



**CNEN/SP**

**ipen** Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

AVALIAÇÃO RADIOSSANITÁRIA DO SISTEMA AQUÁTICO SOB  
INFLUÊNCIA DO IPEN-CNEN/SP

Vanusa Maria FELICIANO JACOMINO, Ana Maria PINHO LEITE GORDON,  
Luzia VENTURINI.

IPEN - PUR - 282

PUBLICAÇÃO IPEN 282

DEZEMBRO/1989

SÃO PAULO

**AVALIAÇÃO RADIOSSANITÁRIA DO SISTEMA AQUÁTICO SOB  
INFLUÊNCIA DO IPEN - CNEN/SP**

**Vanusa Maria FELICIANO JACOMINO, Ana Maria PINHO LEITE GORDON,  
Luzia VENTURINI**

**DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

**CNEN/SP  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
SÃO PAULO - BRASIL**

**Série PUBLICAÇÃO IPEN**

**INIS Categories and Descriptors**

**C52.20**

**BRAZILIAN CNEN  
GAMMA SPECTROSCOPY  
LIQUID WASTES  
MONITORING  
SPECTROPHOTOMETRY**

---

**IPEN - Doc - 3491**

**Publicação aprovada pela CNEN em 06/04/89.**

**Note: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do(s) autor(es).**

## AVALIAÇÃO RADIOSSANITÁRIA DO SISTEMA AQUÁTICO SOB INFLUÊNCIA DO IPEN-CNEN/SP. (\*)

Vanusa Maria FELICIANO JACOMINO, Ana Maria PINHO LEITE GORDON, Lúria VENTURINI

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR-SP  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Caixa Postal 11049 - Pinheiros  
05499 - São Paulo - BRASIL

### RESUMO

Com o objetivo de controlar a descarga de material radioativo para o sistema aquático (córrego do Jaguaré e rio Pinheiros) sob influência do IPEN-CNEN/SP é feita a monitoração dos efluentes líquidos gerados por suas diversas instalações nucleares, antes de sua liberação para o meio ambiente. Este controle é feito medindo-se primeiramente, por espectrometria gama e/ou espectrofotometria, a atividade de cada um dos radionuclídeos contidos nos efluentes ("termo-fonte"), a seguir os resultados são comparados com os limites de descarga adotados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, quando então é autorizada a sua liberação. No ano de 1988 foi liberada uma atividade total de  $1997,9 \times 10^6$  Bq em um volume total de  $2421,4 \text{ m}^3$ . A partir do conhecimento do "termo-fonte" e de dados referentes à análise do local, foi feita a estimativa da dose equivalente efetiva recebida pelos indivíduos do público que permanecem próximos aos pontos de descarga dos efluentes no rio Pinheiros, levando-se em conta que a única via possível de exposição é a irradiação externa gama destes indivíduos. O resultado encontrado foi de  $39,4 \mu\text{Sv}$ , sendo que os radionuclídeos que mais contribuíram para essa dose foram  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{226}\text{Ra}$ . Esse valor está abaixo de 1/10 do limite de dose máximo admissível estabelecido pelas Normas de Proteção Radiológica que é de  $10^{-3}\text{Sv/ano}$ . De forma a se medir "in loco" os níveis de radioatividade recebidos pelos indivíduos do público foram coletadas e analisadas, por espectrometria gama e fluorimetria, amostras de água subterrânea, água de superfície e sedimento do rio Pinheiros. Nestas amostras foram detectados apenas  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$  e  $^7\text{Be}$  em concentrações correspondentes aos níveis de radioatividade natural. A partir destes resultados e do cálculo da dose equivalente pode-se concluir que o impacto causado no meio aquático sob influência do IPEN-CNEN/SP é desprezível.

(\*) - IPEN-CNEN/SP - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Comissão Nacional de Energia Nuclear/S. Paulo.

**EVALUATION OF THE RADIOLOGICAL IMPACT IN THE AQUATIC SYSTEM  
IN THE SURROUNDING OF IPEN-CNEN/SP.**

**Vanusa Maria FELICIANO JACOMINO, Ana Maria PINHO LEITE GORDON, Luzia VENTURINI**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR-SP  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Caixa Postal 11049 - Pinheiros  
05499 - São Paulo - BRASIL**

**ABSTRACT**

In order to control the discharges of radioactive material in the aquatic system (Jaguaré stream and Pinheiros river) in the vicinity of IPEN-CNEN/SP an effluent monitoring program was established on a routine basis.

This control is carried out by measuring the activity of the radionuclides present in the liquid effluents (source term) using gamma spectrometry and/or spectrophotometry. The results obtained are then compared with the discharge limits adopted by CNEN when a decision is made upon the discharge of the effluent under consideration.

In 1988 the total activity discharged by the nuclear installations available was  $1997,9 \times 10^6 \text{Bq}$  in a total volume of  $2421,4 \text{ m}^3$ . The next step was to evaluate the effective equivalent dose in the general public by using the results of the source term and the information available concerning the environment. It was assumed that the only critical pathway is the external gamma irradiation of the people that work in the nearby of the discharge points in Pinheiros river. The effective equivalent dose obtained was  $39,4 \mu\text{Sv}$  and the most relevant radionuclides that should be considered  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  and  $^{226}\text{Ra}$ . This result is less than 1/10 of the maximum admissible dose limit adopted by the Radiological Protection Standards which is  $10^{-3} \text{ Sv/year}$ .

In order to measure the level of radioactivity in the environment, samples of ground water, water and sediments of Pinheiros river were collected and analyzed by using gamma spectrometry and fluorimetry.

The radionuclides found were  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{\text{U}}\text{Nat}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^7\text{Be}$  with activities corresponding to the background levels.

The analysis of these results and the evaluation of the equivalent dose show that the radiological impact in the aquatic system considered is insignificant.

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade normal de uma instalação nuclear, assim como qualquer outra atividade humana, apresenta um certo risco. A operação da instalação envolve a produção de efluentes radioativos, sendo que uma completa remoção dos radionuclídeos contidos nestes efluentes, antes de serem descarregados para o meio ambiente é praticamente impossível.

