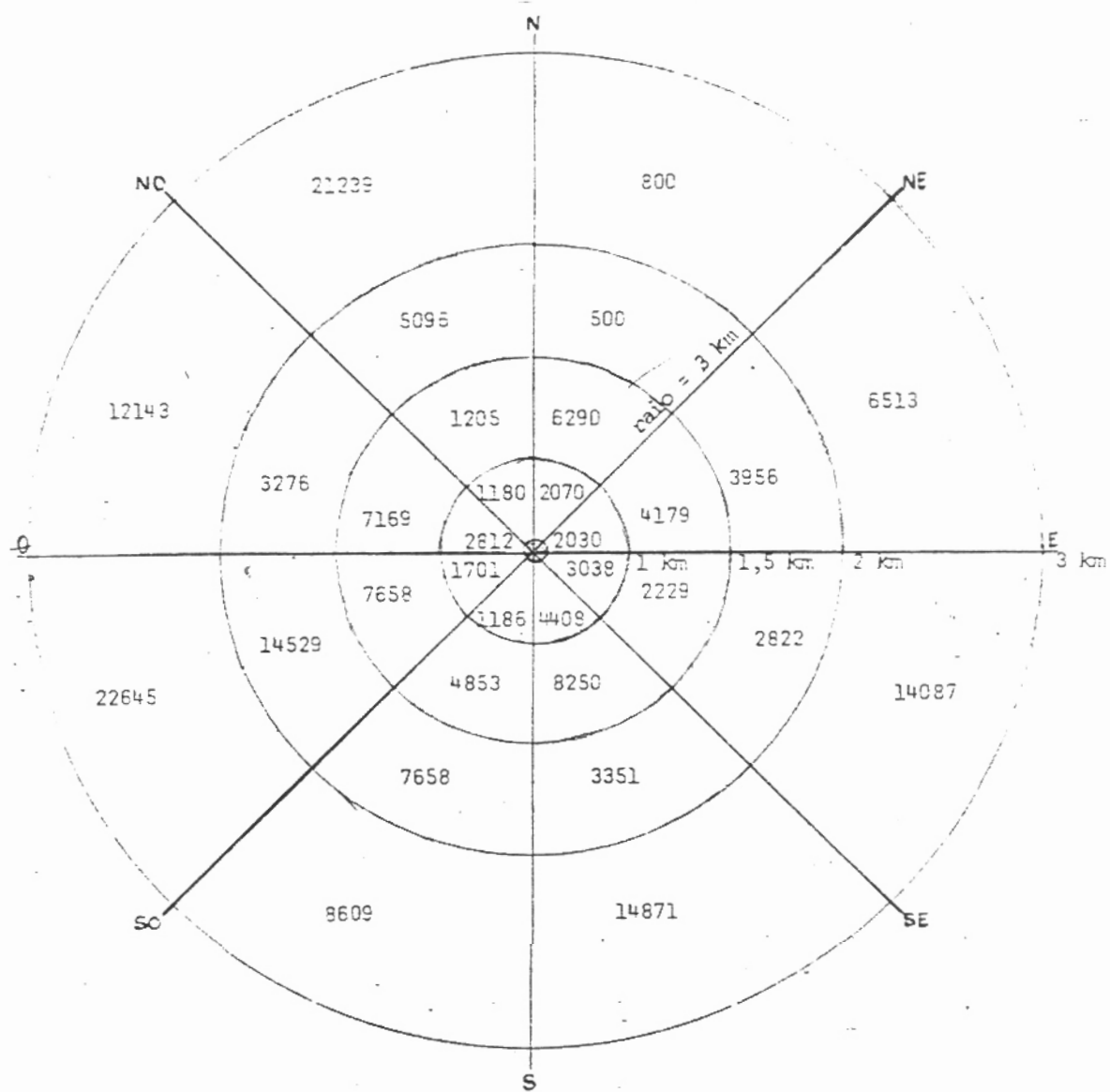
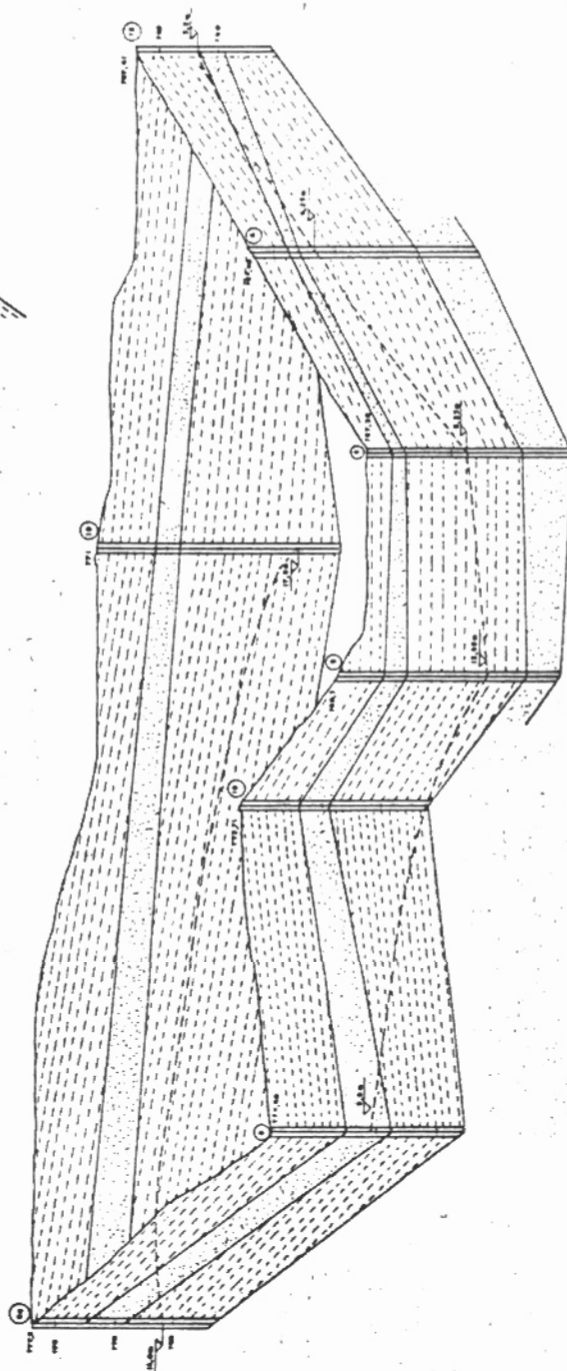
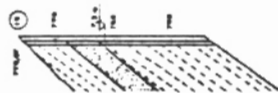


Fig.24- Demografia Local



LEGENDA

ARGILA SILTO ARENOSA

ARGILA FINA A MÉDIA

AREIA

ESCALA - HORIZONTAL 1:100

VERTICAL 1:20

FIG. 29 - PERFIL GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DA REGIÃO DOS POÇOS 16 E 20.

a 8,0m de espessura, que pode estar intercalada por lentes de areia fina de 5,0 a 30cm.

A camada argilosa é seguida por uma zona de transição entre argilas arenosas e areias argilosas, que precedem a zona permeável formada por rochas fragmentadas e pequenos grãos de quartzo.

A rocha matriz do local situa-se entre 18,5 e 21m, servindo de suporte para a zona alterada.

9- Hidrografia e Hidrologia Regional:

O sítio situa-se entre o Canal do Jaguaré e o Rio Pirajussara, que são afluentes do Rio Pinheiros. Este Rio está canalizado artificialmente para a Região Sul de Santo Amaro, onde desemboca no Reservatório Billings. (vide Figura 26)

O Rio Pinheiros tem uma vazão média de $70\text{m}^3/\text{s}$, e o Reservatório Billings tem uma vazão de $75\text{m}^3/\text{s}$, com 1,2 bilhões de metros cúbicos de capacidade, onde são despejados os esgotos de São Paulo.

O sítio de estocagem está sobre um lençol subterrâneo que flutua entre os níveis de 6,45 a 11m (Poço 2C) e 10,5 a 16,5m (Poço 1B). (vide Figura 27)

Foram construídos quatro poços para a avaliação geohidrológica do IPEN. Dois poços, 2C e 1B foram perfurados, um dentro do sítio de estocagem e outro a 20m deste. Estes poços estão localizados na Região Sul do Instituto entre os contornos topográficos de 780 e 770m (Figura 23). Os outros dois poços, AC e DC, estão localizados na Região Noroeste do Instituto, entre os níveis altimétricos de 745 e 750m. (Figura 44).

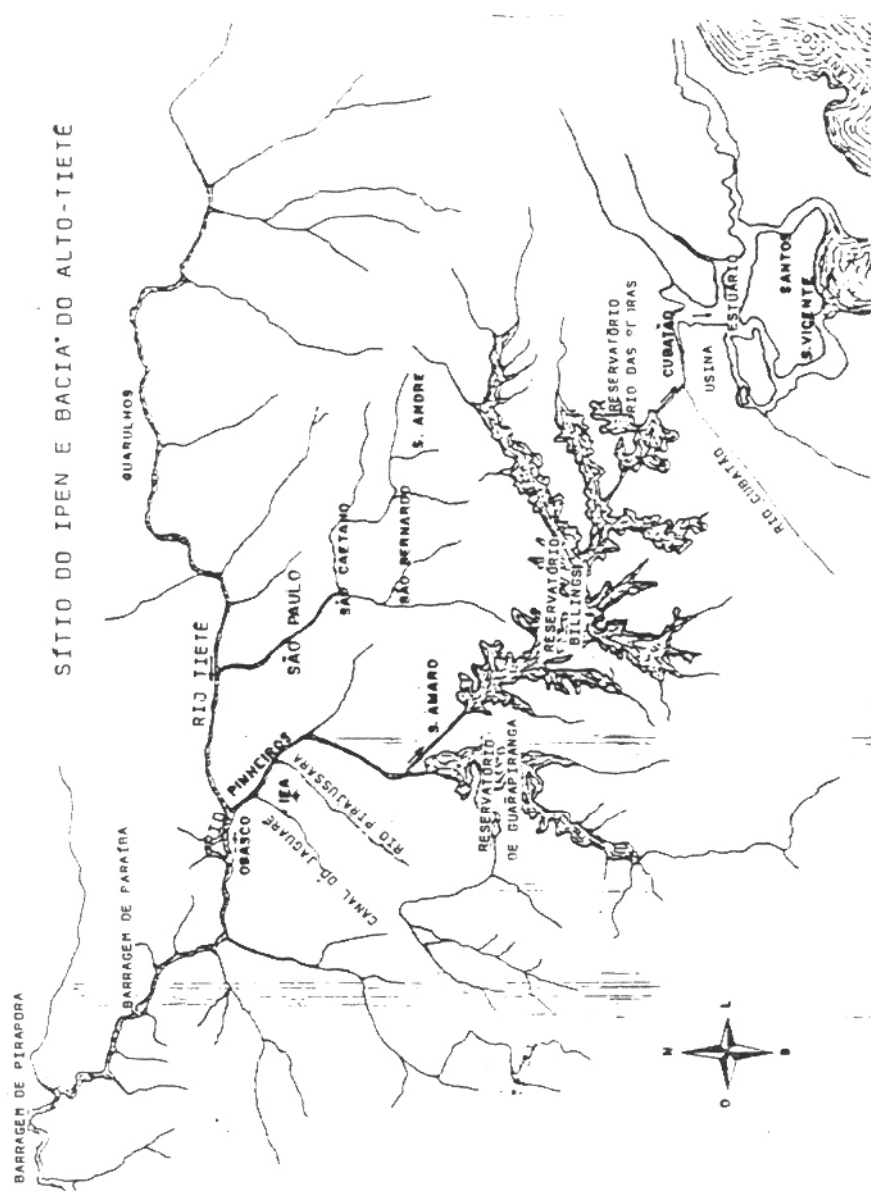


Fig.26- Hidrografia do IPEN (IEA)

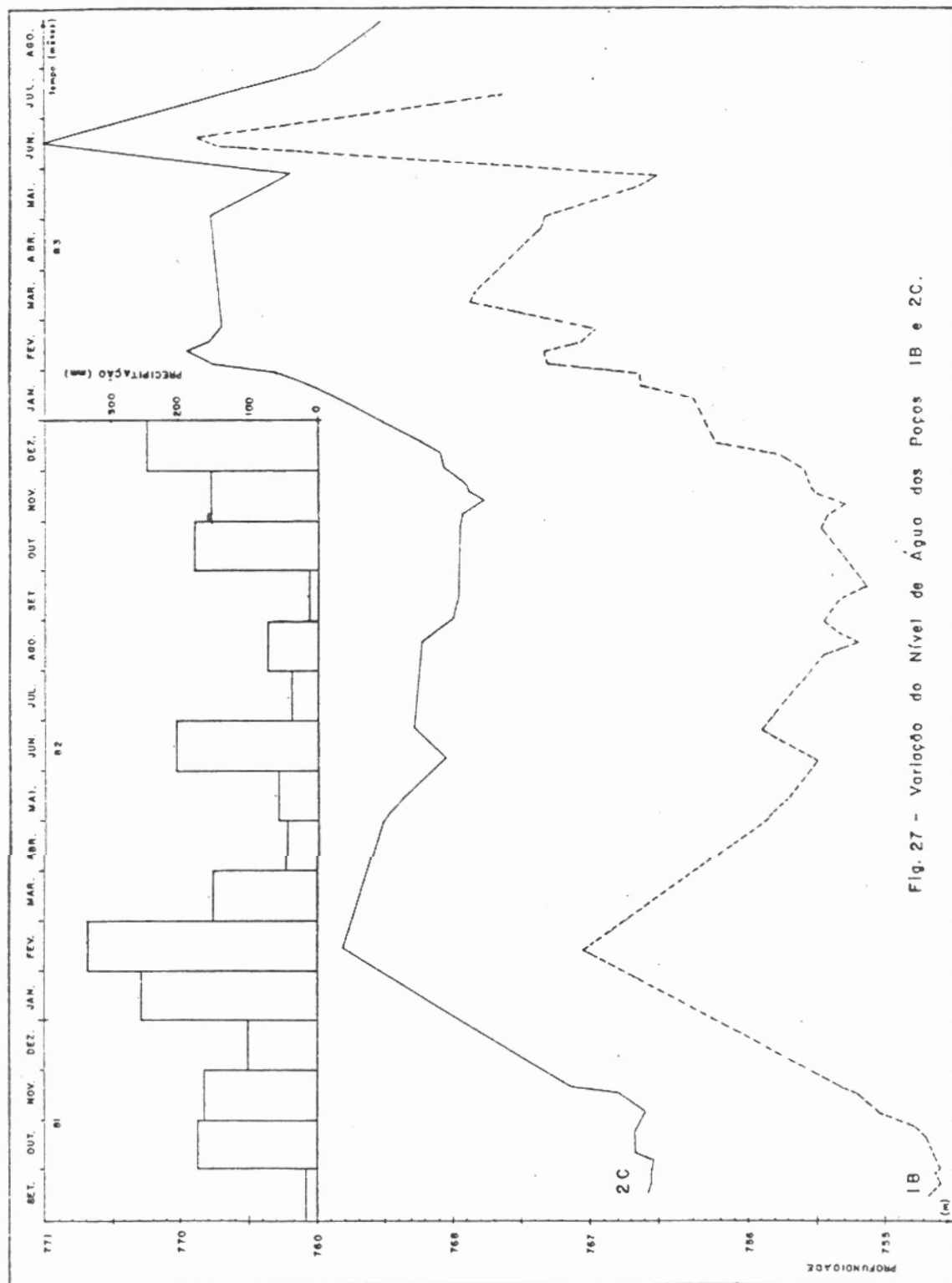
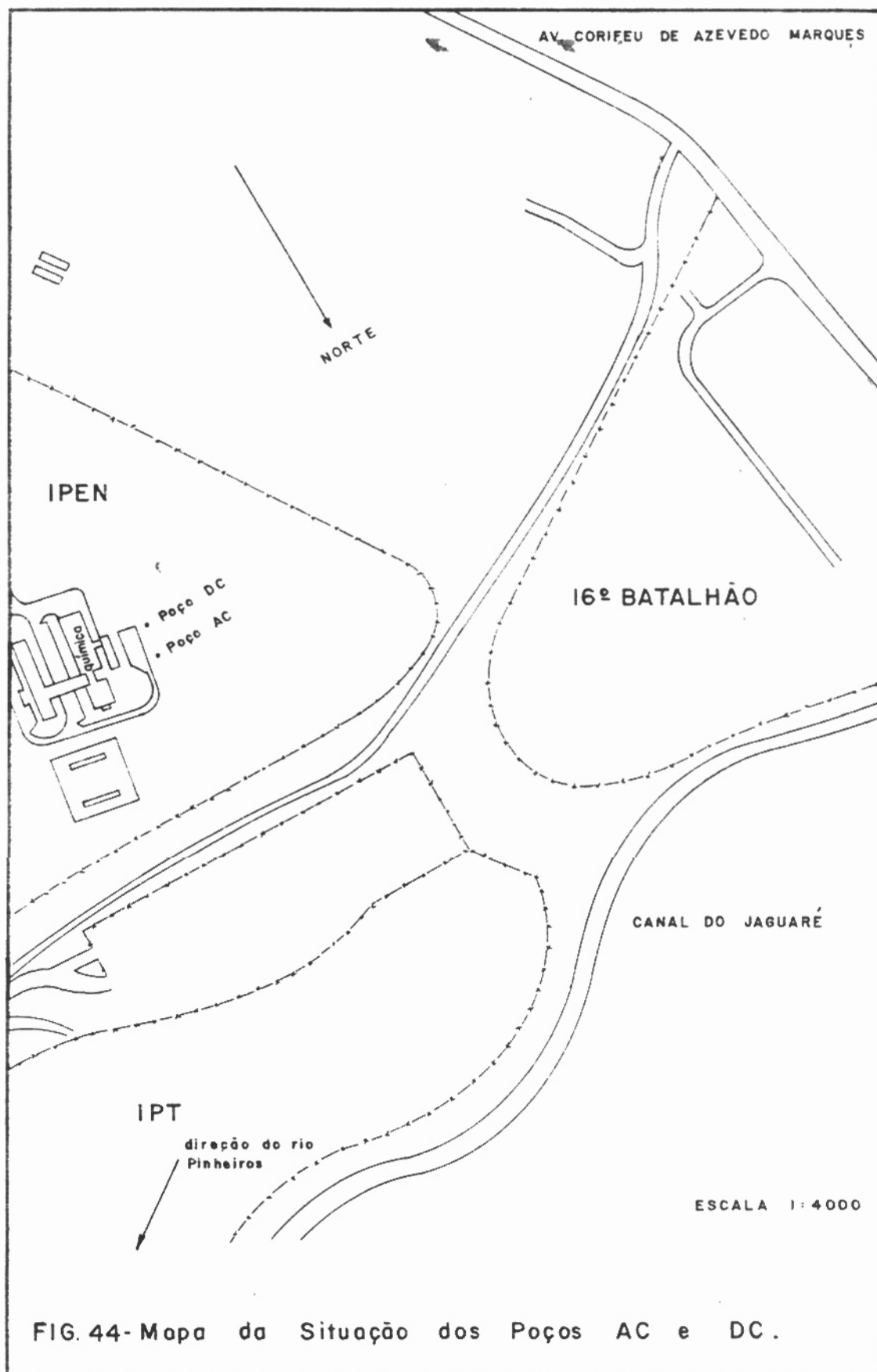


Fig. 27 - Variação do Nível de Água dos Poços IB e 2C.



C A P Í T U L O V I

VI - TRABALHO EXPERIMENTAL

1 - Introdução:

Neste capítulo são apresentados os métodos, teoria e aplicação, descrição dos trabalhos de campo, e o processamento dos dados e resultados obtidos das diversas análises geohidrológicas realizadas para a caracterização do sítio do IPEN .

Foram construídos quatro poços de monitoração, (1B, 2C, AC, DC), para executar as medições dos parâmetros hidrológicos e do perfil geológico nas vizinhanças do sítio.

Os resultados da velocidade de fluxo (vf) e da direção do fluxo da água subterrânea são elaborados com maiores detalhes porque oferecem uma base para avaliar a velocidade e a direção que uma contaminação acidental do sítio se espalharia, servindo para estimar o tempo de trânsito do contaminante e o seu caminho crítico mais provável.

Foi feita uma análise das amostras de solo de cada poço construído, para avaliar a geologia local do sítio e vizinhanças. Estes dados são importantes para investigar as propriedades físicas do solo (permeabilidade, porosidade, etc.) , e para fornecer uma informação estratigráfica detalhada das camadas dos solos, que auxiliam na análise da retenção de migrantes radioativos.

Os dados dos níveis d'água geram informações sobre o lençol subterrâneo e sua flutuação com o tempo.

A análise química da água (conteúdo de sais, pH , condutividade, etc.), é importante para o estudo das reações químicas dos contaminantes com o solo e com a água subterrânea.

A perfilagem gama-natural é uma investigação usada

normalmente em sondagens. Os seus resultados auxiliam na definição estratigráfica das camadas de areia, argila e rochas, contribuindo, também, para a verificação de eventuais falhas na construção dos poços.

A determinação da atividade gama total do solo e da água subterrânea do sítio resulta em dados importantes por servirem para indicar o nível pré-operacional da radioatividade do sítio, como referência e controle durante o seu tempo operacional.

2. Construção dos Poços de Monitoração:

Os poços de monitoração foram construídos por perfuração rotativa usando-se uma broca pneumática refrigerada a água e lubrificada com lama bentonítica.

As perfurações foram executadas até encontrar a rocha suporte ($\pm 20m$) e foram retiradas amostras de solo a cada 50cm.