Cabe à proteção radiológica da instalação estabelecer um programa de monitoração de efluentes(8) para determinar a quantidade de material radioativo ("termo-fonte") liberada para o meio ambiente, assim como detectar, imediatamente, uma liberação não planejada, acima dos limites operacionais pré-estabelecidos. A monitoração de efluentes tem portanto um caráter preventivo, já que conhecendo-se o "termo-fonte" e as características ambientais do meio receptor é possível avaliar a dose de radiação recebida pelos indivíduos do público, e em particular o grupo crítico, antes que o material radioativo seja lançado no meio ambiente.

A fim de verificar se estas liberações estão sendo feitas de forma controlada, e que portanto resultam em um grau de risco aceitável para a população em geral, deve-se realizar a monitoração ambiental(9), medindo-se "in loco" o nível de radioatividade ao qual os membros do público estão expostos. Esta monitoração tem, portanto, um caráter confirmatório e irá avaliar se as suposições feitas no cálculo da dose a partir do "termo-fonte" estão corretas.

Se a dose de radiação no grupo crítico for inferior a 1/10 do limite da dose estipulado pelas Normas de Proteção Radiológica(1), não se justifica a realização da monitoração ambiental rotineira. Neste caso, é necessário apenas controlar a descarga de material radioativo, antes que

os mesmos sejam lançados para o meio-ambiente, por meio da monitoração de efluentes.

Este trabalho descreve o programa rotineiro de monitoração de efluentes radioativos líquidos produzidos pelas diversas instalações do IPEN-CNEN/SP para a geração do "termo-fonte" e o controle das descargas. Apresenta também o programa de monitoração ambiental para a determinação dos níveis de radioatividade no ambiente aquático sob influência do IPEN-CNEN/SP. São discutidos os dados referentes a estas monitorações efetuadas no ano de 1988.

A partir dos dados do "termo-fonte" foi feita a avaliação do impacto causado no meio ambiente utilizando-se um modelo genérico, e portanto mais restritivo, que descreve a transferência dos radionuclídeos para o meio-aquático em questão.

## 2. MONITORAÇÃO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS

O IPEN-CNEN/SP é um centro de formação e de desenvolvimento científico e tecnológico nos vários campos da energia nuclear, ocupando uma área de 524.000 m<sup>2</sup> no "campus" da Universidade de São Paulo (5.000.000 m<sup>2</sup>).

As instalações do IPEN-CNEN/SP que atualmente contribuem para a geração de efluentes líquidos são :

- o reator IEA-R1, tipo piscina, que opera a uma potência nominal máxima de 2 MW durante 40h/semana, destinado à produção de radioisótopos para emprego nos campos mais diversos, incluindo a Medicina, a Engenharia, a Indústria e a Pesquisa Fundamental e Aplicada.
- o Centro de Processamento destinado à produção de subs

tâncias marcadas, geradores de  $^{99m}\text{Tc}$ , e radioisótopos primários, tais como:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ , etc. para uso em Medicina Nuclear.

- o Laboratório de Descontaminação ligado à Proteção Radiológica.
- o Centro aonde são desenvolvidas as diferentes etapas do ciclo do combustível, contendo as seguintes unidades : purificação e conversão, enriquecimento, fabricação do elemento combustível e tratamento de rejeitos radioativos.
- a unidade de produção de compostos de tório, tais como óxido e nitrato de tório.

Os efluentes líquidos gerados na maioria destas instalações são estocados e controlados nos seus respectivos tanques de retenção. As instalações ou laboratórios que não possuem seus próprios tanques de retenção armazenam o efluente líquido em bombonas.

Os efluentes gerados são amostrados, após homogeneização (manual ou automática), e enviados à Divisão de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP para análise. A frequência de amostragem é determinada pelo supervisor de proteção radiológica da instalação.

O volume amostrado (1L) é enviado à Divisão de Monitoração Ambiental acompanhado de uma ficha de controle (Anexo 1) e de identificação (Anexo 2). Esta amostra é colocada em um frasco Marinelli e analisada por espectrometria gama por meio de um detector semi-condutor hiperpuro (HPGe) com eficiência de 15%, utilizado apenas para a contagem de amostras de efluentes, acoplado a um analisador multicanal de 4096 canais. O tempo máximo de contagem é de 5000s. Para



as amostras que contém urânio e tório natural faz-se uma análise específica para a determinação da concentração destes radionuclídeos pelo método de fluorimetria ou espectrofotometria (11).

Para a identificação e quantificação dos radionuclídeos contidos nas amostras de efluentes analisadas por espectrometria gama é utilizado o Programa SAMPO (12), em operação no Centro de Processamento de Dados do IPEN-CNEN/SP.

Após a determinação da concentração dos radionuclídeos presentes na alíquota amostrada, o resultado é corrigido para o volume total do efluente armazenado. Nesta etapa é feita a comparação do valor encontrado com o limite de descarga diário adotado pelo IPEN-CNEN/SP que corresponde a um dos sugeridos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (2), quando então é tomada a decisão de liberação única ou fracionada.

O resultado da análise é entregue ao supervisor de proteção radiológica na ficha de controle (Anexo 1), onde constam os seguintes dados :

- atividade total de cada um dos radionuclídeos encontrados (Bq)
- limite de descarga diário do radionuclídeo em questão (LDD em Bq ou kg)
- fração (L) e data de eliminação

Após a autorização da descarga, os efluentes são eliminados no sistema aquático, por meio da rede de esgoto sanitário do IPEN-CNEN/SP.

Além do controle da descarga de efluentes nos próprios

locais em que são gerados é feita também a monitoração em dois pontos de descarga do IPEN-CNEN/SP (pontos I e II da Figura 3). O ponto II que se localiza próximo à Portaria Geral Norte recebe os efluentes que serão descarregados na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). O ponto I que está localizado próximo à divisa do IPEN-CNEN/SP com a Prefeitura da Cidade Universitária recebe os efluentes que serão descarregados no córrego do Jaguaré, conforme será descrito no item 3 deste trabalho.