As amostras foram analisadas por métodos manuais e visualmente, donde construíram-se os perfis geológicos das Figuras 28, 29 e 43.

Os poços foram construídos seguindo-se a padronização da Figura 34.

O diâmetro perfurado foi de 12" (30,5cm) e os poços foram revestidos com um tubo de P.V.C. rígido de 4" (10,16cm) de diâmetro e seções de 6m de comprimento rosqueadas.

Foram rosqueadas seções de tubo perfuradas conforme detalhe da Figura 30, na profundidade das camadas permeáveis analisadas durante a amostragem (vide detalhes das Figuras 28, 29 e 43).

O espaço entre o tubo de revestimento e o diâmetro total do poço foi preenchido com areia graduada ($\phi \approx 6mm$), formando-se assim uma zona de transição entre a permeabilidade de formação e a do filtro de P.V.C. chamada pré-filtro. Os diâmetros e a disposição concêntrica das camadas podem ser vistos no detalhe da

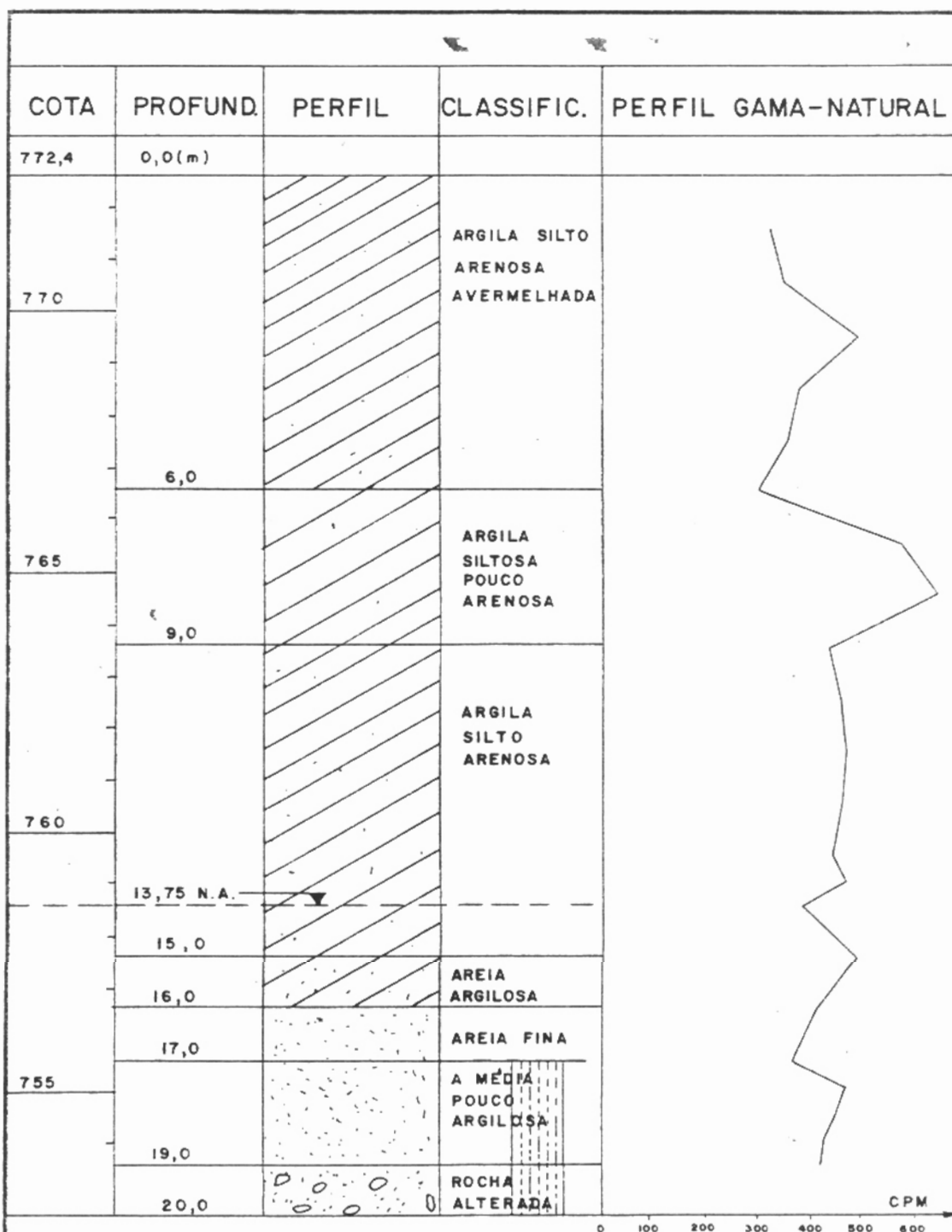


FIG. 28 - MAPA DO PERFIL GEOLÓGICO E ANÁLISE
GAMA NATURAL DO POÇO 1B

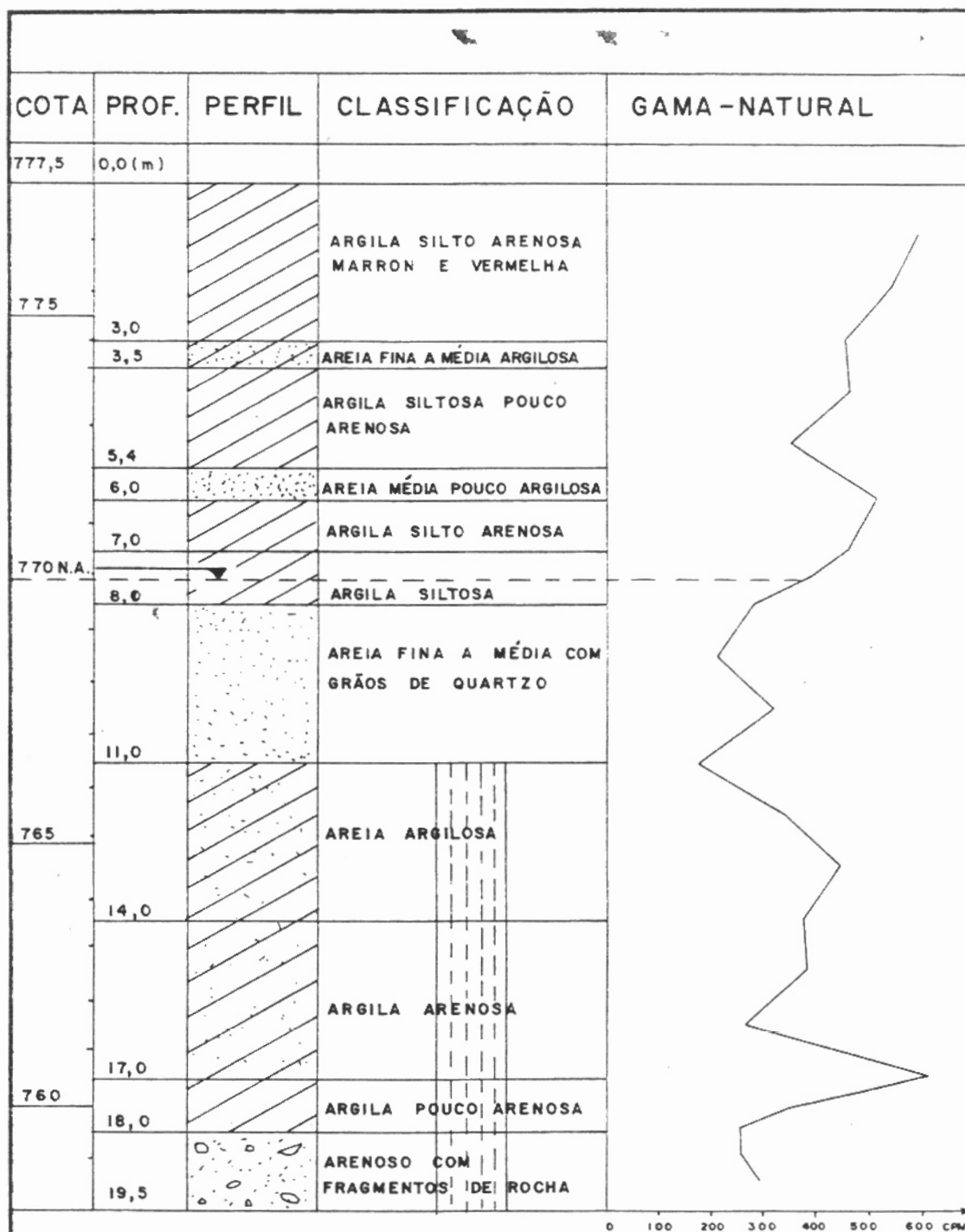


FIG.29 - MAPA DO PERFIL GEOLÓGICO E ANÁLISE
GAMA-NATURAL DO POÇO 2C.

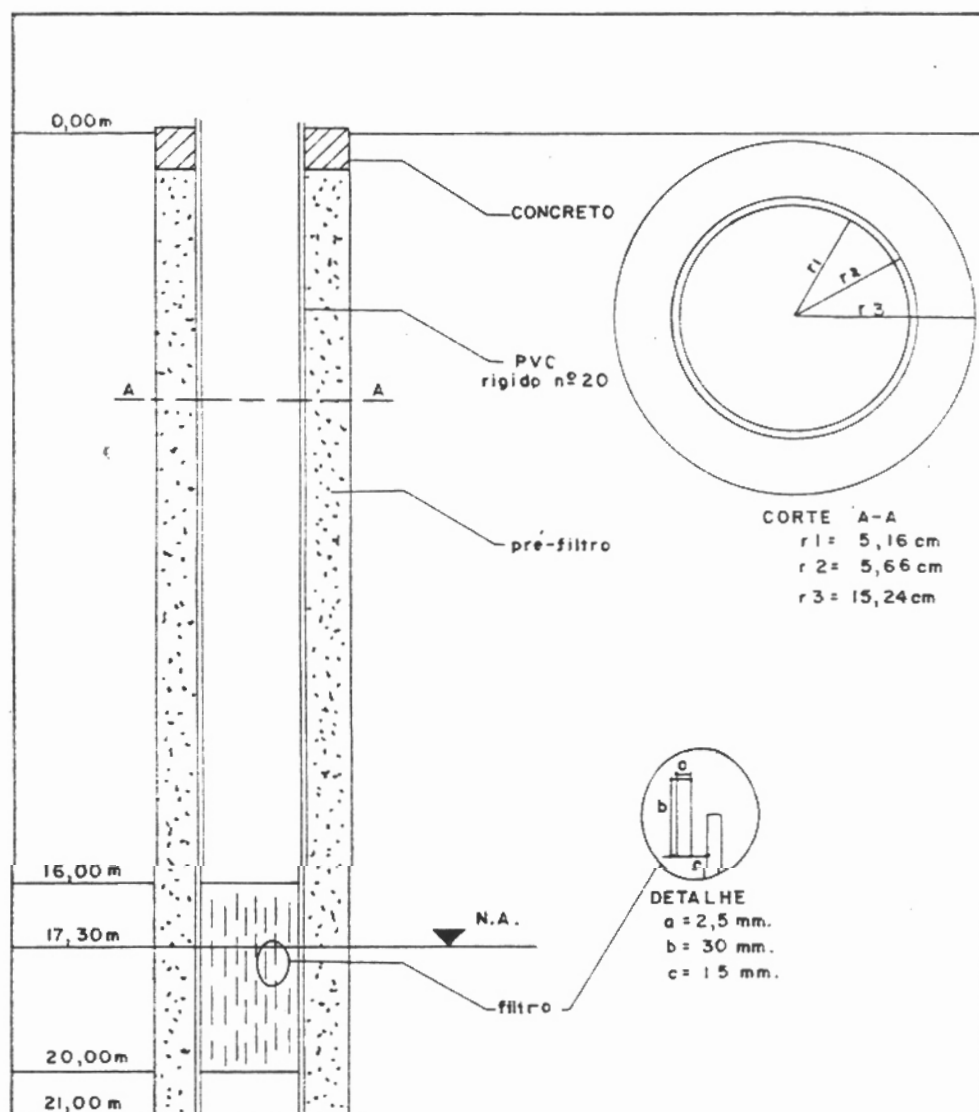
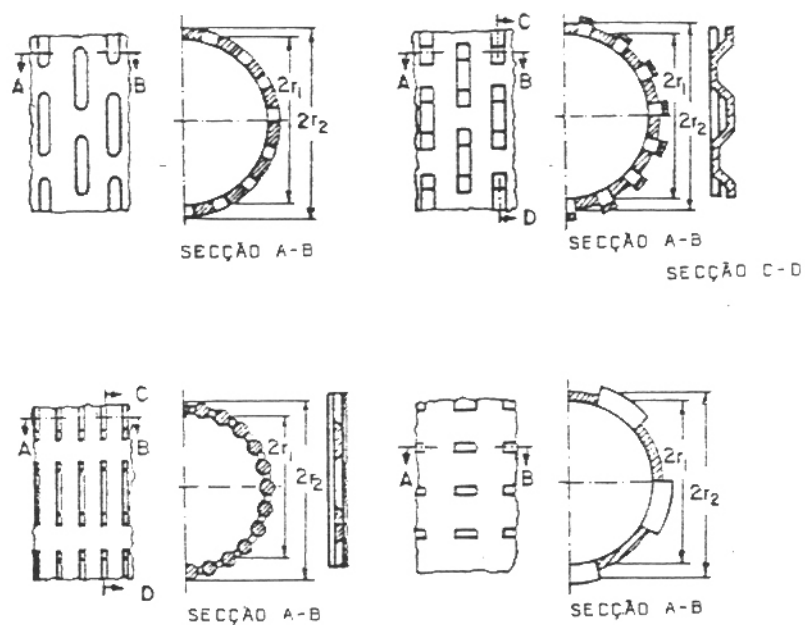


FIG. 34 - DETALHES DA CONSTRUÇÃO DOS POÇOS (CPRD)



PERFURAÇÕES RECOMENDADAS PARA FILTROS

Figura 34 .

Para proteger a infiltração de água nos poços, foi feita uma impermeabilização nos 50cm iniciais com pasta de cimento, e construiu-se uma pequena plataforma quadrada de 1 m^2 como proteção adicional.

3. Determinação da Velocidade de Fluxo e Direção da Água Subterrânea:

A determinação da velocidade de fluxo e da direção da água subterrânea é feita através da técnica de marcação da água com um traçador radioativo.

As técnicas de traçadores foram inicialmente usadas com substâncias convencionais, como o Cloreto de Sódio (Na Cl) e os corantes, como a Fluorescina e a Rodamina-B.

Contudo, estas técnicas dependem de propriedades como a cor, densidade, condutividade ou índice de refração que, na prática, podem sofrer alterações significativas com as condições do meio.

Os traçadores radioativos, em virtude de suas propriedades de distinção a nível atômico (10^{-18} g/ml), superam milhares de vezes a sensibilidade dos traçadores convencionais, e apresentam as seguintes vantagens:

- Podem ser seletivos;
- Evitam medições ambíguas;
- São facilmente detectados;
- Utilizam-se de uma estatística simples.

Os traçadores, de um modo geral, devem comportar-se química e fisicamente idênticos à substância marcada, de modo a não alterar o comportamento do sistema com a sua presença. Entretanto, ele deve, também, possuir uma propriedade que o diferencie do material marcado, de modo a facilitar a sua identificação.

Portanto, a escolha do traçador dependerá do tipo particular do experimento onde ele será usado. Pode acontecer que haja um só traçador que satisfaça às condições da experiência ou, que haja uma ampla escolha do traçador. Neste caso, devemos considerar:

- Disponibilidade e custo;
- Meia-vida;
- Tipo e energia da radiação;
- Risco de radiação;
- Facilidade de detecção e de aplicação, etc.

Para a determinação da velocidade de fluxo da água subterrânea, usam-se radionuclídeos emissores gama de meia-vida relativamente curta, em uma forma química que não seja adsorvida pela sonda, filtro, pré-filtro ou pelo aquífero.

Na prática, até o momento, o Bromo-82, na forma de Brometo de Amônio ($\text{NH}_4^{82}\text{Br}$), o Cromo-51, na forma de EDTA (Ácido Etileno Diamino Tetra Acético), e o Iodo-131, na forma de Iodeto de Sódio (Na^{131}I), tem provado a sua adequabilidade.

Em alguns destes compostos recomenda-se a adição de Trissulfato de Sódio ou Hidróxido de Amônio, para manter os elementos radioativos no estado líquido.

A concentração do carregador, caso não seja possível evitá-lo, deve ser mantida a mais baixa possível.

Para determinar a direção do fluxo da água subterrânea, podemos usar radionuclídeos com energias gama da ordem ⁽¹²⁾ de 0,4 a 0,7 MeV, de meia-vida variando de média a curta, em uma forma química que seja adsorvida pela paredes internas do filtro, pelo pré-filtro e aquífero.

Até alguns anos atrás, utilizava-se o Bromo-82 e o Iodo-131 (em formas químicas reativas) como radiotraçadores preferidos. Hoje, dá-se preferência a traçadores mais adsor-

ventes como o Ouro-198, na forma de Cloreto de Ouro ($^{198}\text{Au Cl}_3$), e Cromo-51, na forma de Cloreto de Cromo ($^{51}\text{Cr Cl}_3$).

As atividades a serem usadas dependerão das condições experimentais, das dimensões do filtro, da velocidade do fluxo, da sensibilidade do detector, etc. Estes parâmetros devem ser determinados em calibrações de laboratório ou em experiências anteriores e as atividades não devem ultrapassar as concentrações máximas permissíveis na água (MPCw) no ponto de uso mais próximo.

A tabela 10 indica os nuclídeos mais usados na determinação da velocidade e direção de fluxo da água subterrânea, assim como suas características e máximas concentrações permissíveis.

TABELA 10 - Traçadores mais utilizados na hidrologia e concentrações máximas permissíveis.

Radionuclídeos	Composto	Meia-Vida	Radiação (MeV)		MPCw($\mu\text{Ci/cm}^3$)
			Máxima β	Energia γ	
Bromo-82	$\text{NH}_4^{82}\text{Br}$ (vf)	35,6 h	0,44	0,78(83%)	3×10^{-4}
	$^{82}\text{Br Cl}_3$ (e)				
Cromo-51	^{51}Cr -Edita (vf)	27,8 d	-	0,32(9%)	2×10^{-3}
	$^{51}\text{Cr Cl}_3$ (e)				
Iodo-131	Na^{131}I (vf)	8,07 d	0,81	0,36(82%)	6×10^{-5}
	Ag^{131}I (e)				
Ouro-198	$^{198}\text{Au Cl}_3$ (e)	2,7 d	0,96	0,41(95%)	5×10^{-5}
Trítio(^3H)	H^3HO	12,26a	0,018	-	3×10^{-3}

3.1 - Velocidade de Fluxo da Água Subterrânea:

3.1.1 - Teoria:

3.1.1.1 - Velocidade de Filtração (Vf):

3.1.1.1.1 - Definição (38) (87):

É a velocidade média de escoamento da água subterrânea através de um solo saturado, definida como a vazão de água subterrânea (Q), que passa através de uma seção transversal (A) do aquífero. Ela é, portanto, uma medida de produção de um aquífero e apresenta uma das quantidades básicas da hidrologia.

$$V_f = Q/A$$

3.1.1.1.2 - Métodos para a Determinação da Velocidade de filtração:

Os métodos clássicos para a medição de velocidade de filtração, em geral usam a lei de Darcy:

$$V_f = K_3 I$$

determinando o coeficiente de permeabilidade K_3 (igual a K , constante de permeabilidade) do aquífero e o gradiente hidráulico I do fluxo da água subterrânea.

Embora seja fácil determinar o gradiente hidráulico I , a determinação de K_3 é difícil, na maioria das vezes. Utilizando-se testes convencionais como o de bombeamento, o de análises de laboratório, e outros. A determinação de K_3 torna-se questionável, por alterarem as condições normais do aquífero, através de bombeamento e de condições ideais de laboratório, além de serem investigações relativamente caras.

A velocidade de filtração, também pode ser determinada a partir da velocidade real entre dois poços. Esta velocidade é uma grandeza escalar, que leva em conta a porosidade efetiva ⁽¹⁰³⁾ (n) e pode ser obtida da seguinte relação:

$$V_f = nV \quad V = \text{velocidade real} \quad (1)$$

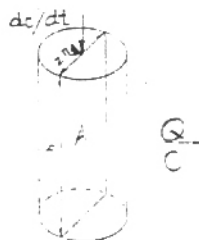
Este método é útil quando se conhece a velocidade real através de métodos convencionais.

3.1.1.2 - Fundamentos do Método de Diluição:

O fundamento deste método foi exposto pela primeira vez por O.J. Kocherin, em 1916. Ele foi desenvolvido para traçadores como o Cloreto de Sódio (NaCl), mas permaneceu no obs-curo até o advento dos radiotraçadores, quando sofreu um grande desenvolvimento.

O método de diluição consiste-se da marcação de uma seção do poço, onde está colocado o filtro, com um traçador ra dioativo. O fluxo da água do lençol subterrâneo leva a nuvem de traçador , fazendo com que diminua a sua concentração no volume marcado. Esta variação de concentração é percebida por intermédio de uma sonda nuclear que contém um detector de ra diação , e é instalada na profundidade onde foi feita a inje-ção. Como a variação de concentração é proporcional às varia-ções de atividade do traçador, podemos avaliar a taxa de perda de concentração no volume medido, através das contagens obti-das na superfície.

Ao marcarmos um volume (V), volume de diluição, com um traçador, a sua concentração " C ", decrescerá com o fluxo da água subterrânea não marcada. Supondo que o fluxo horizontal seja constante, e o traçador seja distribuído homogeneamente em todo o volume de diluição, podemos ter:



VOLUME DE DILUIÇÃO ESQUEMÁTICO, PARA O CÁLCULO
DA VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

Figura 31 - Volume de Diluição.

Seja Q a vazão que passa pelo volume (V), então:

$$V \frac{dc}{dt} = - QC, \text{ onde } \frac{dc}{C} = \frac{Qdt}{V}.$$

Integrando-se em relação ao tempo, teremos:

$\ln C/Co = - Qt/V$, como $Q = VgA$, para Vg = velocidade de diluição e A = área da seção longitudinal do volume de diluição (V) obteremos:

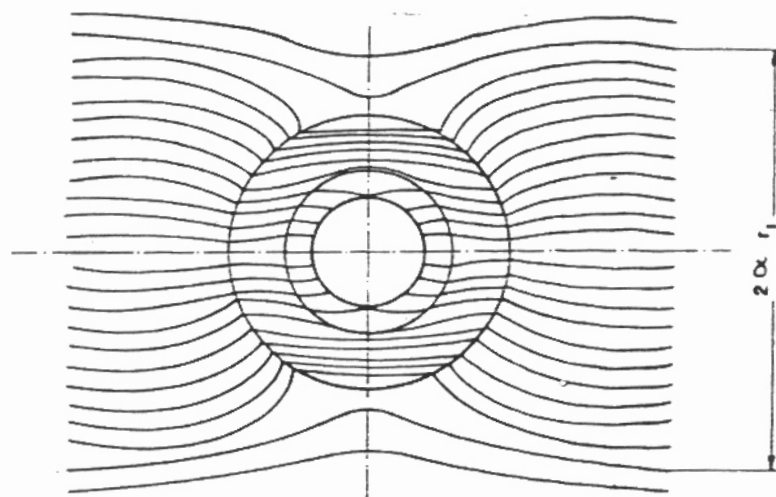
$$Vg = - \frac{V}{At} \ln C/Co \quad \begin{array}{l} C = \text{concentração no tempo } t=t \\ Co = \text{concentração no tempo } t=0 \end{array} \quad (2)$$

3.1.1.3 - Problemas e Objetivos:

Este método, quando empregado, pode conduzir a certas dificuldades por duas razões:

a) Se desejarmos obter a velocidade de filtração (Vf) da velocidade de diluição (Vg), devemos considerar o grau com que o poço e o filtro de areia que o envolve distorcem as linhas de fluxo (Figura 32). Além disso, a corrente no local de medição é afetada pelo distúrbio causado pela introdução da sonda para a medida da concentração do traçador. (vide item 3.1.1.7).

b) De um modo geral, a diluição do traçador no interior do volume de diluição não é o resultado proveniente só da velocidade horizontal do fluxo da água subterrânea. Inclui, também, o fluxo vertical da água subterrânea no filtro e na



r_1 = RAIO INTERNO DO FILTRO
 PERTURBAÇÕES DAS LINHAS DE FLUXO CAUSADAS PELA PRESENÇA DO POÇO

sua vizinhança (devido a diferença de pressão dentro do aquífero), o fluxo por convecção (devido a temperatura e concentrações diferentes), o fluxo por difusão molecular do traçador, e o fenômeno de mistura, que afetam a diluição do traçador.

Considerando-se todos os fatores, a velocidade de diluição (V_g) medida, será dada por:

$$V_g = \alpha \cdot V_f + V_k + V_s + V_d + V_m \quad (3)$$

onde: V_f = velocidade de filtração

V_k = velocidade de diluição devido a densidade de convecção

V_s = velocidade de diluição devido a correntes verticais

V_d = velocidade de diluição devido à difusão molecular

V_m = velocidade de diluição devido ao fenômeno da mistura.

O fator alfa é a relação entre a largura da nuvem de traçador que passa dentro do aquífero, e o diâmetro interno do filtro (Figura 32), contanto que V_k , V_s e V_m possam ser desprezados. O valor de alfa leva em conta a distorção das linhas de fluxo, devido à presença do poço, e sua relação seria melhor interpretada, como:

$$\alpha = Q_p / Q_a$$

onde: Q_p é a vazão no poço, e Q_a é a vazão numa seção transversal da formação.

Se considerarmos somente a velocidade de diluição proveniente do fluxo horizontal da água, teremos:

$$V_f = - \frac{V}{\alpha \Delta t} \ln C / C_o \quad (4)$$

É óbvio que em algumas condições experimentais, o efeito de certas componentes é desprezível, e os cálculos po-

dem seguir de acordo com a equação (4).

Mesmo na ausência de todos os outros fatores. (V_k , V_s , V_m) a difusão existe, mas a sua influência diminui na medida em que V_f cresce.

Supondo que a difusão ocorra uniformemente, e radialmente a partir do eixo do poço para todos os lados, define-se (43) V_d , como:

$$V_d \equiv \frac{\pi D}{r_1} \equiv 10^{-5} \text{ cm/s} \equiv 0,01\text{m/d} \quad (5)$$

onde D , é o coeficiente de difusão para a solução do traçador e r_1 é o raio interno do filtro.

Se o valor estimado de V_f for muito maior que $0,3\text{m/d}$, os efeitos de difusão podem ser desprezados. Caso V_f seja menor que $0,3\text{m/d}$, pode-se corrigir V_f pela fórmula:

$$V_f = \frac{V_g - V_d}{\alpha} \quad (6)$$

Se assumirmos, que as condições foram satisfeitas, para poder supor V_k , V_s e V_m iguais a zero.

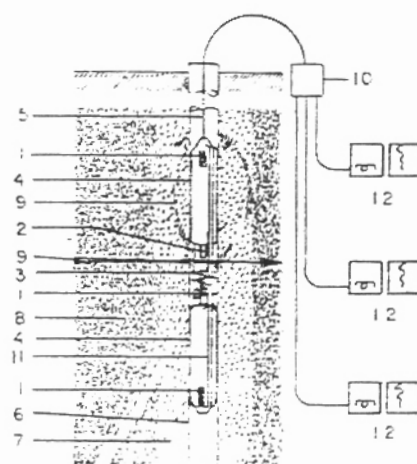
O parâmetro que inclui a diluição por velocidades verticais, V_s , pode ser eliminado pelo uso de selantes acima e abaixo do volume de diluição (Figura 33), ou empregando seções de filtro curtas em relação à profundidade do poço. (26)

Esta medida aumenta a resistência do fluxo vertical (Q_v), de modo que o fluxo horizontal (Q_h) predomina. Como a vazão total (Q) é:

$$Q = Q_v + Q_h$$

Podemos aproximar Q de Q_h .

A velocidade devido às correntes por densidade de convecção (V_k), pode ser desprezada, se escolhermos um traçador que tenha baixa concentração e não tenha diferenças acen-



SISTEMA DE MEDIDA RECOMENDADO PARA A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS

- 1- DETETOR DE CINTILAÇÃO
- 2- APARELHO DE INJEÇÃO DO TRAÇADOR
- 3- APARELHO DE MISTURA (MOLA)
- 4- SELANTE DE BORRACHA
- 5- CABO ELÉTRICO À PROVA D'ÁGUA
- 6- FILTRO
- 7- PRÉ-FILTRO
- 8- AQUÍFERO
- 9- LINHA DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
- 10- CONTROLES DE MISTURA E INJEÇÃO NA SUPERFÍCIE
- 11- TUBO DE PRESSURIZAÇÃO

tuadas de temperatura, com o meio aquoso. Aconselha-se⁽¹²⁾ concentrações menores do que 10^{-4} moles/l para o Brometo de Amônio, e diferenças de temperatura abaixo dos $0,1^{\circ}\text{C}$.

Para diminuir a influência das velocidades devido à mistura, podemos usar um misturador artificial que mantenha uma distribuição homogênea do traçador. Aconselha-se⁽²⁶⁾ uma frequência de agitação mínima, em torno de 25 rpm.

Se as condições anteriores forem satisfeitas, substituindo-se o volume de diluição (V) por $\pi r_1^2 h$, e a área (A) por $2 r_1 h$, sendo h a altura do volume de diluição, obtemos, a partir da equação (4),

$$V_f = \frac{-\pi r_1}{2 \alpha t} \ln C/C_o \quad (5)$$

onde r_1 é o raio interno do poço.

3.1.1.4 - Construção do Poço para o Cálculo de Alfa:

O modelo de construção do poço é aquele em que podem ser aproveitados os resultados e observações feitos por outros autores. Em geral, consiste-se de um poço contendo na seção transversal duas camadas concêntricas, um filtro e um pré-filtro, de raios r_1 , r_2 , r_3 , e permeabilidades k_1 e k_2 , em um aquífero homogêneo de permeabilidade k_3 . (vide Figura 34).

Aplicando-se a teoria potencial⁽²⁶⁾ ao poço, obtemos a seguinte expressão para alfa:

$$\alpha = \frac{8}{(1+k_3/k_2)\{1+(r_1/r_2)^2 + k_2/k_1[1-(r_1/r_2)^2]\} + (1-k_3/k_2) \cdot (r_1/r_2)^2 + (r_2/r_3)^2 + k_2/k_1[(r_1/r_3)^2 - (r_2/r_3)^2]} \quad (6)$$

Na ausência do pré-filtro, $r_2 = r_3$ e $k_2 = k_3$, e a equação reduz-se à de OGILVI⁽⁸⁰⁾:

$$\alpha = \frac{4}{1 + (r_1/r_2)^2 + k_3/k_1 [1 - (r_1/r_2)^2]} \quad (7)$$

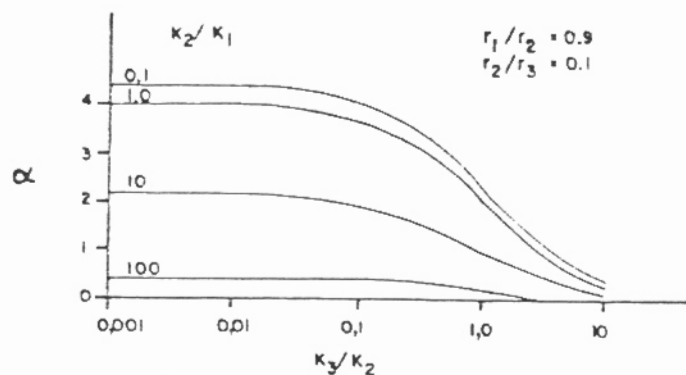
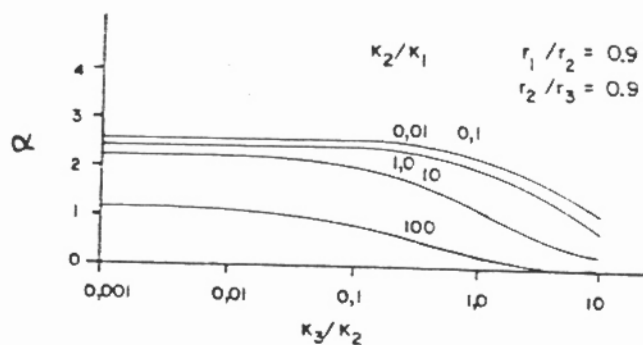
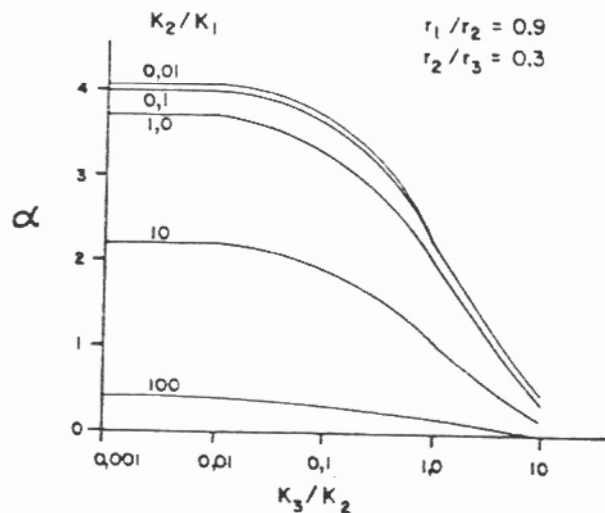
3.1.1.5 - Permeabilidade do Filtro (k_1):

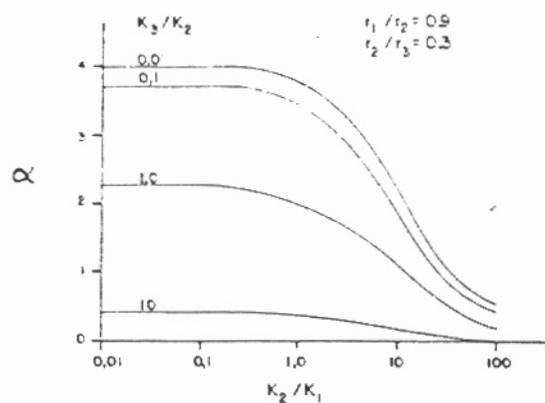
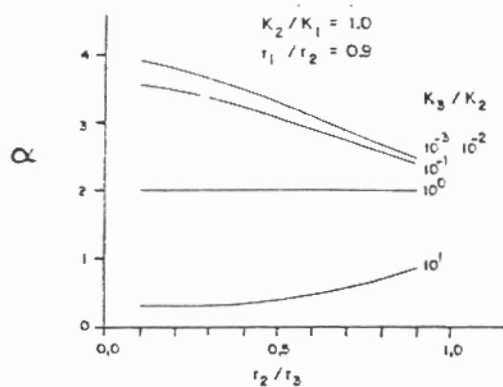
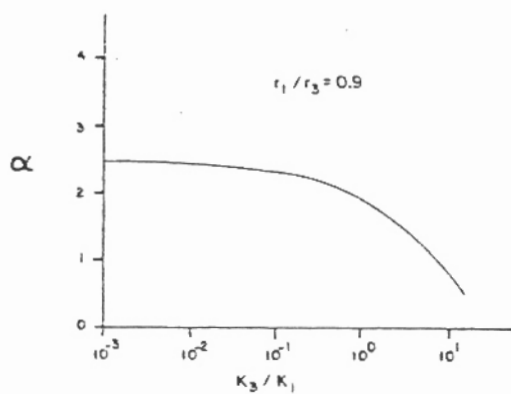
Existem diversos tipos e posições a serem adotadas para as perfurações no filtro, como mostra a Figura 30. A permeabilidade de filtro (k_1) pode ser medida tanto por modelos teóricos quanto por poços experimentais. Os modelos experimentais utilizando diversos tipos de filtros revelaram que k_1 independe do tipo de filtro usado, da espessura do tubo e das variáveis r_3 , k_2 e k_3 . Demonstrou-se que uma área perfurada de 10%⁽⁸⁾, em geral, é suficiente para materiais permeáveis, mas para materiais muito permeáveis, como os pedregulhos, recomenda-se uma área perfurada de 20 a 30%.

O diâmetro não pode ser maior que o das areias ou pedriscos do pré-filtro.

3.1.1.6 - Permeabilidade do Pré-filtro (K_2) e do Aquífero (K_3):

De acordo com as equações (6) e (7), respectivamente, as permeabilidades do aquífero (k_3) e do pré-filtro (k_2), devem ser conhecidas para o cálculo de alfa. Por outro lado, geralmente o valor mais procurado é k_3 , através do cálculo de Vf. Para este caso, calcula-se alfa pela equação (6), em função de k_2/k_1 e k_3/k_2 . As Figuras (35) e (36), mostram os resultados computacionais do Centro de Computação de Leibnitz, da Academia de Ciências da Bavária⁽²⁶⁾. Podemos concluir destes resultados, com um erro de 10%, que alfa perma

DEPENDÊNCIA DE ALFA COM K_3/K_2 (PARÂMETRO K_2/K_1 QUANDO $r_2/r_3 = 0.1$)DEPENDÊNCIA DE ALFA COM K_3/K_2 (PARÂMETRO K_2/K_1 QUANDO $r_2/r_3 = 0.9$)DEPENDÊNCIA DE ALFA COM K_3/K_2 (PARÂMETRO K_2/K_1 QUANDO $r_2/r_3 = 0.3$)

DEPENDÊNCIA DE ALFA COM K_2/K_1 (PARÂMETRO K_3/K_2)DEPENDÊNCIA DE ALFA COM r_2/r_3 (PARÂMETRO K_3/K_2)DEPENDÊNCIA DE ALFA COM K_3/K_1 (PARÂMETRO r_1/r_3)

nece independente dos parâmetros k_2/k_1 e k_3/k_2 , dependendo , somente de r_1 , r_2 e r_3 , se a condição $k_1 \gg k_2 \gg 10k_3$, for satis - feita.

Na prática, $k_2 > 10k_3$ é satisfeita na maioria dos casos. Se a condição $k_1 > k_2$ não for satisfeita, deve-se calcular alfa pela equação (6) usando-se k_1 e k_2 tirados da literatura ou determinados em laboratório. O pré-filtro deve ser selecionado de modo a reter a mistura de areias e pedregulhos do fluxo da água subterrânea, e ao mesmo tempo, permitir a limpeza da areia do poço. Recomenda-se que o poço seja limpo para a remoção de materiais acumulados durante a construção do poço. Esta limpeza deve ser feita bem antes do experimento.

No caso de poços sem o pré-filtro, a equação (7) demonstra que alfa independe de k_3 , quando $k_1 \gg 10k_3$. Mas, no pior dos casos, quando $k_1 = k_3$, deve-se levar em conta um desvio máximo de 20%, que é admissível diante da precisão prática exigida.

3.1.1.7 - Efeitos das Dimensões da Sonda:

Muitos estudiosos⁽⁶¹⁾ sugerem uma correção no volume de diluição em virtude das dimensões da sonda. Esta relação pode ser obtida por:

$$V_f = \frac{-\pi(r_1^2 - r_o^2)}{2 \alpha r_1 t} \ln C/Co \quad (8)$$

onde r_o é o raio da sonda.

Experiências mostraram que alfa permanecia independente de r_o/r_1 dentro dos seguintes limites $0 < \frac{r_o}{r_1} < 0,92$. Quando o diâmetro da sonda é grande em relação ao poço, há uma redução no tempo de medida, que pode ter uma grande influência quando estiverem envolvidas pequenas velocidades. As sondas de maior diâmetro são mais afetadas pela adsorção de traçador

nas paredes do filtro e pelo traçador fora do volume de diluição. Prefere-se usar sondas cujo diâmetro não exceda a metade do diâmetro do poço.

3.1.1.8 - Limites, Erros e Condições de Validade:

O limite inferior de V_f , está próximo ao da velocidade de difusão (aproximadamente 1cm/d). O limite superior é determinado pelo fluxo turbulento ($Re < Re_{crit}$), cuja influência sobre α pode ser determinada pela fórmula:

$$\alpha = \alpha_p (|1 - \phi(Re)|) \quad (9)$$

onde $0 < \phi(Re) < 1$ é uma função do número de Reynolds, α_p significa o valor de α para um fluxo potencial de acordo com a equação (6). Para fluxos laminares ($Re < Re_{crit}$), $\phi(Re) = 0$.

Os limites, na prática, dependem do instrumental e da técnica, isto é, resposta, mistura, capacidade de gravação, etc. Alguns experimentos noticiam velocidades de até 120m/d sob condições de bombeamento, e de 10 a 20m/d , em gradientes normais⁽⁴³⁾.

Verticalmente, o método de diluição mapeia cada camada individualmente. A sua capacidade de resolução está limitada, neste caso, ao comprimento da sonda e à estrutura do poço mais o pré-filtro.

Horizontalmente, o alcance, R , da área coberta pelo método, é igual à extensão do distúrbio de fluxo da água subterrânea causada pelo teste. Daí, segue que o alcance R , para o método de diluição em relação a um filtro de diâmetro $2r_1$ é:

$$R \approx \alpha 2r_1$$

Os erros do cálculo de V_f , são determinados basicamente pela incerteza em avaliar o valor de α . Para que a

medição seja precisa é necessário que o poço seja construído com cuidado e que o filtro e o pré-filtro sejam escolhidos corretamente. Experiências anteriores (26) (43), demonstram que os sítios não são analisados minuciosamente, dificultando a interpretação dos resultados obtidos pelo método de diluição. Modelos experimentais mostraram que a incerteza na determinação do valor da permeabilidade do filtro e do pré-filtro leva a um erro na medida de α e V_f de 10% caso seja satisfeita a inequação ($k_1 \geq k_2 \geq 10k_3$). Sob condições desfavoráveis de campo, o método de diluição pode ter uma precisão de 50% para valores absolutos de V_f .

O método de diluição aplicado com maior precisão em formações homogêneas como aluviões e arenitos. Na presença de vazões verticais significativas, ou rochas cársticas fraturadas o método fornece somente informações qualitativas, que são muito importantes em investigações nas águas subterrâneas.

A princípio, a aplicação do método consiste-se da extrapolação dos resultados medidos em um poço para as condições hidrológicas predominantes do aquífero que o cerca. Isto é justificado sempre que o local vizinho apresenta características geológicas uniformes em toda a sua extensão. Se o aquífero compõe-se de camadas deslocadas ou quebradas verticalmente, a rede de sondagens, como em qualquer investigação hidrológica, deve ser mais próxima para obter resultados mais confiáveis, e que se apliquem a todo o fluxo subterrâneo do local investigado.

3.1.1.9 - Vantagens do Método:

- a investigação pode ser feita em águas subterrâneas não bombeadas, e portanto, fornecendo velocidades de fluxo de um aquífero sem perturbações;
- uma vez que a construção do poço foi bem feita, podemos obter prontamente, informações detalhadas sobre a estru

tificação do aquífero;

- podemos aplicar este método em qualquer diâmetro acima de 3,81cm (até o momento);
- a determinação da produção de água subterrânea pelo método de diluição é econômica.