A coleta de amostras nestes pontos é feita diariamente, sendo feita posteriormente a análise composta semanal. Futuramente pretende-se instalar um sistema de amostragem contínua nestes pontos.

### 3. O SISTEMA DE LIBERAÇÃO E O AMBIENTE AQUÁTICO.

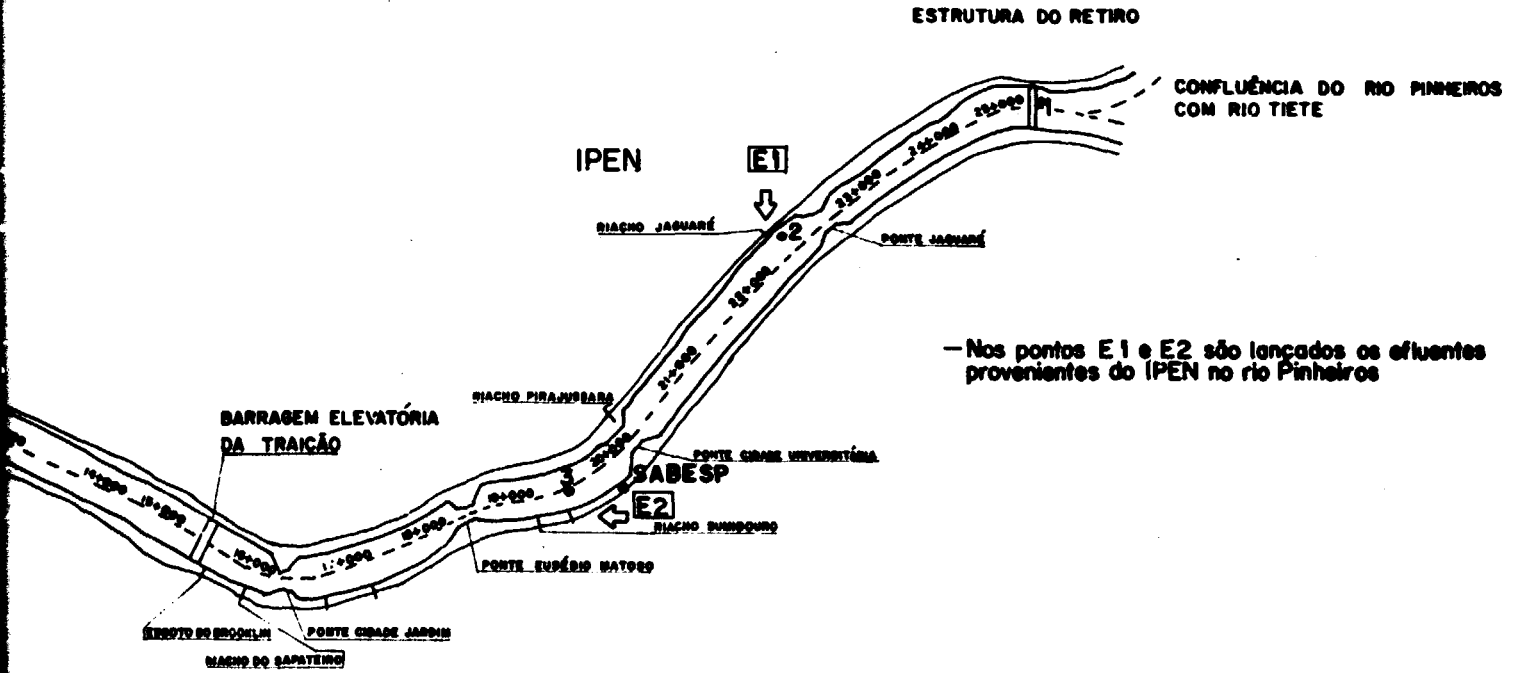
Todos os efluentes radioativos líquidos autorizados para liberação alcançam o rio Pinheiros. As liberações feitas através de dois sistemas da rede de esgoto do Instituto, separados do sistema de águas pluviais, entram no rio Pinheiros em dois pontos separados E1 e E2 (Figura 1), sendo a distância aproximada entre ambos de 2 km.

Os efluentes líquidos provenientes do Centro em que são desenvolvidas as diferentes etapas do ciclo do combustível e a unidade de produção de compostos de tório são liberados na rede de esgoto do IPEN-CNEN/SP, passando pelo ponto de descarga I, atingem o córrego do Jaguaré e alcançam o rio Pinheiros no Ponto E1, a jusante do viaduto do Jaguaré como mostrado na Figura 1.

Os efluentes das demais instalações, a saber: reator IEA-R1, Centro de Processamento e Laboratório de Descontaminação entram em uma segunda linha da rede de esgoto do







• pontos de monitoração de água de superfície e sedimentos.

**SECTION 3**

IPEN-CNEN/SP, passando pelo ponto de descarga II. Esta linha une-se à rede de esgoto da Cidade Universitária e finalmente desemboca na planta receptora de esgoto da Estação de Tratamento de Águas e Esgoto da SABESP, que recebe uma boa parte dos esgotos da zona sul da cidade de São Paulo.

Esta estação de tratamento no momento, separa somente o material sólido como lama sedimentada, areia e plásticos e descarrega o líquido no rio Pinheiros, a jusante do viaduto da Cidade Universitária, no ponto E2 (vide Figura 1). O material sólido é, periodicamente, transportado a alguns quilômetros da cidade e depositado em um aterro sanitário.

A 2 km do ponto E2 se encontra a Usina Elevatória de Traição que é usada para bombear a água do rio Pinheiros para o reservatório Billings. Esta barragem, assim como a de Pedreira, controla o fluxo do rio em casos de emergência, como por exemplo durante as enchentes. A água do rio Pinheiros pode ser bombeada em dois extremos A e B (Figura 1) : no ponto A, o rio Pinheiros é um tributário do reservatório Billings e no ponto B, é um tributário do rio Tietê. Durante a maior parte do tempo o bombeamento se dá no sentido rio Pinheiros-reservatório Billings.

O rio no seu percurso recebe, além dos esgotos e outros efluentes industriais, as águas pluviais provindas de vários drenos, como pode ser observado na Figura 1. Além disso, a Companhia Estadual Eletropaulo, aproximadamente a cada 6 meses, executa a dragagem do rio e o material sólido retirado é colocado em "bota-foras" existentes ao longo de suas margens. Posteriormente este material é transportado para aterros sanitários existentes na periferia da cidade de São Paulo.

A vazão média anual do rio Pinheiros é de  $70\text{m}^3/\text{s}$  (6)

( $2,2 \times 10^{12}$  L/ano) podendo alcançar até  $270 \text{ m}^3/\text{s}$ , dependendo da época do ano, do bombeamento de A ou B, assim como das operações de manutenção e dragagem realizadas em várias secções do rio. O tempo de trânsito entre os pontos A e B é estimado em cerca de 15 horas.

A área superficial do reservatório Billings é de cerca de  $120 \times 10^6 \text{ m}^2$ , e sua capacidade cerca de  $1200 \times 10^6 \text{ m}^3$ . O tempo de residência da água no reservatório é de aproximadamente 100 dias<sup>(5)</sup>. A descarga da água do reservatório, cerca de  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , se dá para o reservatório do rio das Pedras, em direção à Serra do Mar, aonde se aproveita o potencial hidráulico na Usina Elétrica Henry Bordon localizada na cidade de Cubatão. Na Figura 2 é mostrado o sistema hidrográfico da área metropolitana de São Paulo.

Há mais de 20 anos a qualidade da água no rio Pinheiros era tal que ele era utilizado para a pesca de peixes. Atualmente há completa ausência de vida aquática neste rio em virtude da poluição industrial e de esgotos sanitários. Suas águas não são utilizadas para fins de irrigação e nem tratadas para posterior fornecimento de água potável à população. Algumas indústrias (vide Tabela 1), localizadas ao longo das margens do rio Pinheiros, captam suas águas para fins de refrigeração dos maquinários ou para uso em combate a incêndios.

As águas do reservatório Billings são utilizadas para irrigação de horticulturas em pequena escala nas áreas adjacentes. Em algumas zonas do reservatório há peixes e a pesca é praticada muito mais em caráter recreativo do que comercial.

#### 4. "TERMO-FONTE" RELATIVO AO ANO DE 1988.

Na Tabela 2 são apresentados os dados relativos à compo





TABELA 1

**RELAÇÃO DAS INDÚSTRIAS QUE UTILIZAM  
A ÁGUA DO RIO PINHEIROS.**

INDÚSTRIA	LOCALIZAÇÃO	U S O
MONARK	Canal Pinheiros Superior - próximo à Ponte do Morumbi	refrigeração das máquinas industriais
PLAVINIL	Canal Pinheiros Superior - próximo à Ponte do Socorro	fornecimento de água para o sistema de combate a incêndio
CALOI	Canal Guarapiranga próximo à Ponte de Guarapiranga	fornecimento de água para o sistema de combate a incêndio
BAYER	Canal Guarapiranga próximo à entrada do Canal	fornecimento de água para o sistema de combate a incêndio
COMABRA	Canal Pinheiros Inferior - próximo à Estrutura do Retiro	refrigeração das máquinas industriais.
SAMBRA	Canal Pinheiros Inferior - próximo à Ponte Jaguaré.	refrigeração das máquinas industriais

sição dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do IPEN-CNEN/SP no ano de 1988. Foram excluídos da Tabela os radionuclídeos cuja percentagem de contribuição com relação à atividade total liberada é inferior a 0,01% e que não são restritivos do ponto de vista de proteção radiológica, apesar deles contribuírem para a soma da atividade total.

Com relação às análises realizadas nos pontos de descarga do IPEN-CNEN/SP (vide Figura 3), verificou-se que as concentrações dos radionuclídeos de interesse resultaram menores que a atividade mínima significativa detectável. O maior valor observado foi no ponto próximo à divisa do IPEN-CNEN/SP com a Prefeitura da USP, no período de 27 de junho a 01 de julho de 1988, que foi de 86,8  $\mu$ U/L, estando muito abaixo do limite de descarga diário adotado que é de 1,42 gU/L(2).

##### **5. ESTIMATIVA DA DOSE DE RADIAÇÃO NO GRUPO CRÍTICO.**

A estimativa da dose de radiação no grupo crítico foi feita por meio de um modelo(7,13) genérico e portanto mais restritivo, a favor da segurança. Foi assumido que existe uma liberação contínua de efluentes na água do rio, o que leva a uma superestimativa da dose de radiação.

Como descrito anteriormente no item 3, a água do rio Pinheiros não é utilizada para irrigação ou tratada para posterior consumo de água potável pela população. Neste caso, a via de contaminação a ser considerada é a dispersão e sedimentação dos radionuclídeos, sendo que a principal via de exposição é a irradiação externa  $\gamma$  de indivíduos do público que trabalham nas áreas que contêm sedimentos contaminados(7,13). O grupo crítico são os trabalhadores da ELETROPAULO e SABESP que permanecem próximos aos pontos de

**TABELA 2**  
**COMPOSIÇÃO DOS EFLUENTES RADIOATIVOS LÍQUIDOS GERADOS**  
**PELAS INSTALAÇÕES DO IPEN-CNEN/SP NO ANO DE 1988.**