3.1.2 - Determinação Prática da Velocidade de Fluxo.

3.1.2.1 - Aparelhos Utilizados:

Para a determinação da velocidade de fluxo foram utilizados os aparelhos descritos abaixo:

Sonda Cintiladora NaI(Tl): A sonda de cintilação utilizada, compõe-se de um cristal de Iodeto de Sódio ativado com Tálcio, acoplado a um pré-amplificador por uma pasta de silicone. O pré-amplificador está encaixado a uma fotomultiplicadora. Este sistema está protegido por um cilindro de metal, devidamente fechado para evitar a entrada de água, e resistente contra choques que possam afetar o cristal. A sonda foi vedada com uma fita de auto-fusão, anéis de borracha de neoprene e cola araudite, para assegurar a estanqueidade do sistema eletrônico.

Os fótons coletados são transformados em pulsos elétricos, e transmitidos por um cabo especial de neoprene (25m), até o contador.

Contador e Analisador de Pulsos: Inicialmente foi utilizado um aparelho holandês tipo BASC. O "BASC" é composto de um contador de pulsos, um dispositivo de janelas para espectrometria, um amplificador de alta voltagem, um contador analógico com seletor de escalas, e uma série de recursos para contagem. Utilizou-se também um contador americano, tipo "Nuclear Chicago". Este contador possui, um amplificador de

alta voltagem, e um contador digital com regulagem de tempo de medição, para 1/4 de minuto, 1 minuto, 2 minutos, e manual.

Bomba Injetora: A bomba de injeção de traçador é japonesa, e funciona através de um sistema de pequenas roldanas que promovem sucção por ação peristáltica, atingindo velocidades baixíssimas, como 0,00071/s. Esta bomba possui um conjunto de tubos de diâmetros bem pequenos. O tubo utilizado foi de 2mm de diâmetro, acoplado ao tubo injetor.

Tubo Injetor: O tubo injetor é um tubinho de plástico transparente, de 25m de comprimento, sustentado por uma corda fina de nylon, marcada a cada 50cm.

3.1.2.2 - Trabalho de Campo:

O trabalho de campo realizado nos quatros poços de monitoração instalados no IPEN, segue uma metodologia padronizada como descrita abaixo.

Executa-se uma contagem do "background" do solo e da água através da sonda cintiladora e mede-se o nível d'água dos poços antes da injeção do traçador.

Preenchemos o tubo injetor com água comum, ligamos a bomba injetora e, após succionarmos 1 a 2 metros de ar, extraímos todo o conteúdo do traçador a ser injetado. Deixamos mais 1 a 2 metros de ar entre o traçador e a extremidade do tubo.

Introduzimos o tubo injetor na posição central do filtro de P.V.C., tomando-se o cuidado de fechar a outra extremidade do tubo.

Ligamos a bomba injetora e esperamos até que todo o traçador seja descarregado na seção mencionada.

Introduzimos, então, a sonda cintiladora acoplada ao escalímetro e verificamos exatamente a profundidade de maior contagem, dando início às medições.

Executa-se a medida do número de contagens durante um minuto (cpm), em intervalos regulares de 5 minutos, podendo serem aumentados para 10 ou 15 minutos no transcorrer da medição.

Estas medidas são feitas até que o número de contagens entre dois, ou três intervalos consecutivos flutue em torno do mesmo valor.

3.1.2.3 - Processamento dos Dados:

Os valores das contagens obtidas, (contagens globais), são corrigidos, subtraindo-se deles os valores do "background" na água, obtendo-se as contagens líquidas.

Calculamos, então, a relação entre cada contagem (C) e a contagem inicial (C_0) e desenhamos os pontos desta relação (C/C_0) contra os intervalos de tempo em um papel semi-logarítmico.

Como o decaimento da atividade em relação ao tempo é uma função exponencial, os pontos são ajustados por uma reta, pelo método dos mínimos quadrados.

Com os valores das relações entre as permeabilidades (supondo $k_1 \geq k_2 \geq 10k_3$) e das relações entre os raios r_1 , r_2 e r_3 (vide Figura 34), obtemos:

$$r_1/r_2 \approx 0,89; \quad r_2/r_3 \approx 0,56; \quad k_1/k_2 = 1 \quad k_3/k_2 = 0,1$$

Para $r_1 = 5,1$ cm, $r_2 = 5,68$ cm e $r_3 = 10,16$ cm, calculamos o valor de $\alpha = 3,5$, por intermédio de extrapolação nos gráficos das Figuras 35 e 36.

Substituindo-se os valores das inclinações das retas (Figuras 37, 38, 39 e 40), do raio interno do poço r_1 , e do valor de α na fórmula (5), obtemos os valores das velocidades de filtração (V_f).

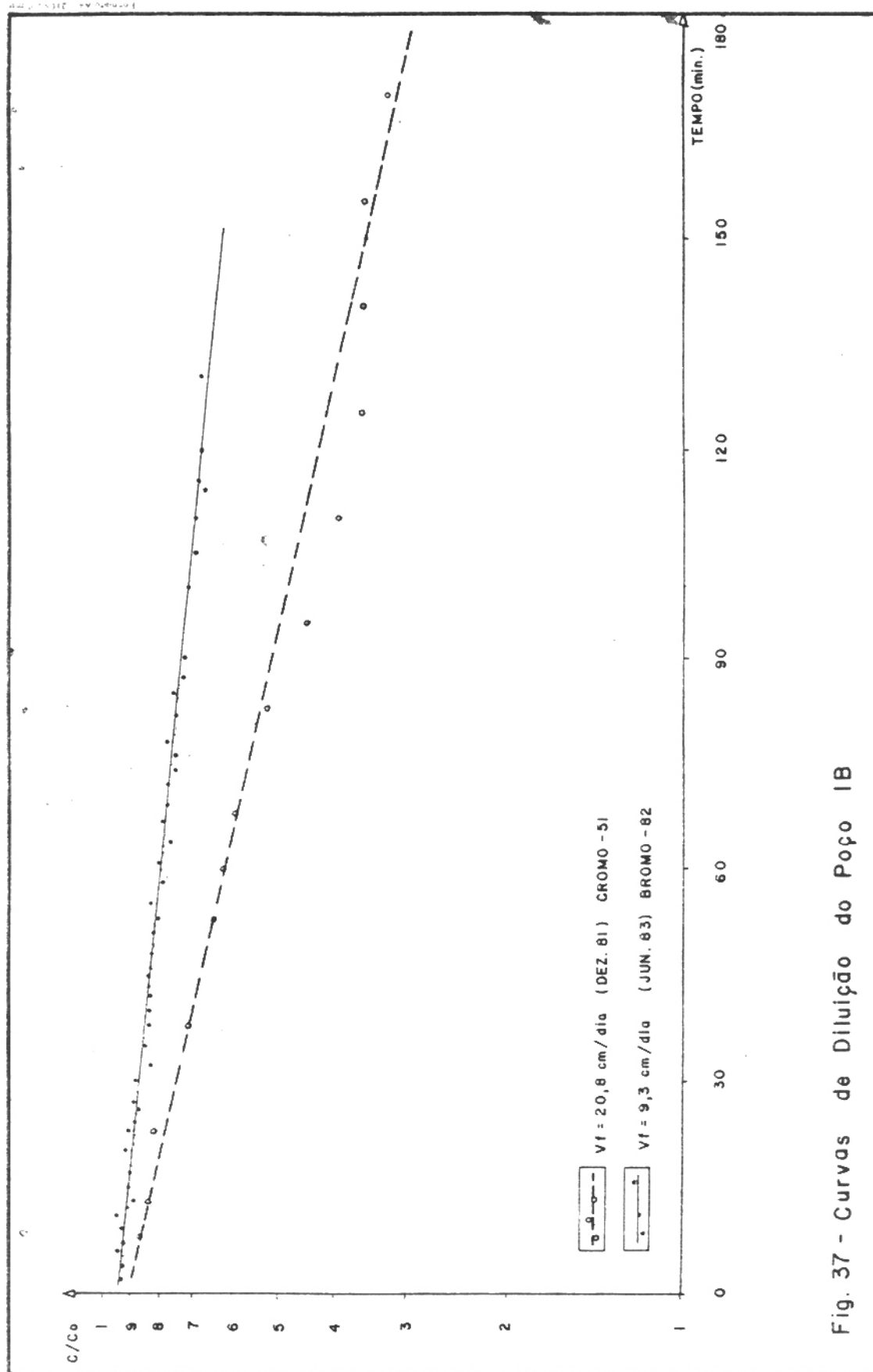


Fig. 37 - Curvas de Diluição do Poço IB

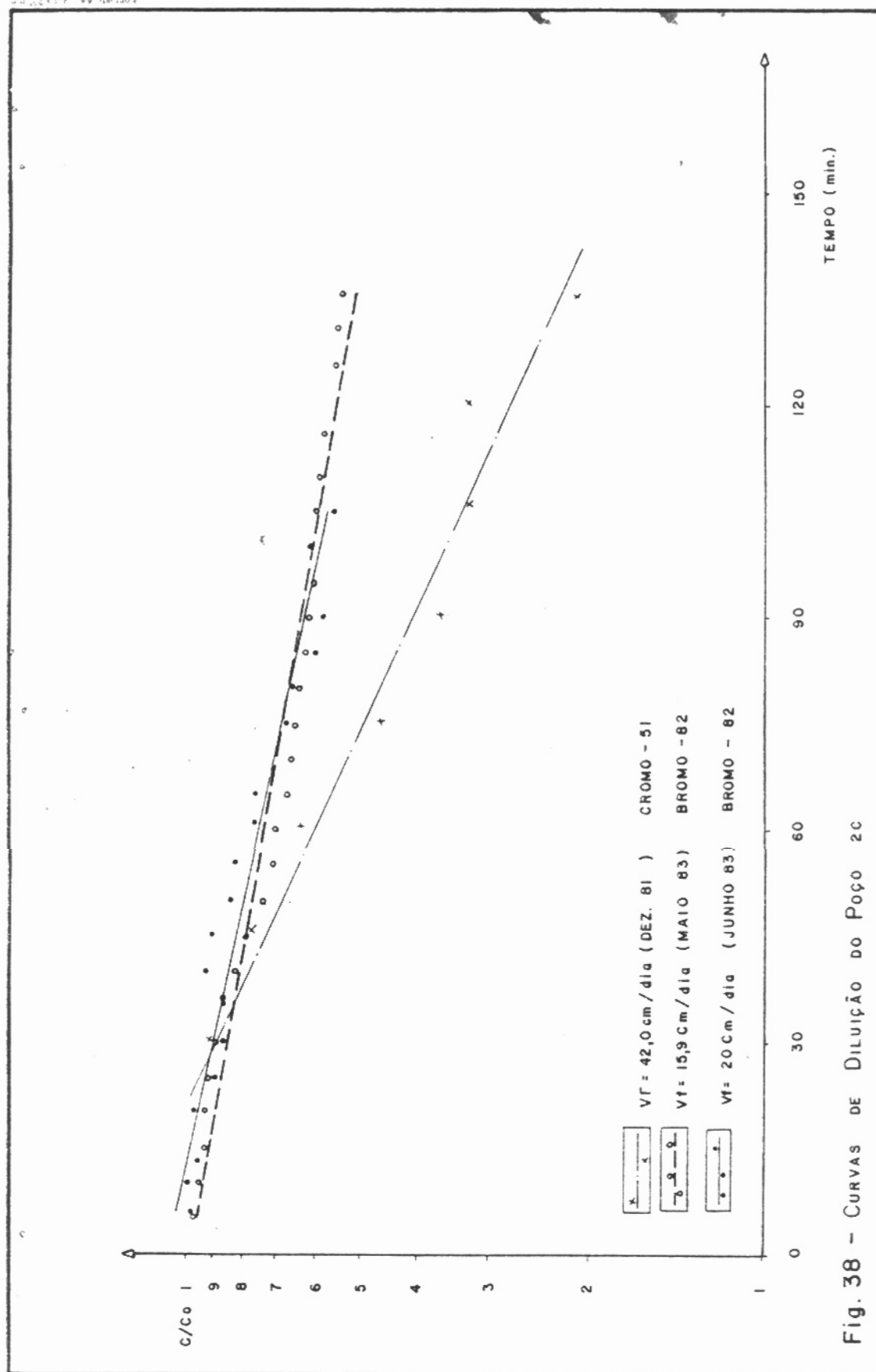


Fig. 38 - CURVAS DE DILUIÇÃO DO POÇO 2C

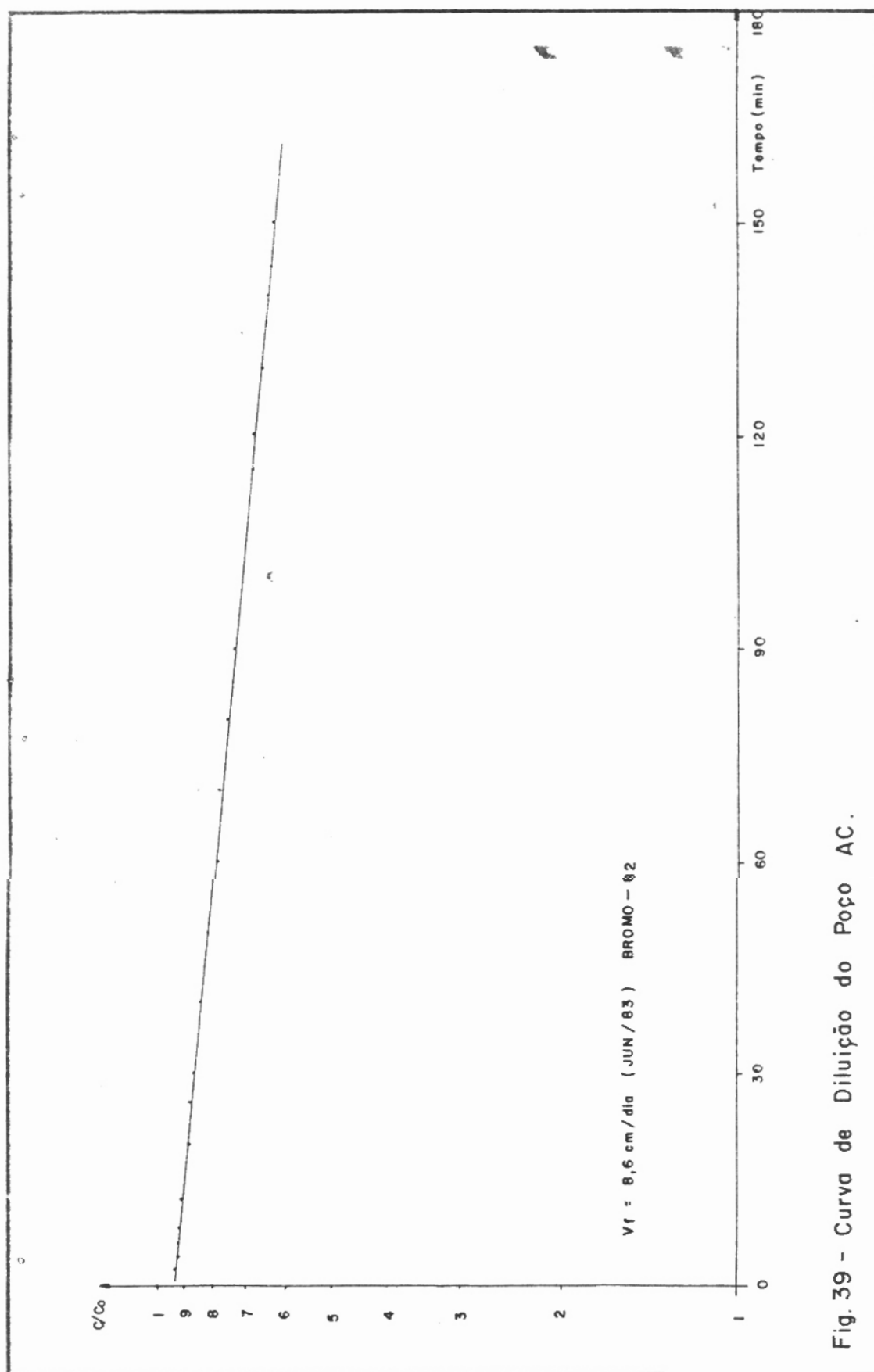


Fig. 39 - Curva de Diluição do Poço AC.

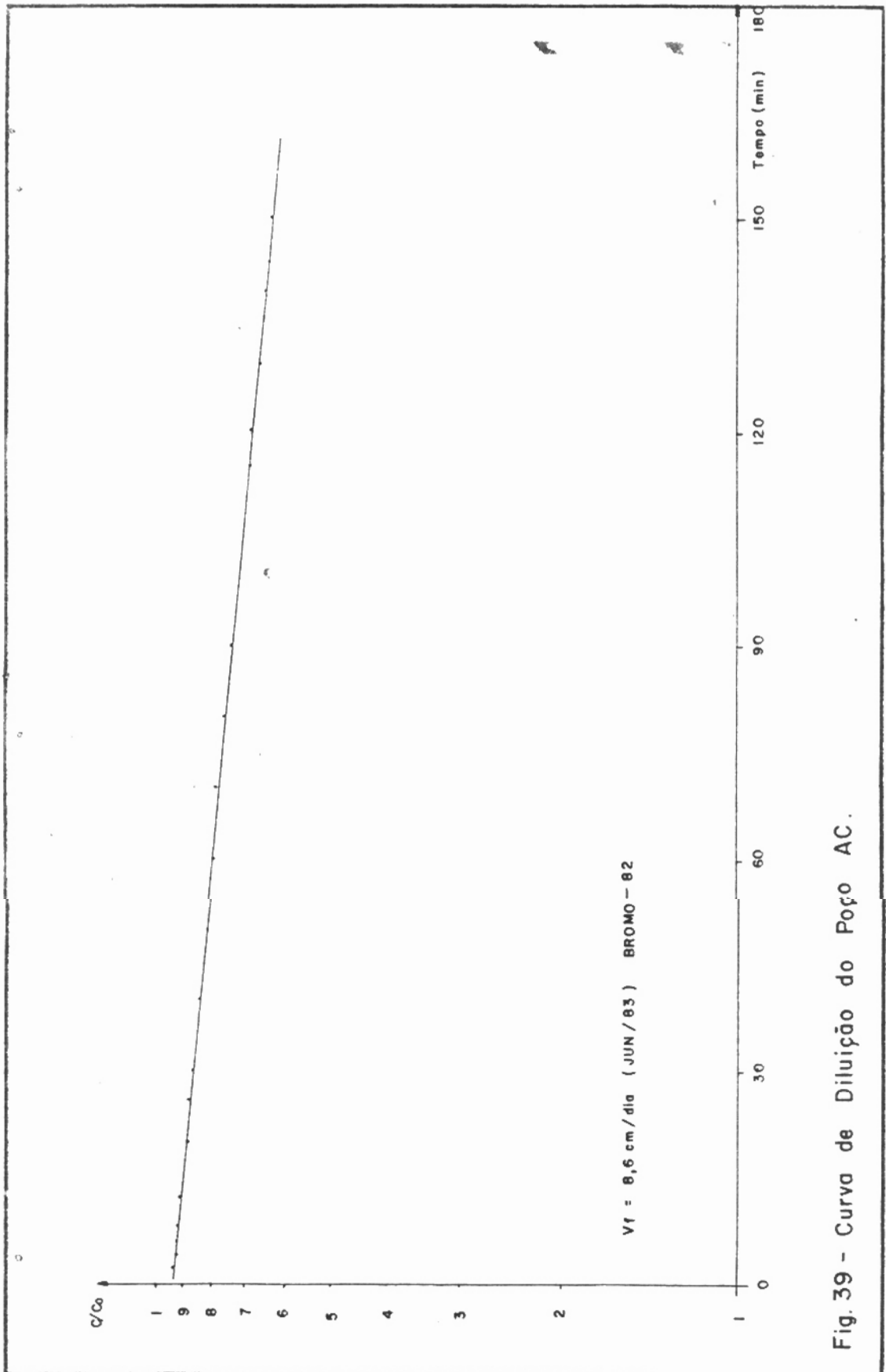


Fig. 39 - Curva de Diluição do Poço AC.