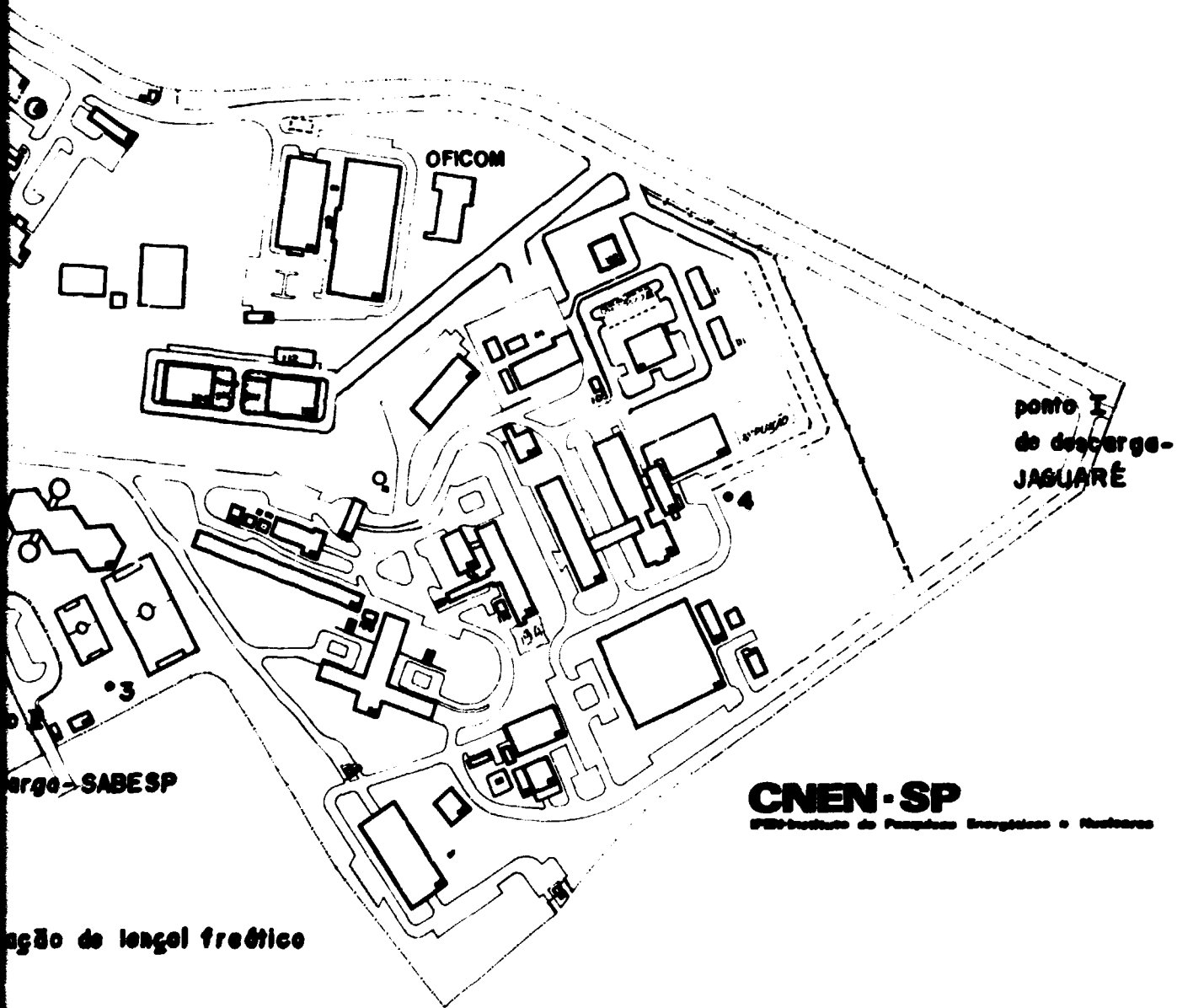
RADIONUCLÍDEO	A T I V I D A D E (x 10 <sup>6</sup> Bq/ano)	% DA ATIVIDADE TOTAL
Ag-108m	0,4	0,02
Ag-110m	2,3	0,1
Ag-111	1,0	0,05
Am-241	0,4	0,02
Co-60	157,8	8,0
Zn-65	16,7	0,8
Cr-51	0,3	0,02
Cs-134	3,8	0,2
Cs-137	70,8	3,5
H-3	1420,4	71,1
Hg-203	0,2	0,01
I-131	13,6	0,7
Na-24	31,4	1,6
Nb-95	0,2	0,01
Ra-226	0,3	0,01
Ra-228	2,4	0,1
Ru-106	1,4	0,07
Sb-124	5,5	0,3
Te-121	3,3	0,2
Te-121m	2,4	0,1
Te-123m	19,2	1,0
Te-129m	0,3	0,02
Th-234	78,6	4,0
U-nat	148,2	7,4

Atividade total liberada : 1997,9 x 10<sup>6</sup> Bq/ano.

Volume total liberado : 2421,4m<sup>3</sup>/ano.  
 (2421400 L/ano)

OBS.: No ano de 1988, o Laboratório de Radioquímica da Divisão de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP ainda não tinha a metodologia implantada para determinar a concentração de Th-nat nas amostras de efluentes.





**CNEN-SP**  
 CNPq-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

- |   |   |   |   |   |     |
|---|---|---|---|---|-----|
| • | • | • | • | • | 104 |
| • | • | • | • | • | 99  |
| • | • | • | • | • | 100 |
| • | • | • | • | • | 101 |
| • | • | • | • | • | 102 |
| • | • | • | • | • | 103 |
| • | • | • | • | • | 104 |
| • | • | • | • | • | 105 |
| • | • | • | • | • | 106 |
| • | • | • | • | • | 107 |
| • | • | • | • | • | 108 |
| • | • | • | • | • | 109 |
| • | • | • | • | • | 110 |
| • | • | • | • | • | 111 |
| • | • | • | • | • | 112 |
| • | • | • | • | • | 113 |
| • | • | • | • | • | 114 |
| • | • | • | • | • | 115 |
| • | • | • | • | • | 116 |
| • | • | • | • | • | 117 |
| • | • | • | • | • | 118 |
| • | • | • | • | • | 119 |
| • | • | • | • | • | 120 |

**SECTION .2**

descarga dos efluentes no rio Pinheiros.