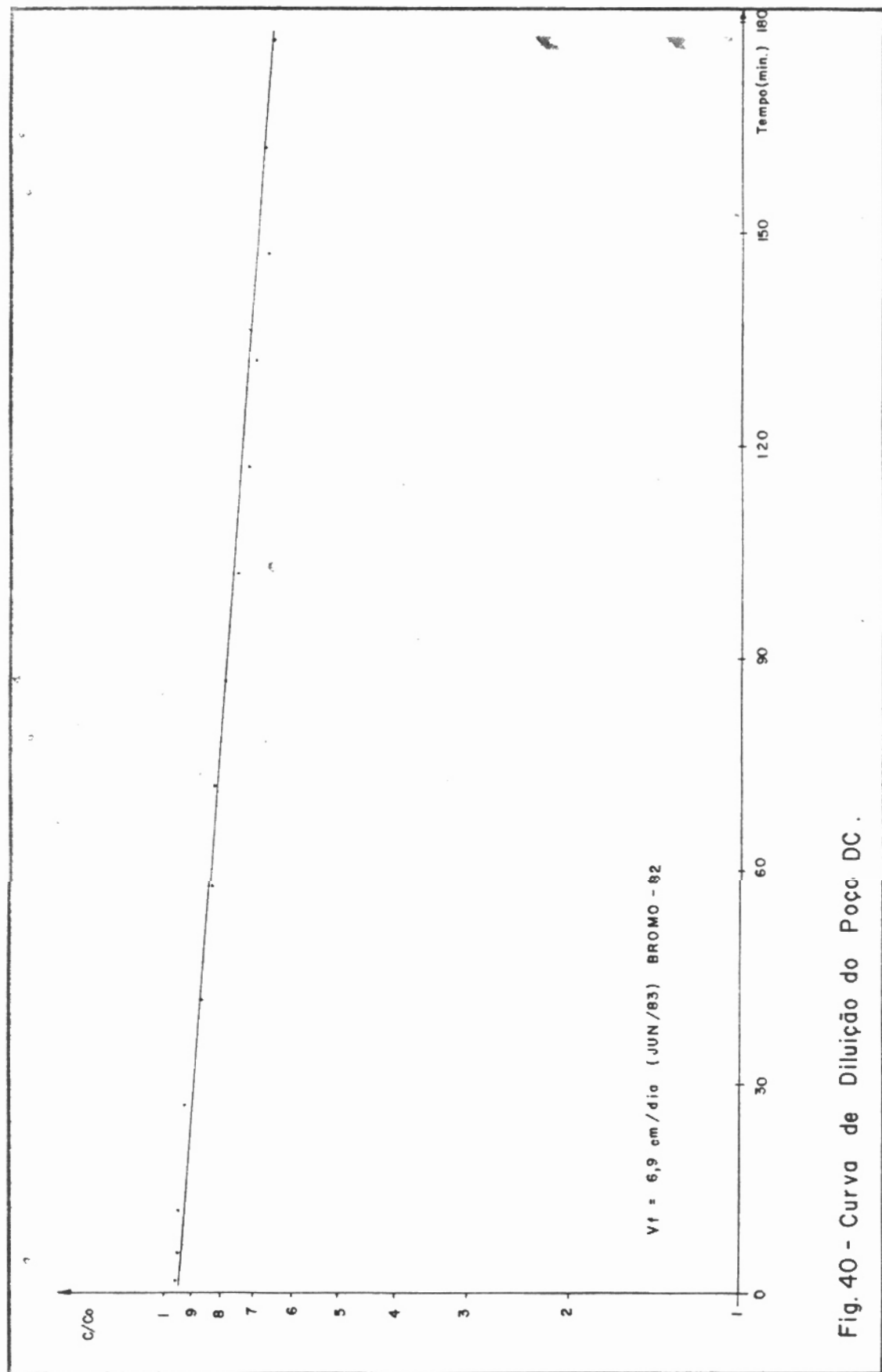


Fig. 40 - Curva de Diluição do Poço DC.

3.1.2.4 - Medições de Campo:

Foram realizadas duas medidas de velocidade de fluxo no poço 1B, três medidas no poço 2C e uma medida em cada um dos poços AC e DC.

A primeira medida, foi feita em Dezembro de 1981 no poço 2C, utilizando-se $259\mu\text{Ci}$ de Cromo-51 na forma do complexo EDTA. A profundidade do poço era de 11 metros e utilizou-se um escalímetro marca BASC. Os resultados obtidos estão na Tabela 20a, e a curva de diluição está representada na Figura 38.

No mesmo mês, mediu-se o poço 1B, utilizando-se $245\mu\text{Ci}$ de Cromo-51 (EDTA) obtendo-se os resultados da Tabela 21a, representados na Figura 37.

Em maio de 1983, realizou-se uma nova medida no poço 2C, utilizando $19\mu\text{Ci}$ de Bromo-82 na forma de Brometo de Amônio ($\text{NH}_4^{82}\text{Br}$) como traçador. Os resultados estão na Tabela 20b, representados na curva de diluição da Figura 38.

Em junho do mesmo ano realizou-se uma nova medida no poço 1B, utilizando-se $7\mu\text{Ci}$ de Bromo-82 ($\text{NH}_4^{82}\text{Br}$) como traçador. Os resultados estão na Tabela 21b, representados na curva da Figura 37.

Neste mesmo mês, realizou-se uma outra medida no poço 2C, utilizando-se $11\mu\text{Ci}$ do mesmo traçador, obtendo-se os resultados da Tabela 20c e a curva da Figura 38.

Ainda em junho de 1983, realizou-se as experiências dos poços AC e DC, utilizando-se respectivamente $10\mu\text{Ci}$ e $16\mu\text{Ci}$ de Bromo-82 ($\text{NH}_4^{82}\text{Br}$).

A tabela a seguir resume todos os valores obtidos para os poços 1B, 2C, AC e DC das medidas da velocidade de filtração (V_f) e da velocidade real (V) obtida pela fórmula (1), considerando-se a porosidade efetiva (n) como 35%:

TABELA 20a. DADOS DA VELOCIDADE DE FLUXO NO POÇO 2C

Data: 4/12/81

Poço: 2C

Traçador: Cromo-51

BG na água: 2571 cpm

Nível d'água: 11 m

Atividade injetada: 249 μ Ci

T (min)	Taxa de Contagem (cpm)		C/C ₀
	Global	Líquido	
0	51848	49277	1
15	50634	48063	0,9754
30	47808	45237	0,9180
45	41586	39015	0,7917
60	33914	31343	0,6361
75	25372	22801	0,4627
90	20548	17977	0,3648
106	18751	16030	0,3253
120	18753	16182	0,3284
135	13090	10519	0,2135

$$C/C_0 = 0,98734 e^{-0,013t}$$

$$r = 0,984$$

$$\alpha = 3,5$$

$$vf = 42 \text{ cm/d}$$

TABELA 21a. DADOS DA VELOCIDADE DE FLUXO NO POÇO 1B

Data: 2/12/81

Poço: 1B

Traçador: Cromo-51

BG na água: 1.100 cpm

Nível d'água: 16,5 m

Atividade injetada: 245 μ Ci

T(min)	Taxa de Contagem		C/Co
	Global	Líquido	
0	9962	8862	1
8	8794	7694	0,8682
13	8558	7458	0,8416
23	8382	7282	0,8217
38	7465	6365	0,7182
53	6816	5716	0,6450
68	6346	5246	0,5920
83	5731	4631	0,5225
95	5073	3973	0,4483
110	4608	3508	0,3958
125	4276	3176	0,3584
140	4253	3153	0,3558
155	4249	3149	0,3553
170	3956	2856	0,3223
185	4080	2980	0,3362

$$C/Co = 0,9066 e^{-0,0063t}$$

$$r = 0,9563$$

$$\alpha = 3,5$$

$$vf = 20,76 \text{ cm/d}$$

TABELA 20b. DADOS DA VELOCIDADE DE FLUXO NO POÇO 2C

Data: 4/05/83

Poço: 2C

Traçador: Bromo-82

BG na água: 900 cpm

Nível d'água: 7,75 m

Atividade injetada: 18,9 μ Ci

T(min)	Taxa de Contagem (cpm)		C/Co
	Global	Líquido	
0	26427	25527	1
5	25860	24960	0,9778
10	25389	24489	0,9593
15	25056	24156	0,9463
20	25047	24147	0,9459
25	24538	23638	0,9260
30	23661	22761	0,8916
40	21990	21090	0,8262
45	21112	20212	0,7918
50	19833	18933	0,7417
55	19118	18218	0,7137
60	18758	17858	0,6990
65	18083	17183	0,6731
70	17795	16895	0,6618
75	17455	16555	0,6485
80	17248	16348	0,6404
85	16929	16029	0,6279
90	16686	15786	0,6184
95	16378	15478	0,6063
100	16580	15680	0,6143
105	16289	15389	0,6029
110	16106	15206	0,5957
116	15826	14926	0,5847
126	15104	14204	0,5564
131	14926	14026	0,5495
136	14697	13797	0,5405

$$C/C_0 = 0,9843 e^{-0,0048t}$$

$$r = 0,9754$$

$$\alpha = 3,5$$

$$vf = 15,86 \text{ cm/d}$$

TABELA 21b. DADOS DA VELOCIDADE DE FLUXO NO POÇO 1B.

Data: 14/06/83

Poço: 1B

Traçador: Bromo-82

BG na água: 500 cpm

Nível d'água: 11,15 m

Atividade injetada: 7 μ Ci

T(min)	Taxa de Contagem (cpm)		C/Co
	Global	Líquido	
0	7621	7121	1
5	7150	6650	0,9339
9	7159	6659	0,9351
15	6983	6483	0,9104
20	7072	6572	0,9229
25	6809	6309	0,8860
30	6815	6315	0,8868
40	6488	5988	0,8409
45	6490	5990	0,8412
50	6416	5916	0,8308
60	6220	5720	0,8033
70	6086	5586	0,7844
80	5826	5326	0,7479
90	5663	5163	0,7250
105	5467	4967	0,6975
120	5464	4964	0,6971
140	5353	4853	0,6815

$$C/Co = 0,9486 e^{-0,0028t}$$

$$r = 0,9848$$

$$\alpha = 3,5$$

$$vf = 9,3 \text{ cm/d}$$

TABELA 20c. DADOS DA VELOCIDADE DE FLUXO NO POÇO 2C

Data: 13/06/83

Poço: 2C

Traçador: Bromo-82

BG na água: 700 cpm

Nível d'água: 6,45 m

Atividade injetada: 11,27 μ Ci

T (min)	Taxa de Contagem		C/Co
	Global	Líquido	
0	6346	5646	1
5	6210	5510	0,9759
10	6290	5590	0,9901
13	6144	5444	0,9642
20	6197	5497	0,9736
25	5799	5099	0,9031
30	5629	4929	0,8730
35	5628	4928	0,8728
40	5814	5114	0,9323
45	5835	5135	0,9095
50	5500	4800	0,8502
55	5414	4714	0,8349
61	505	4305	0,7625
65	4994	4294	0,7605
75	4472	3772	0,6681
80	4425	3725	0,6598
85	4064	3364	0,5958
90	3995	3295	0,5836
95	4070	3370	0,5963
100	4151	3451	0,6112
105	3883	3183	0,5638

$$C/Co = 1,0834 e^{-0,00607t}$$

$$r = 0,96$$

$$\alpha = 3,5$$

$$vf = 20 \text{ cm/d}$$

Poço	Velocidade cm/d	Datas		
		12/81	5/83	6/83
1B	Vf	20,8	-	9,3
	V	59,4		26,6
2C	Vf	42,0	15,9	20,0
	V	120,0	45,4	57,1
AC	Vf	-	-	8,6
	V			24,6
DC	Vf	-	-	6,9
	V			19,7

3.2 - Direção do Fluxo das Águas Subterrâneas:

3.2.1 - Teoria:

3.2.1.1 - Introdução:

A medida da direção da componente do fluxo em poços, oferece uma técnica qualitativa direta que, ao contrário da velocidade do fluxo, é menos restringida pela maioria dos parâmetros perturbadores. Contudo, esta medida fornece dados que só são verdadeiros para as vizinhanças do poço onde foi medida. Se as linhas de fluxo da água subterrânea não forem distorcidas assimetricamente pelas heterogeneidades da formação, os resultados podem ser considerados como representativos da direção do fluxo na formação. A principal limitação da velocidade de fluxo, é a existência de correntes verticais que conduzam o traçador para cima ou para baixo da seção de injeção no filtro do poço.

Este método foi descrito, pela primeira vez, por Mairhofer ⁽⁷⁰⁾, adotado por Borowczik et al. ⁽⁷⁾ e pelo

Forschungsstelle (26) für Radiohydrometrie de Munique.

3.2.1.2 - Técnicas:

Para a medição da direção do fluxo da água subterrânea, marcamos uma secção da coluna de água onde está localizado o filtro. Toma-se o cuidado para que a injeção seja feita vagarosamente no centro da secção, para que não haja indução de diluição do traçador artificialmente, contaminando as paredes do filtro.

A marcação é feita usando-se um traçador que seja facilmente adsorvido na parede do filtro e no pré-filtro.

O fluxo de água subterrânea carrega o traçador na direção preferencial do lençol freático, e este fica adsorvido durante o percurso.

Introduz-se uma sonda nuclear envolta em um cilindro de chumbo, com uma pequena janela sem blindagem (Figura 41).

Este dispositivo é sustentado e manuseado da superfície por meio de uma haste metálica, ou por meio de um motor que gira a janela no interior da sonda.

Girando-se o colimador obtém-se contagens para cada ângulo.

A direção de fluxo será indicada pelo ângulo de maior contagem.

Na maioria dos testes de laboratório, a diferença entre a direção medida e a ajustada em laboratório não é superior a 3° . A reprodutibilidade deste método no campo é melhor do que $\pm 10^{\circ}$.

3.2.2 - Determinação Prática da Direção de Fluxo:

3.2.2.1 - Aparelhos Utilizados:

Para a determinação da direção do fluxo da água

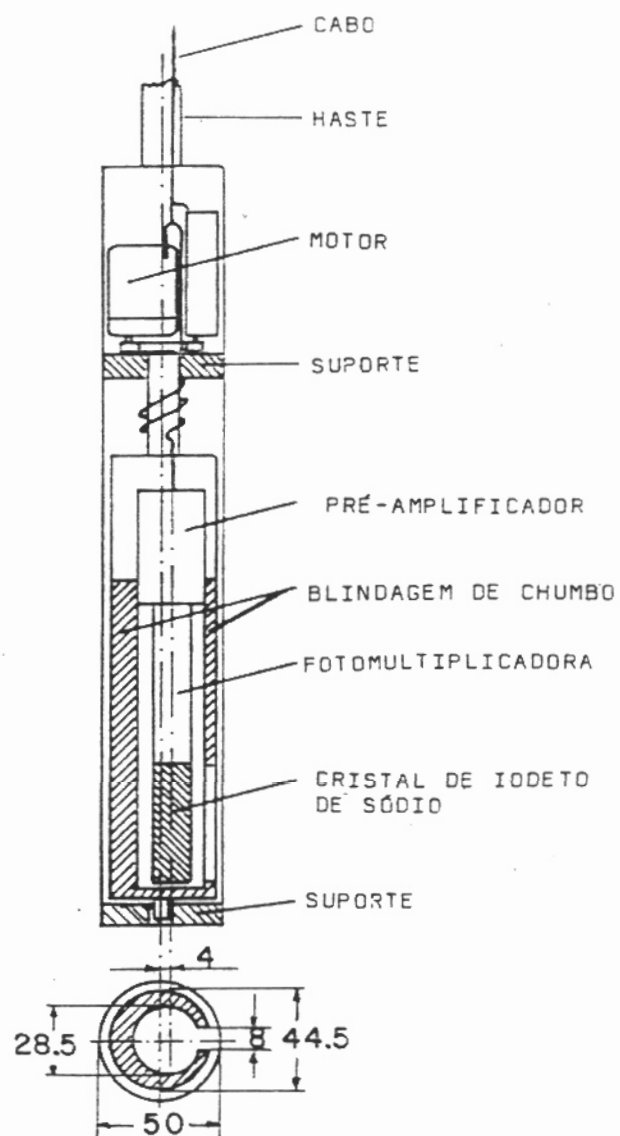


Fig.41- Sonda de Cintilação Para a Medida da Direção de Fluxo

subterrânea foram utilizados os seguintes aparelhos:

Colimador: É uma peça cilíndrica de chumbo, revestida com alumínio e dotado de uma janela em forma de cunha na parte inferior, onde encaixa-se a extremidade da sonda que contém o cristal detector (vide Figura 41).

Direcionador de Superfície: É uma peça de alumínio na forma de uma circunferência, graduada de 0 a 360°, dotada de um rolamento que permite girá-la. No centro desta peça há um encaixe para as hastes metálicas que sustentam a sonda.

Hastes Metálicas: São barras metálicas de alumínio de secção quadrada, com três metros cada uma, formando um conjunto de seis hastes, e 18m de comprimento.

Estas hastes sustentam o colimador, encaixam-se no direcionador, permitindo girá-lo da superfície.

Centralizador: É um dispositivo cilíndrico fino com haletas flexíveis que permitem uma centralização perfeita do injetor no diâmetro do poço.

O trabalho experimental é similar ao da velocidade de fluxo, dividindo-se em trabalho de laboratório, injeção do traçador, medição e análise dos dados.

3.2.2.2 - Trabalho de Campo:

A medida da direção de fluxo da água subterrânea foi realizada no poço 2C, seguindo-se a metodologia abaixo descrita.

Executou-se uma contagem do "background" da água do poço utilizando-se a sonda cintiladora com o colimador, e determinou-se a profundidade do nível do lençol freático nos poços .

Encaixa-se a extremidade do tubo injetor no centralizador, e procede-se a injeção do traçador e introdução do

tubo, da mesma forma que na medida da velocidade do fluxo.

A injeção, porém, é feita muito mais vagarosamente, tomando-se o cuidado do centralizador estar fixado exatamente no centro da secção de água, na altura do filtro, para que a velocidade de injeção e os deslocamentos do tubo não perturbem o volume de diluição, contaminando artificialmente as paredes do filtro.

O tubo injetor é deixado no local, por um tempo suficiente, para que o fluxo leve o traçador de um a dois dias, determinado por estimativas feitas pela velocidade de fluxo.

Retira-se cuidadosamente o tubo injetor e introduz-se a sonda cintiladora com colimador, por meio das hastes metálicas de secção quadrada. Toma-se o cuidado de anotar na haste a posição da janela do colimador. Após acertarmos a profundidade de maior contagem, orienta-se a posição da janela com a linha 0 a 180° do direcionador de superfície. Alinhamos esta direção com um ponto fixo e iniciamos as contagens.

Contou-se, a partir da posição ajustada, cada dez graus, obtendo-se diferentes contagens para cada ângulo, até completar a circunferência.

3.2.2.3 - Processamento dos Dados:

As contagens globais obtidas são corrigidas subtraindo-se delas o valor do "background", obtendo-se as contagens líquidas.

Desenha-se um gráfico radial marcando, a cada ângulo, a contagem respectiva.

Calcula-se, então, a resultante destas coordenadas rebatendo-se cada valor nos eixos cartesianos. O ângulo da resultante é obtido tirando-se a tangente da relação entre a somatória das ordenadas e a somatória das abscissas.

3.2.2.4 - Medições de Campo:

Foi medida a direção do fluxo no poço 2C.

A medição do poço 2C foi realizada em agosto de 1983, injetando-se $68\mu\text{Ci}$ de Cromo-51 na forma de Cloreto de Cromo ($^{51}\text{Cl Cl}_3$). Os dados obtidos estão na Tabela 22, e o gráfico representativo da direção de fluxo está na Figura 42.

4 - Determinação do Nível da Água:

Utilizou-se uma sonda que, ao contacto com a água, fecha um circuito e emite um som à superfície fornecendo precisões de milímetros.

As medidas foram feitas semanalmente para os poços 1B e 2C, desde sua construção, até setembro de 1983.

Estes dados foram desenhados em um gráfico representado na Figura 27.

Acima dos gráficos dos níveis d'água, desenhou-se, em escala menor, a precipitação pluviométrica referente aos mesmos meses.

5 - Temperatura, Condutividade e pH da Água.

As medidas de temperatura foram feitas através de uma sonda que fornece valores de resistividade a um resistímetro na superfície.

Os dados de resistividade ($K\Omega$) são comparados a uma curva de temperatura versus resistividade, levantada mediante padrões de laboratórios, e obtém-se a temperatura correspondente à resistividade obtida⁽¹³⁾.

As medidas de condutividade usam uma sonda com um par de eletrodos na sua extremidade, que emite uma corrente em miliamperes, medida em um miliamperímetro na superfície.