A equação (7) que fornece a concentração dos radionuclídeos na água em um determinado ponto de interesse é dada por :

$$C_{W,i} = P \frac{M_p}{F} \sum_i \dot{Q}_i e^{-\lambda_i t_p} \quad (1)$$

sendo :

$C_{W,i}$  = a concentração do radionuclídeo  $i$  na água do rio (Bq/L)

$P$  = o fator de conversão que relaciona as unidades usadas para taxa de liberação e vazão do rio em unidades de concentração na água (No caso,  $P$  é igual a 1)

$\dot{Q}_i$  = a taxa de entrada do radionuclídeo  $i$  no rio (Bq/ano) (vide Tabela 2)

$F$  = o volume total anual de efluentes (L/ano)

$M_p$  = o fator de mistura que equivale ao inverso do fator de diluição (adimensional)

$t_p$  = o tempo de trânsito médio para os radionuclídeos atingirem o local de interesse(s)

$\lambda_i$  = constante de decaimento do radionuclídeo  $i$  ( $s^{-1}$ ).

$M_p$  é igual a  $\frac{F}{R}$ , onde  $R$  é a vazão média anual do rio (no caso,  $R$  é igual a  $2,2 \times 10^{12}$  L/ano e  $t_p$  foi estimado em 4 horas (14400 s)).

A concentração do radionuclídeo  $i$  no sedimento (13) é dada por :

$$C_{s,i} = \frac{C_{w,i} [1 - e^{-\lambda_i t_B}] K_C}{\lambda_i} \quad (2)$$

onde :

$C_{s,i}$  = a concentração do radionuclídeo  $i$  no sedimento (Bq/kg)

$C_{w,i}$  = a concentração do radionuclídeo  $i$  na água (Bq/L)

$\lambda_i$  = a constante de decaimento do radionuclídeo  $i$  ( $s^{-1}$ )

$t_B$  = o período de tempo no qual o sedimento está exto à água contaminada ,que é dado como 15 anos (aproximadamente metade da vida útil de operação de uma instalação nuclear).

$K_C$  = a constante de proporcionalidade empírica que leva em conta a transferência da água para o sedimento (L/kg.h)

A equação (2) é usada para facilitar a estimativa da taxa de exposição de emissores  $\gamma$  a um metro acima da superfície do sedimento, sendo feita uma estimativa da contaminação superficial efetiva(13). A contaminação superficial foi considerada como sendo aquela contida dentro de uma camada de 2,5 cm de sedimento (com uma área superficial de massa igual a 40 kg/m<sup>2</sup>). A contribuição da dose proveniente de radionuclídeos depositados abaixo da camada de 2,5 cm foi ignorada.

A equação resultante (13) será :

$$S_i = 100 T_i C_{W,i} W [1 - e^{-\lambda t_B}] \quad (3)$$

sendo :

$S_i$  = a contaminação superficial efetiva (Bq/m<sup>2</sup>)

$T_i$  = a meia-vida física do radionuclídeo  $i$  (dias)

$W$  = o fator que descreve a geometria de exposição.

Para exposições na margem do rio

$W$  é igual a 0,2

O valor 100[L/m<sup>2</sup>.dia] equivalente à expressão :

$$\frac{[K_C (L/kg.h) \cdot 40 (kg/m^2) \cdot 24 (h/dia)]}{0,693}$$

A dose de radiação no corpo inteiro ( $H_E$ ) em virtude da irradiação  $\gamma$  de indivíduos do público que trabalham em áreas que contém sedimentos contaminados será :

$$H_E = 100P \frac{M_P}{F} U_{ap} W \sum_i Q_i T_i D_f [e^{-\lambda_i t_p}] [1 - e^{-\lambda_i t_B}] \quad (4)$$

sendo :

$H_E$  = a dose equivalente efetiva anual nos indivíduos do público (mSv/ano).



$D_f$  = é o fator dosimétrico , o qual é usado para calcular a dose equivalente efetiva proveniente da exposição de uma dada concentração de radionuclídeos no sedimento, sendo expresso como a razão entre a taxa de dose ( $\frac{mSv}{ano}$ ) e a concentração do radionuclídeo por unidade de área ( $Bq/m^2$ ). Os fatores dosimétricos, usados neste trabalho convertidos para as unidades novas, encontra-se na Tabela 3 e foram retirados da literatura (4,13)

A contribuição relativa de cada radionuclídeo para a dose total foi calculada segundo o modelo descrito e pode ser vista na Tabela 4. A dose equivalente efetiva ( $H_E$ ) obtida é igual a 39,4  $\mu$ Sv. Este valor é considerado como sendo zero, do ponto de vista de proteção radiológica, pois está abaixo do nível de registro que é igual a 1/10 do limite de dose anual máximo admissível para indivíduos do público que é 1000  $\mu$ Sv/ano.

## 6. PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL

A Divisão de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP estabeleceu um Programa de Monitoração Ambiental que permite um controle dos níveis de radiação ao redor de suas instalações nucleares. Para o estabelecimento deste programa levou-se em consideração não apenas as principais vias de transferência mas também dados referentes à caracterização do local tais como : direção predominantes dos ventos, uso e ocupação da água e solo, distribuição populacional, etc.

Na Tabela 5 é mostrada a parte deste programa relativo ao controle radiológico ambiental em virtude da liberação de efluentes radioativos líquidos pelas instalações do IPEN-CNEN/SP. Nesta Tabela são apresentados os pontos e frequência de amostragem, o meio a ser amostrado e o tipo

TABELA 3

**FATORES DOSIMÉTRICOS PARA IRRADIAÇÃO  
EXTERNA NO CORPO INTEIRO (4,13)**

RADIONUCLÍDEO	FATORES DOSIMÉTRICOS CONSIDERANDO A PERMANÊNCIA EM SUPERFÍCIES CONTAMINADAS (mSv/ano por Bq/m <sup>2</sup> )
Ag-110m	4,9 x 10 <sup>-9</sup>
Ag-111	4,9 x 10 <sup>-11</sup>
Am-241	4,9 x 10 <sup>-11</sup>
Co-60	4,6 x 10 <sup>-9</sup>
Zn-65	1,1 x 10 <sup>-9</sup>
Cr-51	5,9 x 10 <sup>-11</sup>
Cs-134	3,2 x 10 <sup>-9</sup>
Cs-137	1,1 x 10 <sup>-9</sup>
H-3	0
I-131	7,6 x 10 <sup>-10</sup>
Na-24	6,8 x 10 <sup>-9</sup>
Nb-95	1,4 x 10 <sup>-9</sup>
Ra-226	3,5 x 10 <sup>-9</sup>
Ra-228	3,2 x 10 <sup>-9</sup>
Ru-106	4,1 x 10 <sup>-10</sup>
Tl-123m	2,7 x 10 <sup>-10</sup>
Tl-129m	1,9 x 10 <sup>-10</sup>
Th-234	9,7 x 10 <sup>-11</sup>
U-Nat	9,7 x 10 <sup>-11</sup>

TABELA 4

ESTIMATIVA DA CONTRIBUIÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS  
LIBERADOS NOS EFLUENTES LÍQUIDOS (TERMO-PO  
TE 1988) PARA A DOSE EQUIVALENTE EFETIVA  
ANUAL NO GRUPO CRÍTICO

RADIONUCLÍDEO	D O S E ( $\mu$ Sv/ano)
Ag-110m	$5,1 \times 10^{-2}$
Ag-111	$6,7 \times 10^{-6}$
Am-241	$1,1 \times 10^{-3}$
Co-60	21,8
Zn-65	$8,2 \times 10^{-2}$
Cr-51	$8,9 \times 10^{-6}$
Cs-134	$1,7 \times 10^{-1}$
Cs-137	4,5
H-3	0
I-131	1,5
Na-24	$2,3 \times 10^{-3}$
Nb-95	$1,8 \times 10^{-4}$
Ra-226	11,1
Ra-228	$2,5 \times 10^{-1}$
Ru-106	$3,8 \times 10^{-3}$
Tl-123m	$1,1 \times 10^{-2}$
Tl-129m	$3,5 \times 10^{-5}$
Th-234	$3,3 \times 10^{-3}$
U-nat	0

TABELA 5

PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL RELATIVO AO CONTROLE RADIOLÓGICO AMBIENTAL  
DEVIDO À LIBERAÇÃO DE EFLUENTES RADIOATIVOS LÍQUIDOS PELAS INSTALAÇÕES DO  
IPEN-CNEN/SP

MEIO A SER AMOSTRADO	TIPO DE ANÁLISE REALIZADA	UNIDADE	FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM	FREQUÊNCIA DE ANÁLISE	LOCALS DE AMOSTRAGEM
<b>ÁGUA</b>					
a) lençol freático	fluorimetria	gU/L	trimestral	trimestral	- 04 pontos correspondentes ao fluxo de água subterrânea (Figura 4)
	espectrometria $\gamma$	Bq/L			
b) água de superfície	fluorimetria	gU/L	anual	anual	- rio Pinheiros (Figura 1)
	espectrometria $\gamma$	Bq/L			1. Estrutura do Retiro 2. Córrego do Jaguari 3. SABESP 4. Ponte do Morumbi 5. Usina Elevatória de Pedreiras
<b>INDICADOR TERRESTRE</b>					
a) sedimentos	fluorimetria	gU/L	anual	anual	Mesmos pontos de amostragem de água de superfície.
	espectrometria $\gamma$	Bq/g			

de análise realizada.

Na Figura 3 são mostrados os pontos de monitoração de lençol freático. Na Figura 1 são mostrados os pontos de coleta de amostras de água de superfície e sedimentos no rio Pinheiros.

#### **6.1. AMOSTRAGEM DE ÁGUA DE SUPERFÍCIE, SEDIMENTO E LENÇOL FREÁTICO.**

Para a amostragem de sedimento e água de superfície no rio Pinheiros, teve-se a colaboração da Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico (CETESB) e da Eletropaulo. As amostras foram coletadas no meio do rio, à cerca de 10 metros de cada lado da margem, usando uma draga manual, a uma profundidade de aproximadamente 2 metros, sendo coletados os primeiros 20 cm de espessura. Juntamente com os sedimentos, eram coletados 10L de água, identificadas como amostras diferenciadas.

Em alguns locais (saída do córrego do Jaguaré e saída da SABESP) foi feita uma amostragem integral de sedimentos, isto é, juntou-se porções de diferentes amostras de vários pontos representativos do local. Estas amostras integradas foram codificadas como A e B referentes ao fluxo do rio, lado Billings e Tietê respectivamente.

No caso da monitoração do lençol freático foram coletados 10L de água subterrânea.

#### **6.2. ANÁLISE DAS AMOSTRAS.**

As amostras de sedimento foram coletadas em caçambas. Estas amostras foram secadas em estufas a 115°C por aproxima

madamente 30 horas. A seguir, foram trituradas em almofariz com pistilo até passarem por uma peneira de malha 115 (abertura de 0,125 mm). Para análise por espectrometria gama forma separados 100g e para fluorimetria 50g.

As amostras de água, após acerto de pH para um valor igual a 2, foram filtradas e concentradas para um volume de 2L, sendo separados 850 mL para espectrometria gama e 150 mL para fluorimetria.

Após o preparo, as amostras foram colocadas em frascos, que foram lacrados. A seguir esperou-se no mínimo um mês para contá-las, para que o equilíbrio radioativo fosse atingido, já que o  $^{226}\text{Ra}$  é determinado através de seus filhos emissores gama  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{228}\text{Ra}$  é determinado através de seu filho  $^{228}\text{Ac}$ .