Os dados de corrente (mA) são comparados a uma curva levantada em laboratório para valores padrões de condutivi

TABELA 22 - DADOS DA DIREÇÃO DE FLUXO NO POÇO 2C

Data: 26/08/83

Poço: 2C

Traçador: Cromo-51

BG na água: 300 cpm

Nível d'água: 8,97 m

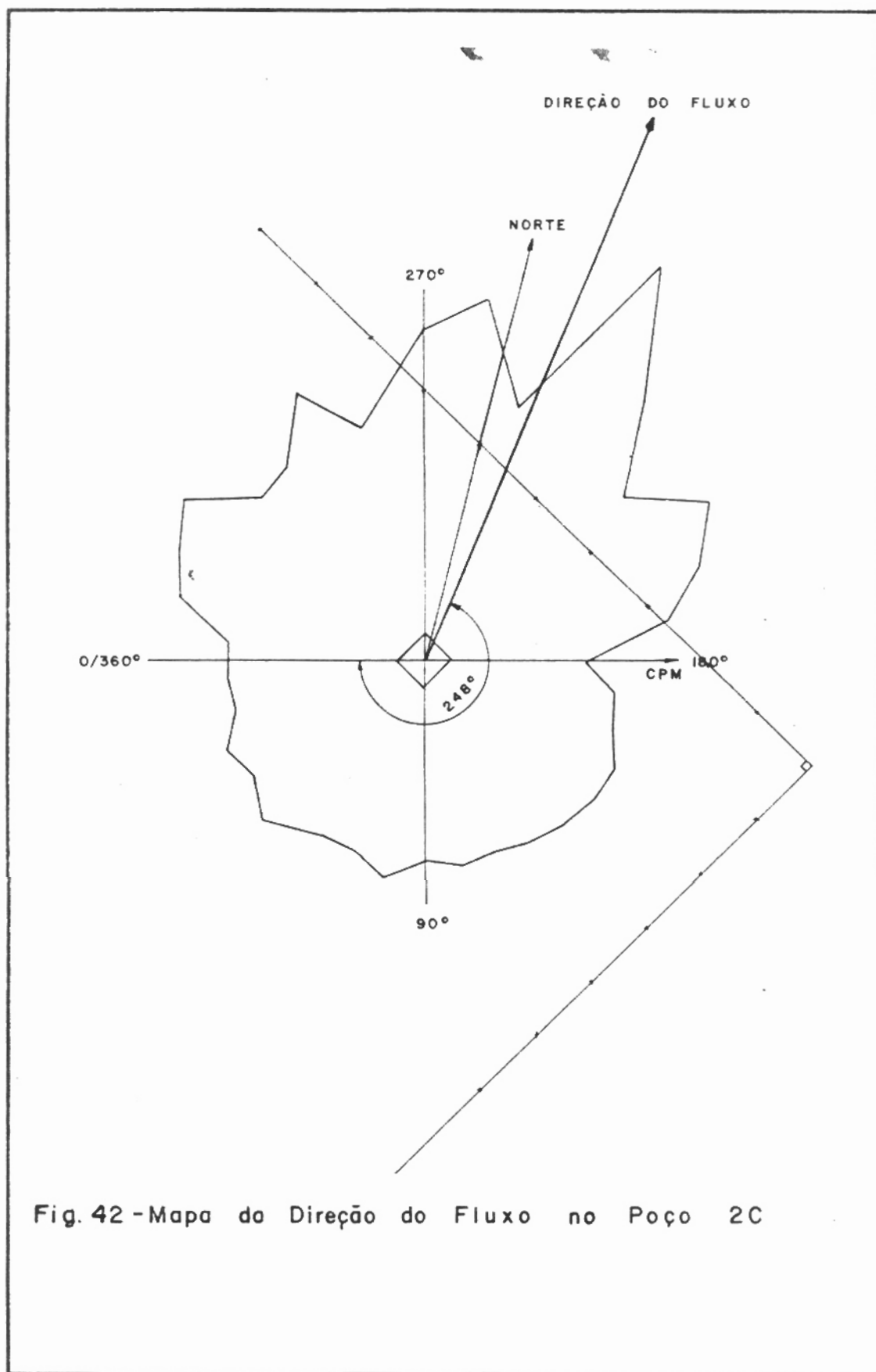
Atividade injetada: 68 μ Ci

Ângulo (graus)	Taxa de Contagem (cpm)	
	Global	Líquido
0/360°	1301	1001
5°	1319	1019
15°	1314	1014
25°	1402	1102
35	1345	1045
45	1480	1180
60	1363	1063
70	1350	1050
80	1371	1071
90	1332	1032
100	1375	1075
110	1334	1034
120	1331	1031
130	1354	1054
140	1333	1033
150	1357	1057
160	1292	992
170	1289	989
180	1091	791
190	1531	1231
200	1815	1515
210	1987	1687
220	1644	1344
230	2055	1755
240	2731	2431
250	1720	1420
260	2219	1919
270	2024	1724
285	1558	1258
295	1867	1567
305	1490	1190
315	1462	1162
325	1773	1473
335	1673	1373
345	1604	1304
355	1314	1014
360	1301	1001

Direção Regional: 10° do Norte para o Leste

Direção Local : 248° Sentido Anti-Horário

(Ver Figura 42).



dade, e calcula-se a condutividade.

Os dados de pH e condutividade também foram feitos em amostras retiradas periodicamente dos poços, e obteve-se os valores da tabela abaixo:

Poço	Data	Condutividade	pH
1B	10/81	99,6 ; 161,1	5,0 ; 5,0
	11/82	136,0 ; 131,8	5,5 ; 5,5
2C	10/81	124,3 ; 161,1	7,5 ; 8,6
	11/82	161,1 ; 140,3	8,3 ; 7,4
AC	11/82	-	6,4
DC	11/82	-	5,5

Uma análise química da água dos poços 2C e AC pode ser vista nas Tabelas 18 e 19 .

6 - Perfilagem Gama-Natural:

A perfilagem gama-natural foi feita introduzindo-se a sonda cintiladora de Iodeto de Sódio ativado com Tâlio, NaI(Tl) , e medindo-se as contagens naturais do solo em um escalímetro BASC, a cada profundidade.

Os valores obtidos nos poços de monitoração 1B e 2C estão representados nas Figuras 28 e 29 .

A perfilagem gama-natural foi executada antes das primeiras medições nos meses de maio e junho de 1983.

7 - Determinação do Nível de Atividade Pré-Operacional do Sítio:

7.1 - Preparação das amostras - Foram retiradas amostras das profundidades de 1 a 2 e 4 a 5 metros. A perfuração e coleta das amostras foram feitas a trado manual, ao lado do prédio

DIVISÃO DE PETROLEO

170.

LABORATÓRIO DE GEOQUÍMICA INORGÂNICA

Tabela 18 - Resultados de análises de água

Poço: 2C

Teste de formação:			Intervalo:		
cátions	mg/l	me/l	ânions	mg/l	me/l
sódio (Na^+)	10,7	0,47	cloreto (Cl^-)	9,5	0,27
potássio (K^+)	1,32	0,03	carbonato (CO_3^{2-})	ausente	
cálcio (Ca^{2+})	0,9	0,04	bicarbonato (HCO_3^-)	8,4	0,14
magnésio (Mg^{2+})	0,3	0,02	hidróxido (OH^-)	ausente	
ferro total (Fe)			sulfato (SO_4^{2-})	<20	
alumínio (Al^{3+})			borato ($\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$)		
estrôncio (Sr^{2+})			sulfeto (S^{2-})		
lítio (Li^+)			brometo (Br^-)		
cobre (Cu^{2+})			iodeto (I^-)		
níquel (Ni^{2+})					
manganês (Mn^{2+})					
amônio (NH_4^+)					
silica (SiO_2)					
Alcalinidade total (CaCO_3)		6,8mg/l			
Dureza total (CaCO_3)		3,5mg/l			
pH a 17,8°C 5,14					
resistividade a 25°C (ohm.m) C.E. = 79,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$					
sólidos totais dissolvidos					

VALORES DE REAÇÃO - PALMER					
cátions	me/l	Valor de Reação - %	ânions	me/l	Valor de Reação - %
sódio (Na^+)			cloreto (Cl^-)		
potássio (K^+)			carbonato (CO_3^{2-})		
cálcio (Ca^{2+})			bicarbonato (HCO_3^-)		
magnésio (Mg^{2+})			hidróxido (OH^-)		
ferro total (Fe)			sulfato (SO_4^{2-})		
alumínio (Al^{3+})			sulfeto (S^{2-})		
estrôncio (Sr^{2+})					
lítio (Li^+)					
total de cátions			total de ânions		

PROPRIEDADES DE REAÇÃO (PALMER) - %	
salinidade primária (cloretos e sulfatos de Na^+ , K^+ e Li^+)	
salinidade secundária (sulfatos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} e Ba^{2+})	
salinidade terciária (cloretos e sulfatos de Fe e Al^{3+})	
alcalinidade primária (carbonatos de Na^+ , K^+ e Li^+)	
alcalinidade secundária (carbonatos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} e Ba^{2+})	

DIVISÃO DE PETRÓLEO

171.

LABORATÓRIO DE GEOQUÍMICA INORGÂNICA

Tabela 19 - Resultados de análises de água

Poço: AC

Teste de formação:			Intervalo:		
cátions	mg/l	me/l	ânions	mg/l	me/l
sódio (Na ⁺)	24,4	1,06	cloreto (Cl ⁻)	9,5	0,27
potássio (K ⁺)	1,31	0,03	carbonato (CO ₃ ²⁻)	ausente	
cálcio (Ca ²⁺)	2,5	0,12	bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	25,7	0,42
magnésio (Mg ²⁺)	0,7	0,06	hidróxido (OH ⁻)	ausente	
ferro total (Fe)			sulfato (SO ₄ ²⁻)	<20	
alumínio (Al ³⁺)			borato (B ₄ O ₅ ²⁻)		
estrôncio (Sr ²⁺)			sulfeto (S ²⁻)		
lítio (Li ⁺)			brometo (Br ⁻)		
cobre (Cu ²⁺)			iodeto (I ⁻)		
níquel (Ni ²⁺)					
manganês (Mn ²⁺)					
amônio (NH ₄ ⁺)					
silica (SiO ₂)					
Alcalinidade total (CaCO ₃)	21,1mg/l				
Dureza total (CaCO ₃)	8,5mg/l				
pH a 18,2°C 7,44					
resistividade a 25°C (ohm.m) CE = 151,0 µs/cm					
sólidos totais dissolvidos					

VALORES DE REAÇÃO - PALMER

cátions	me/l	Valor de Reação - %	ânions	me/l	Valor de Reação - %
sódio (Na ⁺)			cloreto (Cl ⁻)		
potássio (K ⁺)			carbonato (CO ₃ ²⁻)		
cálcio (Ca ²⁺)			bicarbonato (HCO ₃ ⁻)		
magnésio (Mg ²⁺)			hidróxido (OH ⁻)		
ferro total (Fe)			sulfato (SO ₄ ²⁻)		
alumínio (Al ³⁺)			sulfeto (S ²⁻)		
estrôncio (Sr ²⁺)					
lítio (Li ⁺)					
total de cátions			total de ânions		

PROPRIEDADES DE REAÇÃO (PALMER) - %

salinidade primária (cloretos e sulfatos de Na ⁺ , K ⁺ e Li ⁺)
salinidade secundária (sulfatos de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Sr ²⁺ e Ba ²⁺)
salinidade terciária (cloretos e sulfatos de Fe e Al ³⁺)
alcalinidade primária (carbonatos de Na ⁺ , K ⁺ e Li ⁺)
alcalinidade secundária (carbonatos de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Sr ²⁺ e Ba ²⁺)

da prensa no sítio.

As amostras coletadas foram secas em uma estufa a 110°C durante 48 horas e, em seguida, moidas e peneiradas (#40).

Foram coletadas amostras de água de cada um dos poços (1B e 2C), no início de sua operação (Novembro /1981).

7.2 - Descrição e Análise - As amostras foram pesadas e separadas para serem medidas.

Com o uso de um detector semicondutor de Ge(Li), acoplado a um contador e seletor multicanal, fez-se a contagem do frasco a ser utilizado (Marinelli) por 20 min.

Em seguida, analisou-se a amostra de solo (2 Kg) proveniente da mistura das duas profundidades de coleta por 500 min.

O Marinelli foi descontaminado após a retirada do solo, e preenchido com 1ℓ de água subterrânea para a medição por 200 min.

Os resultados obtidos estão na Tabela abaixo:

Amostra	Contagem Global	Contagem ^{do Frasco} líquida
Água subterrânea	809 cpm/ℓ	815 cpm
Solo do sítio	1310 cpm/ 2Kg	

Qualquer medida futura da atividade gama-total do solo ou da água subterrânea que indique atividades maiores que as tabeladas acima, servirão como uma indicação direta do nível de contaminação da área. Portanto, os valores obtidos nesta avaliação devem estar registrados durante o tempo operacional do sítio.

C A P Í T U L O V I I

VII - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO GEOHIDROLÓGICA DO SÍTIO DO IPEN.

1. Discussão dos Resultados.

1.1 - Construção dos Poços:

A construção dos poços 1B, 2C, AC e DC seguiram corretamente as recomendações dos detalhes de construção dos poços desenhados na Figura 34, podendo então serem admitidas as condições de validade estabelecidas para as medições de velocidade de fluxo da água subterrânea.

O pré-filtro construído de acordo com o detalhe da Figura 34, apresenta uma área perfurada de 13% e, portanto, dentro das especificações teóricas (K_1) do Capítulo VI, item 2.1.

Como o diâmetro das areias do pré-filtro ($\phi \approx 0,60\text{cm}$) é suficiente para garantir uma permeabilidade menor (K_2), e o aquífero certamente possui uma camada de alteração constituída de fragmentos de rocha alternados com solo de decomposição predominantemente siltoso a argiloso, com uma permeabilidade (K_3) muitas vezes menor, justifica-se a relação $K_1 \gg K_2 \gg 10K_3$.

1.2 - Perfil Geológico do Poço 1B:

A camada superficial é predominantemente argilosa, (vide Figura 28), e apresenta uma espessura variável em torno de 15m.

A camada superficial é de argila silto-arenosa, tornando-se bem mais permeável a partir dos 3 metros até os 6 metros, mostrando lentes de areia, intercaladas com as camadas

de argila, com alguns centímetros de espessura.

A esta profundidade (6m), encontramos um veio de aproximadamente 2 metros de espessura, de uma argila, aparentemente, de boas propriedades sorcivas.

A argila tende a predominar até os 15m, onde o perfil torna-se arenoso, dominando as camadas seguintes até encontrar a rocha alterada aos 19m e fragmentos de rocha aos 20m.

1.3 - Perfil Geológico do Poço 2C:

Neste poço, o perfil geológico superficial, também, é predominantemente argiloso e apresenta uma espessura em torno de 8m (vide Figura 29).

A camada superficial é de argila silto-arenosa intercalada com algumas lentes finas de areia, até os primeiros 8m.

Nesta profundidade (8m), inicia-se a zona saturada, comprovando-se nitidamente a presença de uma areia bem permeável.

Esta zona caracteriza-se por uma predominância de areias finas a médias, que termina gradativamente, passando de areno-argilosa a argila-arenosa nas profundidades de 11, 14 e 17m.

Seguindo-se a estas camadas encontramos uma camada de alta permeabilidade, composta por grãos de quartzo e fragmentos da rocha matriz, entre os 18 e 20m.

1.4 - Perfil Tridimensional da Região dos Pocos 1B e 2C:

A Figura 25 ilustra a geologia característica do local onde está assentado o sítio de estocagem do IPEN.

Nota-se claramente, a predominância das argilas silto-arenosas separadas por camadas estreitas de areia fina a média.

A camada superficial tem uma espessura de argila que varia de 3 a 4m em toda a região.

A areia pode-se apresentar na forma de pequenas lentes, mas torna-se em alguns pontos, predominante a partir dos 4m. A espessura de suas camadas pode variar de alguns centímetros a poucos metros.

Ao se atingir os 6 primeiros metros encontra-se o início de uma camada de argila cinza de boas propriedades sorcivas. Esta argila estende-se até as profundidades de 18/19m, onde inicia a zona alterada que estende-se por poucos metros até atingir a rocha suporte.

A Figura 25 apresenta alguns dados provenientes de sondagens realizadas nas proximidades do sítio, especificando os poços perfurados, seus níveis altimétricos, níveis d'água, perfis geológicos e a provável geologia característica da região, em uma perspectiva tridimensional.

1.5 - Análise Gama-Natural dos Poços 1B e 2C:

As argilas apresentam um alto teor de radionuclídeos emissores de radiação gama, em sua constituição, devido a duas causas principais:

1. As argilas são formadas pela ação das intempéries sobre o feldspato, principalmente, que é encontrado em abundância nas rochas ígneas. Estas rochas contêm nuclídeos como o ^{238}U e o ^{234}Th , e outros elementos das famílias do Urânio e do Tório, que possuem meias-vidas de bilhões de anos, possibilitando a sua presença nos minerais de argila.

2. A argila é um mineral composto de alumino-silicatos que formam uma rede cristalina que possui grande afinidade por íons. Em virtude de sua alta porosidade e baixa permeabilidade, os elementos carregados pela água de percolação, como o ^{137}Cs e o ^{40}K , tendem a ser adsorvidos ou adsorvidos por

troca-iônica, devido ao tempo em que a água fica em contacto com a argila.

As areias são formadas essencialmente por grãos de quartzo, cuja rede cristalina é bastante estável, posicionando-se em uma configuração que tende a expulsar os cátions de grandes dimensões, como o ^{4+}Th e o ^{4+}U . Portanto, a adsorção destes minerais é seletiva e não ocorre absorção, resultando em camadas de baixo conteúdo radioativo.

Como vemos nas Figuras 28 e 29, o perfil gama-natural representa uma confirmação da análise geológica das amostras coletadas durante a perfuração dos poços.

No poço 2C, a camada final de solo apresenta uma contagem gama-natural alta, que pode significar um acúmulo de lama bentonítica e sedimentos que não foram levados pelo fluxo da zona alterada de alta permeabilidade que precede a rocha suporte.

No poço 1B, a camada final parece apresentar as mesmas características do poço 2C porque, apesar de apresentar uma camada nitidamente arenosa, não proporciona uma redução sensível da contagem gama-natural, com exceção da região onde está acoplado o filtro.

A perfilagem gama-natural termina pouco antes do fundo do poço, porque não foi possível penetrar além dos 19 metros, provavelmente devido ao mesmo acúmulo de sedimentos no fundo do poço.

Está claro nos gráficos das Figuras 28 e 29 que os perfis gama-natural indicam um aumento considerável da atividade (cpm) nas zonas argilosas e uma redução nas zonas arenosas.

Como podemos visualizar nos gráficos das Figuras 28 e 29, há também, uma redução da atividade ao atingirmos a zona saturada, em virtude da blindagem da água aos raios gama.

Entretanto, a redução do número de contagens não altera a identificação das camadas, uma vez que a água está presente em toda a extensão do poço a partir do nível d'água.

Esta perfilagem, como pudemos notar, é essencial para comprovar e analisar mais detalhadamente a estratificação geológica de cada poço.

1.6 - Perfil Geológico da Vizinhança dos Poços AC e DC:

A camada superficial, como em toda a extensão do IPEN, caracteriza-se por uma camada argilosa de 3 a 4 metros de espessura, como pode ser visto na Figura 43 .

Ao contrário dos poços 1B e 2C, o lençol desta região localiza-se nos primeiros 3 metros de profundidade, onde inicia-se uma camada de areia fina, que tende a média e grossa aos 10,5 metros .

A partir desta profundidade, o terreno torna-se gradualmente argiloso, predominando a argila aos 12 metros. Esta camada argilosa estende-se até os 17/18 metros, onde aparecem os grãos de quartzo, que tornam-se mais numerosos aos 18m.

A zona alterada, que se inicia nesta profundidade , é caracterizado pela presença de fragmentos de rocha em meio argiloso e quartzítico, tornando-se predominantemente formada por fragmentos de rocha ao aproximar-se da rocha matriz, aos 20 metros de profundidade.

1.7 - Direção de Fluxo do Poço 2C:

A velocidade lenta de injeção do traçador e o dispositivo centralizador do tubo de injeção, contribuíram para uma boa definição da direção de fluxo no poço 2C, apresentando uma diferença superior a 3 vezes o valor da menor contagem.

A direção resultante segue aproximadamente a direção perpendicular às linhas do contorno topográfico, dirigin-

do-se ao Departamento de Proteção e Dosimetria e provavelmente na direção do Prédio do Reator e finalmente para a Portaria Geral.

A direção é pontual e está representada através de um gráfico radial, na Figura 42, e segue aproximadamente a direção indicada pela seta da Figura 22.

1.8 - Velocidade de Fluxo da Água Subterrânea:

As velocidades de fluxo obtidas para os poços 1B e 2C, como podemos observar nas Figuras 37 e 38, variam de 9,3 a 42cm/dia, denotando uma velocidade relativamente baixa.

As velocidades de fluxo obtidas para os poços AC e DC, como podemos observar nas Figuras 39 e 40, variam de 6,9 a 8,6 cm/dia, indicando uma velocidade de fluxo muito baixa. Estes valores vem de encontro à topografia plana da região, e a grande quantidade de argila, características de um aquífero de baixa velocidade de fluxo.

As velocidades obtidas para os meses de Dezembro de 1981 são um pouco maiores do que as obtidas nos meses de Maio e Junho de 1983. Esta variação pode ser justificada pela diferença entre as precipitações pluviométricas ocorridas nos meses de chuva (verão) e nos meses de inverno (Maio e Junho), (vide Figura 27).

1.9 - Dados Hidroquímicos:

Os valores de condutividade são baixos e indicam a presença de uma pequena quantidade de sais dissolvidos na água subterrânea, lixiviados das camadas superficiais.

O pH do solo próximo ao poço 1B apresenta valores menores que os do poço 2C. O baixo valor do pH indica a presença de maior quantidade de argila. As soluções argilosas geralmente são mais ácidas que as siltosas e arenosas. O mesmo se

aplica à condutividade, isto é, a condutividade das soluções argilosas é maior do que a das soluções siltosas e arenosas.

A alta condutividade da água indica a presença de ânions lixiviados da matriz argilosa.

Como pode-se notar na tabela de pH e condutividade, não há uma variação muito evidente do pH e da condutividade ao longo do tempo.

1.10 - Variação do Nível da Água:

Conforme o gráfico apresentado na Figura 27, o nível d'água acompanha as variações de precipitação, com uma diferença de aproximadamente dois meses entre o pico de chuva e a variação do nível d'água. Nota-se claramente uma diferença constante entre os níveis dos poços 1B e 2C, de aproximadamente 6 metros.

A elevação do nível da água na época de Junho de 1983 representa as grandes chuvas que ocorreram no mês de Abril no Estado de São Paulo.

1.11 - Nível Pré-Operacional de Radioatividade no Sítio:

Os dados de atividade gama total obtidos para o solo e a água do poço no sítio, estão próximos ao valor do "background". As contagens do solo são um pouco maiores por diversas razões já explicadas anteriormente.

2 - Avaliação Geohidrológica do Local:

O sítio de estocagem provisória e tratamento por prensagem dos rejeitos radioativos sólidos de baixa e média atividade do IPEN-CNEN/SP, destina-se exclusivamente à estocagem de sólidos que são protegidos da água através de quatro barreiras:

1. lona plástica impermeável;

2. tambor de aço-carbono galvanizado;
3. embalagem de papelão coberta com plástico;
4. plataforma de concreto inclinada com sistema de drenagem.

Qualquer erro ou acidente operacional dentro do prédio do sítio pode resultar em uma contaminação da área supervisionada. O prédio possui um sistema de ventilação que trabalha por sucção na área supervisionada, levando os gases a um conjunto de descontaminação contendo filtros de carvão ativado, filtros absolutos, etc., garantindo a segurança do ar atmosférico local.

Uma contaminação líquida da área supervisionada pode ser facilmente descontaminada pela natureza impermeável da tintura epóxi que reveste o piso e pela disponibilidade de infraestrutura local para lavagem e coleta de efluentes líquidos.

Uma contaminação externa (fora do prédio) porém, poderá ser determinada superficialmente pelos sistemas de monitoração das plataformas e por comparação aos dados pré-operacionais de contagem gama-total do solo. Estes dados servirão como base para indicação de qualquer contaminação futura do sítio.

Uma contaminação que por ventura atingisse o lençol subterrâneo poderia também ser detectada analisando-se a contagem gama-total e comparando-a aos dados obtidos.

O local evita a intrusão humana através de uma cerca de arame com 2m de altura, e arame farpado no topo.

O local está situado em terras do Governo, sem recursos minerais exploráveis, e fora dos projetos de expansão do Instituto.

A região aluvionar não apresenta falhas que possam provocar tectonismo, e os sismos apresentam atividade muito baixa, de causas atectônicas.

Portanto, a possibilidade de liberação de rejeitos radioativos por processos normais durante o tempo de estocagem previsto, é nula.

A avaliação geohidrológica, porém, examina as características hidrológicas e geológicas naturais de sítio, no caso de uma liberação acidental de rejeitos no solo.

2.1 - Hidrologia Superficial:

O sítio é limitado ao Sul por uma rua de acesso asfaltada, dotada de bueiros para a captação dos escoamentos superficiais que vem dos pontos de maior altitude local. Ao lado do sítio os terrenos são relativamente planos, e estão de 1,5 a 2m mais altos devido ao corte para terraplenagem do sítio. A chuva captada por estes planos, escoam paralelamente ao comprimento do sítio, e acumulam-se, durante as chuvas intensas, em um pequeno córrego que se forma a quatro metros da cerca.

A Noroeste, o sítio foi aterrado, e está beirando um talude bem incinado, que liga a cota 778 com a cota 772 de altitude. Todo o escoamento superficial, a partir da cerca, escoam para fora do sítio, juntando-se ao córrego.

Este córrego é totalmente captado pelos bueiros da rua, que se situa a 20 metros do sítio.

Como o terreno do sítio é pouco permeável nos primeiros 3m, com chuvas fortes há uma acumulação de água em pequenas poças, no setor ajardinado, previsto para as futuras plataformas.

No setor construído, onde situam-se as plataformas com os tambores de rejeitos, as águas de cima das placas de concreto são coletadas por canaletas inclinadas construídas nas bordas, e levadas para um tanque de tratamento de efluentes líquidos de 1m³ de volume, situado ao lado da primeira pla

taforma.

Caso não haja um sistema de drenagem eficiente em todo o sítio, o caminho crítico da contaminação será encurtado enormemente no caso de uma liberação accidental. Como o terreno é pouco permeável e a evaporação é muito acentuada, 1420mm/ano, uma contaminação contendo radionuclídeos como o Iodo e o Trítio, poderá contaminar o ar na direção Noroeste-Sudeste, através de ventos que podem chegar a 34m/s.

Caso seja feita uma boa drenagem no sítio, a contaminação superficial accidental, seria imediatamente drenada para um determinado local de captação, ou para o interior da zona aerada. Esta drenagem reduziria, também, a probabilidade de uma chuva forte transportar contaminantes para o talude além da cerca, e este, devido ao alto gradiente, levar os nuclídeos superficialmente, contaminando a área que separa o sítio da rua.

2.2 - Geologia Superficial:

O solo do sítio é muito bem caracterizado pelos perfis geológicos dos poços. A perfilagem gama natural fornece maiores contagens para camadas argilosas, e menores para arenosas, comprovando, assim a geologia local dos poços, (vide Figuras 38 e 39).

Na camada inicial, até os 8m de profundidade, predominam as argilas silto-arenosas, que possuem uma grande quantidade de caulinita, e uma pequena fração de illita, resultando em um solo de capacidade de retenção catiônica média, intercalada por lentes de areia de 5 a 50cm de espessura.

Esta camada argilosa inicial, pode reter uma contaminação accidental por alguns anos.

As lentes de areia podem prejudicar esta retenção, no caso de uma estação muito chuvosa. A nuvem contaminante, ao atingir a pequena camada de areia, situada apenas a 3,0 metros

do solo, seria transportada lateralmente por uma infiltração de água, chegando mais rapidamente a pontos, considerados críticos.

Porém, como a camada superficial é bem pouco permeável, a infiltração de água dá-se lentamente nestes primeiros metros e, ao chegar à pequena camada de areia, o esforço gravitacional certamente superará o movimento de dispersão lateral, e este só proporcionará uma pequena acumulação local da água.

Portanto, o solo local beneficia-se de seus depósitos aluvionares, no que diz respeito às reações químicas e físicas, pela sequência de camadas argilosas espessas e arenosas finas.

2.3 - Hidrologia Subterrânea:

O lençol freático sofre flutuações (Figura 27) dentro da zona permeável (areia fina a média com grãos de quartzo) que inicia-se aos 8m de profundidade. O nível d'água raramente atinge mais de 1m acima da camada permeável (Jun/83).

O aquífero local tem 12m de coluna de água, estendendo-se dos 8 aos 20 metros, sendo que a última camada (18-20m), de fragmentos de rocha e areia grossa, apresenta uma permeabilidade maior.

O contaminante que atingir a zona saturada, certamente sofrerá uma boa diluição no aquífero, dispersando-se até, aproximadamente, 18m onde o fluxo apresenta maior velocidade (até $V_f = 42\text{cm/d}$; ver Figura 38 e 39).

Uma contaminação accidental que atingisse esta camada, seria levada pelo fluxo através de zonas de maior permeabilidade e maior gradiente, que coincidem aproximadamente com a direção Norte (vide Figura 23). Neste caso, o fluxo seria atenuado pela diluição em Planaltos sucessivos, como o do Departamento de Proteção Radiológica e o da Portaria Geral (745m), (vide Figura 23).

Como mostram as análises do perfil topográfico e de direção dos poços 1B e 2C situados na Região Sul do Instituto, a drenagem subterrânea caracterizada pela área de captação si-

tuada entre os níveis 775 e 780m, tende a dirigir-se para o IPT, Escola Politécnica e Raia Olímpica.

A análise dos perfis topográficos de 745 a 750m da Região Noroeste onde se situam os poços AC e DC parecem indicar uma drenagem subterrânea primeiramente na direção do Canal do Jaguaré, para depois ir na direção do IPT, e daí para a Raia Olímpica.

Aparentemente, a presença de um divisor de águas promove uma barragem topográfica que torna improvável uma ligação da água subterrânea que provém do sítio para a Região dos poços AC e DC.

2.4 - Migração

A migração envolve o estudo do transporte de poluentes radioativos através do solo até o ponto mais próximo de uso da água subterrânea.

Este estudo tem por finalidade fornecer uma estimativa da concentração de radionuclídeos nas redondezas do local de disposição/estocagem na direção da água subterrânea.

Esta informação fornece a avaliação da concentração e tempo de trânsito dos radionuclídeos até o ponto mais próximo de uso da água subterrânea.

Os rejeitos mais importantes sob o ponto de vista de estocagem, no IPEN, são o Iodo-131, o Cobalto-60, o Trítio, o Urânio Natural e o Tório Natural.

Os cálculos desenvolvidos neste capítulo consideram, além dos nuclídeos citados acima, o Césio-137 e o Estrôncio-90, por serem radionuclídeos importantes para o estudo da avaliação de locais, embora eles não estejam presentes na estocagem do sítio do IPEN.

Devemos, também, levar em conta certas propriedades dos nuclídeos, que definem o seu grau de periculosidade em relação ao homem. A Tabela a seguir descreve as concentrações máxi-

mas permissíveis na água para os radionuclídeos estudados, suas meias-vidas e suas toxicidades:

Núclídeo	MPCw ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	Meia-Vida	Toxicidade
^{90}Sr	10^{-7}	28,5 a	Muito alta
^{226}Ra	4×10^{-7}	1620 a	Muito alta
U Natural	2×10^{-5}	$\approx 10^9$ a	Alta
Th Natural	3×10^{-5}	$\approx 10^{10}$ a	Alta
^{60}Co	3×10^{-5}	5,27 a	Moderada
^{137}Cs	2×10^{-5}	29,4 a	Moderada
Trítio	3×10^{-3}	12,26 a	Baixa

A migração foi analisada sob dois aspectos. A primeira consideração supõe, no caso dos poluentes aparecem no Rio Pinheiros, qual seria a concentração de poluentes no poço de dentro do sítio (2C). No segundo caso, considera-se uma certa concentração genérica de radionuclídeos no poço, (Co), e calcula-se qual seria a concentração (C) que apareceria no Rio Pinheiros.

Para avaliar tais aspectos supomos que a velocidade dos nuclídeos é a máxima obtida nos poços, considerando a porosidade efetiva do solo como 35%, para terrenos argilo-arenosos. Neste caso, a velocidade real obtida é de 120cm/dia.

Conforme medidas feitas no mapa de situação do local (Figura 21), a distância ao Rio Pinheiros foi estimada em 1860m.

Com base nestes dados podemos calcular o tempo que o radionuclídeo levará para ir do poço, no sítio, até o Rio Pinheiros (tempo de trânsito (T_t)).

$$T_t = \frac{186000}{120} = 1550 \text{ dias ou } 4,25 \text{ anos}$$

A tabela a seguir resume os valores obtidos para as

concentrações no poço do sítio, no Rio Pinheiros e as máximas permissíveis na água (MPCw), para os radionuclídeos mais importantes:

Núclídeo	MPCw ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	MPC no Poço do sítio (Ci/cm^3)	Concentração no Rio Pinheiros
Trítio	3×10^{-3}	$3,81 \times 10^{-3}$	$C = C_0/1,27$
Iodo-131	2×10^{-6}	$1,28 \times 10^{-52}$	$C = C_0/6,4 \times 10^{57}$
Cobalto-60	3×10^{-5}	$5,25 \times 10^{-5}$	$C = C_0/1,75$
Estrôncio-90	10^{-7}	$1,10 \times 10^{-7}$	$C = C_0/1,11$
Césio-137	2×10^{-5}	$2,21 \times 10^{-5}$	$C = C_0/1,11$

2.5 - Conclusões:

Em vista dos critérios básicos descritos no Capítulo III por diversas agências, foi feita a análise a seguir:

O sítio do IPEN foi analisado detalhadamente quanto às suas características climáticas, hidrológicas, geológicas, hidrográficas, geográficas, ~~e sócio-econômicas.~~

O clima úmido típico da região tropical temperada não está sujeito a mudanças bruscas de temperatura, que varia em torno de 19°C de média anual. As precipitações são elevadas, 1.400mm anuais, mas são compensadas pela elevada evaporação média anual, 1420mm por ano. As chuvas são irregulares, apresentando uma alta intensidade no verão e no final da primavera, e uma baixa intensidade ou quase ausência de chuva no início do inverno e fim de outono.

O sítio não possui uma bacia de captação (drenagem) notável. Ele possui uma rede de drenagem na rua de acesso, e abaixo das plataformas de concreto, que conduzem as águas a um tanque de tratamento de rejeitos líquidos de lm^3 , situado entre o prédio e a primeira plataforma. O solo local é pouco permeável, havendo a probabilidade de acumulação de água e escoamento através de um córrego que se forma ao lado do sítio, temporariamente, durante as chuvas fortes. Como vemos, a rede de drenagem do sítio não é suficiente para evitar a formação de poças e inundação das plataformas, aumentando a probabilidade de ligação entre estas inundações localizadas e o córrego, provocando uma contaminação que encurta o caminho crítico de eventuais contaminações acidentais. Portanto, é recomendável que seja construída uma rede de drenagem com drenos aparentes ao redor das plataformas, que conduzam a água ^{05/1}forçadamente para o sistema de drenagem da rua a Nordeste do sítio.

O solo de disposição fornece uma barreira natural suficiente para a estocagem segura dos tambores sobre o solo. Além disso, a implantação de plataformas de concreto diminui o risco de qualquer líquido da corrosão ou contaminação externa ser transportada até o solo. As plataformas, além de servirem de suporte aos tambores possuem canaletas inclinadas que captam a água e levam-na ao sistema de tratamento de efluentes líquidos.

O rejeito é protegido da água por meio de lonas de plástico impermeável, tambores de aço-carbono galvanizado pintados, e caixa de papelão ensacadas com plástico resistente.

A disposição é feita por estocagem provisória de tambores de aço, acima de plataformas de concreto, não havendo interferência importante do fissuramento da rocha suporte nas considerações de avaliação do local. Porém, se os migrantes atingirem a rocha, esta não apresenta fraturas notáveis até os primeiros 70m ⁽³²⁾.

O movimento dos contaminantes através da zona aerada é centenas de vezes menor que o da zona saturada.

O solo não está sujeito a intemperismo físicos ou químicos e a erosão superficial não oferece risco às plataformas, que estão 15cm acima do nível do solo.

O sistema subterrâneo foi analisado através de sondagens locais e poços de monitoração e foi representado em um perfil tridimensional, visto na Figura 25.

O embasamento cristalino gnáissico que sustenta a região, não está sujeito a processos tectônicos ou abalos sísmicos significativos.

O Rigolito (solo) é predominantemente argiloso com pouca areia, e sua espessura total está próxima dos 20m.

As flutuações do nível d'água mostradas na Figura 27, estão representando três anos de medidas, e apresentam flutuações de 4 a 5 metros de altura. Estas flutuações não afetam as plataformas de estocagem.

A estocagem está 11m acima do lençol freático, cujas variações podem chegar próximas dos 6,5 metros de profundidade, (vide Figura 27).

Existe captação de água dentro do IPEN, através de um poço localizado no Departamento de Metalurgia, que serve para a refrigeração de fornos. Este poço localiza-se em um aquífero que não recebe alimentação pelo lençol freático do sítio, não oferecendo risco de contaminação.

O Prédio da Administração também fazia uso de um poço de captação de água subterrânea, mas agora, segundo informações do Departamento de Engenharia do Instituto, está abandonado.

O Instituto não contém corpos d'água que possam estar sendo alimentados pelo lençol subterrâneo oriundo do sítio. O nível d'água aparentemente, não aflora dentro do IPEN, permanecendo-se em uma profundidade mínima de 2,5 metros.

Foi feita uma análise da capacidade de retenção do solo, para radionuclídeos específicos (^{137}Cs e ^{90}Sr).

Foram realizadas, também, análises da taxa de infiltração e recarga do lençol freático dentro do sítio.

O sítio está sendo monitorado através de quatro poços construídos segundo as especificações da Figura 34 com esta finalidade. A localização dos poços pode ser vista nas Figuras 21 e 44.

Os resultados da monitoração podem prever, alterações ambientais, e reavaliar certos procedimentos e práticas de estocagem e de tratamento.

A monitoração do sítio está sendo feita regularmente para poder captar as possíveis falhas do sistema, que serão prontamente remediadas.

Os elementos hidrogeológicos foram estudados detalhadamente. O IPEN não fará uso econômico da terra, e nem se prevê ocupação futura do local. A ecologia do local pode ser importante no que diz respeito a contaminações futuras. Foi constatada a presença de roedores (preás) no local, havendo o risco de contaminação por ingestão do roedor ou transporte de rejeitos em seu corpo.

Os parâmetros hidrogeológicos mais importantes são a direção do fluxo da água subterrânea, a sua velocidade, a química da água, e a zona de maior permeabilidade, que define o caminho crítico dos poluentes.

O fluxo da água subterrânea tem a direção de maior gradiente, e dirige-se para o Departamento de Proteção Radiológica, para o Prédio do Reator, e de lá para a Portaria Geral.

As características naturais do sítio evitam o movimento de contaminantes através da camada superficial de solo argiloso intercalada por finas camadas de areia. No caso de contaminação accidental, o migrante deverá percorrer 1860m de solo saturado até alcançar o Rio Pinheiros, onde sofrerá diluição nos 70m³/s de vazão. Mesmo assim, o contaminante levaria anos para atingir completamente o lençol freático, sofrendo uma boa diluição nos 7 metros de profundidade do lençol.

Os limites do sítio não preveem a expansão da área e não restringem a área de provável contaminação. Porém, o sítio é cercado também pelas cercas do Instituto, (vide linha

traço-ponto da Figura 23), que evita que a água subterrânea se ja captada nas vizinhanças do sítio.

As predições sobre o período operacional do sítio não foram modeladas matematicamente, mas este estudo é sugerido neste trabalho.

Os controles a serem realizados pelo Instituto estão ligados ao tempo de estocagem dos tambores. Portanto, para a estocagem temporária não há necessidade de prevermos um controle operacional por cem anos.

As condições de isolamento e retenção dos núclídeos descritas anteriormente asseguram a contenção dos contaminantes.

C A P I T U L O V I I I

VIII - RESULTADOS E CONCLUSÕES

1 - Resultados:

Os resultados das análises geohidrológicas mais importantes para avaliar o local estão enumerados abaixo:

1. O sítio está bem localizado geologicamente (baixa permeabilidade, nível d'água profundo, predominância de solo argiloso), geograficamente (próximos aos centros geradores de rejeitos, de fácil acesso para transporte) com uma população de aproximadamente 200.000 habitantes num raio de 3 Km. O Rio Pinheiros localiza-se a 1860m do local e possui uma vazão de $70\text{m}^3/\text{s}$.

2. O clima é úmido de região tropical temperada, com 1400mm de precipitação média anual e 1420mm de evaporação média anual, com uma temperatura média anual de 19°C .

3. O solo superficial apresenta uma espessura da ordem de 20m na região próxima ao sítio e é do tipo predominantemente argiloso, intercalado por lentes de areia fina.

4. A profundidade do lençol freático situa-se por volta dos 10 a 15m abaixo do sítio, e tende a aproximar-se dos 2,5m nas regiões mais baixas dentro do Instituto.

5. As velocidades de infiltração maiores ocorreram no poço 2C. O maior valor obtido, e tomado como referência para o estudo de migração, foi de 42cm/d, e o valor médio obtido foi de aproximadamente 18cm/d. As maiores velocidades ocorreram nos períodos de entrada do verão (Dez.), e as menores na entrada do inverno (Maio, Jun.). O poço 1B apresentou uma velocidade máxima de 29,7cm/d, e uma velocidade média de aproximadamente 20cm/d.

6. A direção de fluxo obtido para o poço 2C, parece indicar para o Norte. Esta indicação e as linhas perpendiculares aos contornos topográficos, indicam uma tendência na direção do Departamento de Proteção e Dosimetria, deste para o Prédio do Reator e, finalmente, para a Portaria Geral.

7. O tempo de trânsito calculado para a água que entra no lençol subterrâneo atingir o Rio Pinheiros é de 1550 dias.

8. Os nuclídeos mais perigosos sob o ponto de vista de migração são o Trítio, o Cobalto-60, o Iodo-131 e os emissores alfa como o Urânio e o Tório naturais.

2 - Conclusões:

As medidas de segurança adotadas para a estocagem dos rejeitos de baixo a médio nível de atividade do IPEN e as qualidades naturais do sítio provaram a sua viabilidade hidrológica e geológica, em condições normais de estocagem.

O solo possui boas qualidades para a retenção de contaminantes, destacando-se a baixa permeabilidade, alta porosidade e boa capacidade de troca-catiônica típicas dos solos predominantemente argilosos.

O nível d'água é relativamente profundo e o aquífero, até chegar ao rio, oferece uma boa diluição para qualquer contaminação acidental do solo.

Os contaminantes levariam aproximadamente 4 anos para alcançar o ponto mais próximo de uso da água subterrânea, e dificilmente ultrapassariam as concentrações máximas permissíveis na água, em virtude das considerações de diluição e retenção não consideradas nesta avaliação.

O sítio possui um acesso fácil para transporte, está próximo dos centros geradores de rejeitos e está protegido por uma cerca contra a intrusão de pessoas estranhas.

O sítio possui um sistema de monitoração compatível, pessoal técnico especializado para a operação, fiscalização e acompanhamento e uma agência responsável pelos trabalhos de licenciamento.

A infraestrutura de estocagem do sítio fornece uma segurança adicional às capacidades naturais do sítio, através de um sistema de plataformas de concreto, latões de aço-galvanizado, lona plástica e outras proteções adicionais.

A estocagem provisória dos rejeitos radioativos sólidos de baixo nível de atividade do IPEN-CNEN/SP é segura e não oferece risco à população e aos trabalhadores, no que diz respeito às condições geohidrológicas e aos aspectos gerais discutidos neste trabalho.

C A P I T U L O I X

IX - RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 - Recomendações:

1. Recomenda-se a construção de uma rede de drenagem ampla, que reduza a possibilidade de transporte superficial dos contaminantes;

2. Recomenda-se a construção de uma barreira efetiva contra a passagem de roedores (ratos e preás) para dentro do sítio, em razão do risco de contaminação;

3. Recomenda-se um controle rígido das quantidades, volumes e atividades de rejeitos estocados no sítio, destacando-se os que contêm Cobalto-60, Trítio e emissores alfa;

4. Recomenda-se um levantamento mais detalhado sobre o uso da água-subterrânea nas vizinhanças do sítio, ressaltando a necessidade de fiscalização da construção de poços, e do uso da água;

5. Recomenda-se que o sítio limite-se somente à estocagem temporária de rejeitos de baixo a médio nível de atividade, uma vez que o sítio não é técnica e ~~social-politicamente~~ adequado para a disposição e estocagem permanente de rejeitos.

6. Recomenda-se a colocação de avisos bem visíveis dos perigos de radiação no portão do sítio, assim como a instalação de um posto de segurança na frente do sítio, para evitar a invasão do sítio; devido à posição do sítio em relação à proximidade de acessos ao público ;

7. Recomenda-se a construção de poços de monitoração, próximos ao Restaurante e à Portaria Geral, adicionais pa-

ra os estudos geohidrológicos e posterior monitoração da água subterrânea;

8. Recomenda-se uma análise ambiental detalhada , pré-operacional, do solo, água e do sítio;

9. Recomenda-se o estudo da monitoração ambiental das águas dos poços pelo menos duas vezes ao ano;

10. Recomenda-se que todas as informações relativas a sondagens dentro do IPEN, sejam remetidas mediante cópia ao Departamento de Proteção e Dosimetria.

2 - Sugestões para Trabalhos Futuros:

- Modelagem numérica computacional dos mecanismos de risco do local, considerando as possíveis contaminações e suas migrações no solo, ar, água e biota.

- Avaliação do sítio, comparando-o a outros sítios e outras opções de estocagem/disposição de rejeitos, fazendo uma análise detalhada de cada opção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEXANDER, R.; LINDEMAN, R.; SAULNIER, G.; ADAM, J.; SUTHERLAND, A.; GRUHLKE, J.; HUNGE, C. Land disposal alternatives for low-level waste. In: LARGE, D.E.; MEZGA, L.J.; STRATTON, L.E.; ROSE, R.R. comps. DOE low-level waste management program: proceedings of the 4th annual participants information meeting held in Denver Co., 31 Aug. 2 Sep. 1983. p.713-21 . (ORNL-NFW-82/18).
2. ALTERNATIVES for managing wastes from reactors and post-fission operations in L.W.R. fuel cycle. Washington, D.C. Energy Research and Development Administration, May 1976. (ERDA-76-43).
3. AMPHLETT, C.B. Treatment and disposal of radioactive wastes. Oxford, Pergamon, 1961.
4. ANDREWS, L.J.; JONES, D.F.; CARSON, M.P.; COFFMAN, J.H. Industry experience in low-level waste siting regulatory, political and business considerations. Trans. Am. Nucl. Soc., 34:363, 1980.
5. BARAINCA, M.J. DOE low-level waste long term technology development. In: YALCINTAS, M.G. & JACOBS, D.G. comps. low-level waste disposal, site suitability requirements, symposium on ... , held in Arlington, Va. 8-9 Dec. 1981. v.1 p.17-30 . (NUREG/CP-0028).
6. BOEGLY JR., W.J. & DAVIS, E.C. Shallow-land-burial handbook. In: low-level waste management: 3. Annual DOE participants information meeting or..., held in New Orleans, La. 4-6 Nov. 1981 (CONF-811130-9).
7. BOROWCZYK, M.; GRACZAR, J.; ZUBER, A. Radioisotope measurements of ground water flow direction by the single-well method. Nucleonika, 10:19, 1965.
8. BOROWCZYK, M.; MAIRHOFER, J.; ZUBER, A. Laboratory investigations on the determinations of filtration velocity by means of radioisotopes. Atomkernenergie, 10:51, 1965.

9. BOWEN, V.T. & HOLLISTER, C.D. Pre and post dumping investigation for inauguration of low-level radioactive waste dump sites. Radioact. waste Manage., 1(3):235-69, 1981.
10. BRADLEY, R.G. Site suitability considerations: an industry perspective. In: YALCINTAS, M.G.
11. CHANDRA, U.; DROST, W.; MOSER, H.; STICHER, W.; KUSSMAUL, H. Applications of single borehole techniques. Study of ground water flow in the vicinity of a water works drawing bank filtrate on the lower Rhine. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. The use of nuclear techniques in water pollution studies, Advisory Group meeting on..., held in Cracow on 6-9 December 1976.
12. CHANDRA, U.; AOKI, P.E.; SILVA, J.A.R.; CASTAGNET, A.C. Measurement of flow and direction of ground water by radioactive tracers: hydrological evaluation of a waste disposal site at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1981. (IPEN-Pub-28).
13. CHANDRA, U.; GALINDO, B.J.; CASTAGNET, A. Development of conductivity probe and temperature probe for in situ measurements in hydrological studies. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Maio 1981. (IPEN-Pub-27).
14. CHANDRA, U.; PROST, W.; MOSER, H.; NEUMAIER, F. Hydrologic investigations for water resources, water pollution and civil engineering operations using isotope techniques. Indian J. Meteorol. Hydrol. Geophys., 29(4): 629-42, 1978.
15. CHOW, V.T. Handbook of applied hydrology. New York, McGraw-Hill, 1949.
16. CLARK, J.R. & POHL, H.A. Earth disposal of radioactive wastes at SRP. In: SANITARY engineering aspects of the atomic energy industry: a seminar held in Cincinnati, Ohio, December 6-9, 1955. Oak Ridge, Tn. Technical Information Service Extension, Oct. 1956. p. 162-9 (TID-7517(Pt-1a)).
17. COLLINS, J.C. Radioactive wastes. Their treatment and disposal. London, E & F.N. spon, 1960.

18. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Normas básicas de proteção radiológica. Diário Oficial da União, 19 Sep. , 1973. (Resolução CNEN-6/73).
19. COWSER, K.E. & LOMENIK, T.F. Land burial of solid waste at ORNL. In: MORGAN, JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes: proceedings of the second conference on..., held in Chalk River, Canada , 26-29 Sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p. 437-55 . (TID-7628).
20. COWSER , K.E.; LOMENIK, T.F.; McMASTER, W.M. Status report on evaluation of solid wastes disposal at ORNL: 19. Oak Ridge, Tn., Oak Ridge National Lab., 1961. (ORNL-3035).
21. CRITERIA for selection and operation on a regional waste burial facility. USAEC, Jan., 1960.
22. DEICHMAN, J.L. Unresolved technical issues for shallow and intermediate depth burial of nuclear waste. In: WASTE management: proceedings of a symposium on..., held in Tucson , Az. 10 Mar., 1980. 1980. v.1, p.51-63.
23. DEJONGHE, P. Waste disposal operations at Mol. Belgium. In: KAUFMAN, W.J. ed. Ground disposal of radioactive wastes , held in Berkeley, Ca., Aug-25-27, 1959. Berkeley Ca., Sanitary Engineering Research Lab., July, 1961. p-37-9. (TID-7621).
24. DEPOORTER, G.L. Arid-site SLB Technology development at the Los Alamos National Laboratory. In: Low-level waste management: 3rd annual DOE participants information meeting on..., held in New Orleans, 4-6 Nov. 1981. 1981. (LA-UR-81-3258); (ORNL/NFW/81/34).
25. DEPOORTER, G.L. LASL experimental engineered waste burial facility design considerations and preliminary plan. In: 3. Annual meeting of the Materials Research Society, held in Boston 17-20 Nov. 1980. 1980. (LA-UR-80-2988).
26. DROST, W.; KLOTZ, D.; KOCH, A.; MOSER, H.; NEUMAIER, F. ; RAUERT, W. The borehole dilution method for measuring ground water filtration velocity. München, Institut für Radiohydrometrie, 1968.

27. DUGUID, J.O. Status report on radioactivity movement burial grounds in Melton and Bethel Valleys. Oak Ridge, Tn., Oak Ridge National Lab., Jul. 1975. (ORNL-5017).
28. ENDO, L.S. Avaliação de parâmetros de retenção dos produtos de fissão no solo. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Instituto de Energia Atômica).
29. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Criteria for radioactive wastes, recommendation for federal guidance. Fed. Regist., 43(221): 53262-53268, 1978. (10 CFR 61).
30. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Final report of the federal task force for hazardous materials management of the Western Federal Regional Council Region 9. Washington, D. C. Mar. 1978.
31. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Storage of low-level radioactive wastes in the ground: hydrogeologic and hydrochemical factors with an appendix on the Maxey Flats, Kentucky, Radioactive waste storage site: current knowledge and data needs for a quantitative hydrogeologic evaluation. Washington, D.C., 1974. (EPA-520/3-74009).
32. ESTUDO hidrogeológico no IEA para a divisão de assessoria de obras. São Paulo, Pesquisas Hidrogeológicas S.C. Mar. 1972. (Relatório HSE-1/72).
33. FALCONER, K.L.; GREY, A.E.; WILLIAMS, H.D. Proposed waste acceptance criteria for department of energy shallow land burial sites. Idaho Falls, Idaho, EG and G, Oct. 1982. (EGG-M-19282).
34. FALCONER, K.L.; HULL, L.C.; MIZELL, S.A. Site selection criteria for the shallow land burial of low-level radioactive waste. Idaho Falls, Idaho, EG and G, May 1981. (EGG-WM-5393).
35. FINAL environment impact statement on 10 CFR part 61, licensing requirements for land disposal of radioactive waste. Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission, Nov. 1982. v. 1,2 e 3. (NUREG-0945).

45. HUNTER, P.H.; CARD, D.H.; HORTON, K. Safety assessment for area 5, radioactive waste management site. Washington, D. C. Department of Energy, Sep. 1982. (DOE-NV-10253-1).
46. HUNTER, P.H.; CARD, D.H.; HORTON, K. Studies of injection disposal
36. FORE, C.S.; VAUGHAN, N.D.; HYDER, L.K. Low-level radioactive waste technology. A selected annotated bibliography. Oak Ridge Tn., Oak Ridge National Lab., Oct. 1980. v. 2 , v. 3 (ORNL-EIS-133).
37. FRITZ, C.P.; GALE, J.E.; GILLHAN, R.W. Evaluation methods for hydrogeological conditions at radioactive waste burial sites. Trans. Am. Nucl. Soc., 32:117-9, 1979.
38. GARCEZ, L.N. Hidrologia. São Paulo, Edgar Blucher, 1967.
39. GETZ, P.A. & PULLEY, H. Consolidation of waste disposal activities at the PGDP. In: 1980 UCC-ND and gas waste management seminar, proceedings held in Portsmouth, OH., 22-23 Apr., 1980. Dec. 1980. p. 151-61. (CONF-800416).
40. GLUECKAUF, E. Atomic energy wastes: its nature, use and disposal. London, Butterworths, 1961.
41. GREY, A.E. & FALCONER, K.L. Development of criteria and standards for management of low-level radioactive waste. Idaho Falls, EG and G Idaho, Aug. 1980. (EGG-WM-5233).
42. HADLOCK, D.E.; GILCHRIST, R.L.; HOOKER, C.D.; HARRINGTON, W.N. Health Physics monitoring practices at commercial low-level waste-disposal sites in light of 10 CFR 61 requirements. In: LOW level waste disposal, symposium on..., held in Washington, D.C. 29-30 Sep. 1982. (PNL-SA-10554). (CONF-820911-3).
43. HALEVY, E.; MOSER, H.; ZELLHOFER, O.; ZUBER, A. Borehole dilution techniques: a critical review. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hydrology: proceedings of the symposium on..., held in Vienna, 14-18 November , 1966. Vienna 1967. p. 531-64.
44. HORTON, J.H. Disposal practices and experiences at the Savannah River plant. In: KAUFMAN, W.J. ed. Ground disposal of radioactive wastes, held in Berkeley, Ca., Aug. 25-27 , 1959. Berkeley, Ca., Sanitary Engineering Research Lab. , July, 1961. p. 3-6. (TID-7621).

Vienna, 1982. (IAEA-TRS-216).

56. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Underground disposal of radioactive wastes: proceedings of a symposium held in Otaniemi, Finland, 2-6 July, 1979. Vienna, 1980. v.1, v.2.
57. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Underground disposal of radioactive wastes. Vienna, 1981. (IAEA-SS-54).
58. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 1977. (ICRP-26).
59. IRISH, E.R. A comparison of ground waste disposal at Hanford 1959-1961. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes, proceedings of the second conference on..., held in Chalk River, Canada, 26-29 Sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p.506-12. (TID-7628).
60. KRAFT, S.P. & TARNUZZER, E.C. Low-level waste siting needs an overview. Trans. Am. Nucl. Soc. 34:367-8, 1980. (ANS annual meeting, Las Vegas, 8-13 Jun., 1980)
61. KROLIKOWSKI, C.Z. The influence of measuring probes on the examination of underground waters in boreholes and piezometers. Atomkernenergie, 10(10):57-61, 1965.
62. LAGUNA, W. de. Some geologic factors that influence disposal of radioactive wastes into pits. In: SANITARY engineering aspects of the atomic energy industry: a seminar held in Cincinnati, Ohio, December 6-9, 1955. Oak Ridge Tn., Technical Information Service Extension, Oct. 1956. p.426-56. (TID-7517) (Pt-1b):
63. LEGRAND, H.E. Graphic evaluation of hydrogeologic factors in management of radioactive wastes. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes, proceedings of the second conference on..., held in Chalk River, Canada, 26-29 Sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p.67-76. (TID-7628)
64. LENNERMANN, W.L. Radioactive waste management. Int. At. Energy Agency Bull., 18(5/6): 40-7, 1976.

65. LEVANTAMENTO do lençol freático do IPT, projeto Lelefript. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Set. 1975. (Relatório 8454).
66. LIEBERMAN, J.A.; PACK, D.A.; SIMPSON, E.S. Environmental aspects of nuclear facility site selection. In: INTERNATIONAL ATOMIC AGENCY. Siting of reactors and nuclear research centres: proceedings of a symposium on criteria for guidance in the selection of sites for the construction of reactor and nuclear research centres held in Bombay 11-15 March 1963. Vienna, 1963. p.43-3.
67. LINDEROTH, C.E. & PEARCE, D.W. Operating practices and experiences at Hanford. KAUFMAN, W.J. ed. Ground disposal of radioactive wastes, conference proceedings Berkeley Ca., Aug. 25-27, 1959. Berkeley, Ca., Sanitary Engineering Research Lab., July, 1961. p.7-13 (TID-7621).
68. LITTLE, C.A. & STRATON, L.E. comps. Modelling and low-level waste management, an interagency workshop: symposium on..., held in Denver, Co. 1-4 Dec. 1980. 1980. (CONF-801217).
69. LOMENICK, T.C. & BOCH, A.L. Site investigations for a bedded salt pilot plant in the PERMIAN basin. Oak Ridge Tn. Oak Ridge National Lab., 1973. (CONF-7309 19-1).
70. MAIRHOFER, J. Bestimmung der Stromungsrichtung des grundwassers in einem einzigen Bohrloch mit Hilfe radioaktiver Elemente. Atompraxis, 9:2, 1963.
71. MARTIN, J.B. Technical basis for NCR criteria for high-level and low-level waste disposal. Trans. Am. Nucl. Soc., 34: 346-48, 1980.
72. MAWSON, C.A. Management of radioactive wastes. Van Nostrand, 1962.
73. MEYER, G.L. EPA views on selection of sites for land disposal of low-level waste. In: YALCINTAS, M.G. & JACOBS, D.G. comps. Low-level waste disposal: site suitability requirements, symposium on..., held in Arlington Va., 8-9 Dec. 1981. v.1, p.31-54. 1982 (NUREG/CP-0028).
74. MEYER, G.L. Recent experience with the land burial of solid low-level radioactive wastes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear fuel cycle, proceedings of a symposium held in Vienna, 22-26 mar. 1976. p.383-95. v.2

pers, Gihson location, São Francisco, Ca., Nov. 1982 (OWNI-30).

85. PARSONS, P.J. Undeground movement of radioactive wastes at Chalk River. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal radioactive wastes; proceedings of the second conference on..., held in Chalk River, Canada, 26-29 Sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p.17-66.
86. PEARCE, D.W. Introduction to the Hanford topics. In: KAUFMAN, W.J. ed. Ground disposal of radioactive wastes: conference proceedings, Berkeley, Ca., Aug. 25-27, 1959. Berkeley, Ca., Sanitary Engineering Research Lab., July, 1961. p.3-6. (TID-7621).
87. PINTO, N.L. de S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A. Hidrologia de superfície. São Paulo, Edgard Blücher, 1973.c
88. RAYMOND, J.R.; Brown, R.E. The measurment of Hanford's geo hydrologic features affecting waste disposal. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive waste: proceedings of the second conference on..., held Chalk River, Canada, 26-29 sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p.77-98. (TID-7628).
89. REICHERT, S.O. Disposal of radioactive waste to the ground at the Savannah River Plant. In: MORGAN JR, J.M.; JAMISON, D.K.; STEVENSON, J.D. eds. Ground disposal of radioactive wastes: proceedings of the second conference on..., held in Chalk River, Canada, 26-29 Sep. 1961. Washington, D.C. ERDA, 1962. p.115-129. (TID-7628).
90. ROBERTSON, D.E.; ABEL, K.H.; TOSTE, A.P. Radionuclide migration in groundwater. LARGE, D.E.; MEZGA, L.J.; STRATTON, L.E.; ROSE, R.R. comps. DOE low-level waste managment program: proceedings of the 4th annual participants information meeting held in Denver, Co., 31 Aug. - 2 Sep. 1982 . p.607-17. (ORNL-NFW-82/18).
91. RODRIGUES, J.M.C. Waste disposal problems at the Instituto de Energia Atômica. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Ago. 1965. (IEA-Pub-102).
92. ROGERS, V.C.; ADAM, J.; SUTHERLAND, A.A. Low-level waste disposal guidelines using the RWDCS methodology. Trans. Am. Nucl. Soc., 34:369-70, 1980. (ANS annual meeting, Las Vegas 8-13 jun., 1980).

93. ROUTSON, R.C.; Sisson, J.B.; PAINE, D.; CAGGIANO, J.A. Proposed sitting criteria for the arid shallow-land burial of solid low-level radioactive wastes. Richland, Wa., Rockwell International corp., s.d. (RHO-LD-81).
94. SAWAKUCHI, R.S. Avaliação dos resíduos radioativos no Instituto de Energia Atômica. Critérios para a eliminação e estudo de técnicas para seu tratamento. São Paulo, 1977 . (Dissertação de mestrado, Escola Politécnica). (IEA-DT-063) .
95. SCHMALZ, B.L. Operation practices experiences and problems at the National Reactor Testing Station. In: KAUFMAN, W.J. ed. Ground disposal of radioactive wastes, conference proceedings, Berkeley, Ca., Aug. 25-27, 1959. Berkeley, Ca. , 1961. p.17-33. (TID-7621).
96. SIEFKEN, D.; PANGBURN, G.; PENNIFILL, R.; STARMER, R.J. Site suitability, selection and characterization. Branch technical position low-level waste licensing branch. Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission, Apr. 1982. (NUREG-0902) .
97. SMITH, R.D. Introduction to 10 CFR part 61. In: YALCINTAS, M.G. & JACOBS, D.G. comps. Low-level waste disposal, site suitability requirements: symposium on..., held in Arlington, Va., 8-9 Dec., 1981. v.1 p.5-15. (NUREG/CP-0028) .
98. STINTON, L.H. Shallow land burial handbook. In: LARGE, D.E.; MEZGA, L.J.; STRATTON, L.E.; ROSE, R.R. comps. DOE low-level waste management program: proceedings of the fourth annual participants information meeting, Denver, Co., 31st Aug. 2 sep., 1982. p.191-6. (ORNL-NFW-82/18) .
99. STRAUB, C.P. Low-level radioactive wastes. Their handling, treatment and disposal. Washington, D.C. Atomic Energy Commission, 1964.
100. TARNUZZER, E.C. The utility role in low-level waste management. In: ATOMIC INDUSTRIAL FORUM. Fuel cycle conference held in Louisiana, New Orleans, Apr. 18, 1980. (preprint) .
101. THEIS, C.V. A review of the ground water geology of the major waste-producing sites. In: SANITARY engineering aspects of the atomic industry: a seminar held in Cincinnati, Ohio, December 6-9, 1955. Oak Ridge, Tn. Technical Information Service Extension, Oct. 1956. p.243-64. (TID-7517). (Pt-1a)
102. THOMPSON, W.T.; LEDBETTER, J.O.; ROHLICH, G.A. Shallow land

- burial, why or why not. In: WATSON, J.E. ed. Health Physics Society midyear topical symposium, Williamsburg, Va., 12-15 Feb. 1979. May 1979. p.168-173. (PB-296947).
103. TODD, D.K. Ground water hydrology. New York, John Wiley, 1959.
104. VAUGHAN, N.D. & CUTSHALL, N.H. SLB technology humid. In : opus cit.
105. WAITE, D.A. & NEWCOMB, W.E. Development and application of criteria for siting. Trans. Am. Nucl. Soc., 33 136-7, 1979.
106. WILBUR, J.J. & GRAHAN, M.J. Results of the separations area ground-water monitoring network for 1981. Richland, Wa., Rockwell Hanford Operations, Jul. 1982. (RHO-HS-SR).
107. WILLIAMS, H.D. Proposed department of energy design and operations criteria for low-level radioactive waste disposal sites. Idaho Falls, Idaho National Engineering Lab., Dec. 1982. (EGG-M-23882).
108. WURZEL, P. & WARD, P.R.B. A simplified method of ground water direction measurement in a single borehole. J.Hydrol., 3:97, 1965.
109. ZITTEL, H.E. Geographic factors related to site suitability of low-level waste disposal. In: LOW-LEVEL waste disposal I. Site suitability requirements: Symposium on..., held in Arlington, Va., Dec. 8-9, 1981. 1981. (CONF-81128-1).
110. ZY-BAHR, W. Radioactive waste management: Report of Government of Brazil. Vienna, International Atomic Energy Agency, Dec. 1975 (IAEA-TA-Report-1088).
111. ZZ - Relatório do Projeto da Unidade de Tratamento e Estocagem de Rejeitos Radioativos Sólidos e Solidificados do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Out. 1983 (Relatório Interno).