Para a medida da determinação de emissores gama utilizou-se um detector semi-condutor hiperpuro (HPGe) com eficiência de 15%, usado apenas para a contagem de amostras ambientais. Os espectros gama foram armazenados em um analisador de 4096 canais acoplado a um microcomputador linha PC para saída de dados em disquetes. A faixa de energia utilizada foi de 0,05 MeV a 3 MeV.

Para cada tipo de amostra foram adotadas a geometria e o tempo de contagem mais conveniente, a saber :

- água: 850 mL em frasco Marinelli de 860 mL.  
tempo de contagem : 50000s.

-sedimento : 100 g em frasco de polietileno de 200g  
tempo de contagem : 10000s.

Para cada uma destas geometrias foi levantada uma curva de eficiência do detector HPGe em função da energia do

emissor gama, usando padrões radioativos calibrados. O desvio padrão médio para as curvas de eficiência foi da ordem de 9%.

A radiação de fundo foi medida num tempo suficiente (50000s) para se obter uma boa estatística e corrigida para o tempo de contagem de amostra.

As áreas dos picos dos espectros foram calculadas com o Programa SAMPO<sup>(12)</sup>. O valor da radiação de fundo foi subtraído da área de cada pico.

Para o cálculo da atividade foram usadas as curvas de eficiência obtidas para cada geometria de medida e o resultado final foi comparado com o valor da Atividade Significativa Mínima Detectável (ASMD) previamente determinado (também para as mesmas geometrias de contagem), sendo adotado sempre um nível de confiança de 95%.

Para a determinação da concentração de urânio nas amostras foi utilizado o método de fluorimetria em meio sólido<sup>(10,11)</sup>, sendo que as amostras de água foram analisadas diretamente, enquanto que as de sedimento foram analisadas após lixiviação com  $\text{HNO}_3$  e extração do urânio com acetato de etila.

### 6.3. RESULTADOS.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados referentes à monitoração do lençol freático. Nas Tabelas 7 e 8, os resultados referentes à monitoração da água de superfície e sedimentos do rio Pinheiros, respectivamente.

Para a água de superfície e sedimentos considerou-se como branco um ponto localizado fora da zona de influência

**TABELA 6**  
**RADIONUCLÍDEOS DETERMINADOS NAS AMOSTRAS DE LENÇOL FREÁTICO**

LOCAL DA COLETA	DATA DA COLETA	R E S U L T A D O S			
		$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{40}\text{K}$ (Bq/L)	Urânio Total ( $\mu\text{g U/L}$ )
Sítio de tratamento de rejeitos (ponto 1)	abril/88	<0,22	$1,1 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,3$	10,0
	agosto/88	<0,22	<0,22	<1,02	<5,0
	novembro/88	<0,22	<0,22	<1,02	<5,0
Sítio de tratamento de rejeitos (ponto 2)	abril/88	$2,0 \pm 0,3$	<0,22	<1,02	<5,0
	agosto/88	<0,22	<0,22	<1,02	<5,0
	novembro/88	<0,22	<0,22	<1,02	<5,0
Campo de futebol (ponto 3)	abril/88	$1,3 \pm 0,2$	<0,22	<1,02	<5,0
	agosto/88	$0,9 \pm 0,3$	<0,22	<1,02	<5,0
	novembro/88	<0,22	<0,22	<1,02	<5,0
Departamento de Engenharia Química (ponto 4)	abril/88	$0,9 \pm 0,2$	<0,22	$3,5 \pm 0,5$	<5,0
	agosto/88	$1,1 \pm 0,3$	<0,22	<1,02	<5,0
	novembro/88	a m o s t r a n ã o c o l e t a d a			



TABELA 7

RADIONUCLÍDEOS DETERMINADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUA DE SUPERFÍCIE.

LOCAL DA COLETA	R E S U L T A D O S				
	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{40}\text{K}$ (Bq/L)	$^7\text{Be}$ (Bq/L)	Urânio Total ( $\mu\text{g U/L}$ )
Estrutura do Retiro (ponto 1)	< 0,22	< 0,22	< 1,02	< 1,8	< 5,0
Córrego do Jaguaré (ponto 2)	< 0,22	< 0,22	< 1,02	< 1,8	< 5,0
SABESP (ponto 3)	< 0,22	< 0,22	< 1,02	< 1,8	< 5,0
Ponte do Morumbi (ponto 4)	< 0,22	< 0,22	< 1,02	< 1,8	< 5,0
Usina de Pedreiras (ponto 5)	< 0,22	< 0,22	< 1,02	< 1,8	< 5,0

**TABELA 8**  
**RADIONUCLÍDEOS DETERMINADOS EM AMOSTRAS DE SEDIMENTOS.**

LOCAL DA COLETA	R E S U L T A D O S				
	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/g)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/g)	$^{40}\text{K}$ (Bq/g)	$^7\text{Be}$ (Bq/g)	Urânio Total ( $\mu\text{g U/g}$ )
Estrutura do Retiro (ponto 1)	$0,14 \pm 0,02$	$0,066 \pm 0,008$	$0,44 \pm 0,08$	ND (**)	1,5
Córrego do Jaguarê (ponto 2)	A(*)	$0,15 \pm 0,02$	$0,082 \pm 0,008$	ND	1,6
	B(*)	$0,24 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,01$	$0,021 \pm 0,005$	3,0
SABESP (ponto 3)	A	$0,16 \pm 0,03$	$0,091 \pm 0,009$	0,014	1,4
	B	$0,16 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,01$	0,014	3,2
Ponte do Morumbi (ponto 4)	$0,13 \pm 0,01$	$0,069 \pm 0,008$	$0,36 \pm 0,06$	ND	1,4
Usina de Pedreiras (ponto 5)	$0,39 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,08$	ND	2,1
Atividade significativa mínima detectável	0,0083	0,0043	0,038	0,014	0,25

- (\*) A : fluxo do rio lado Billings  
B : fluxo do rio lado Tietê  
(\*\*) ND : não detectada

do IPEN-CNEN/SP, na confluência do rio Pinheiros com o rio Tietê (Estrutura do Retiro).

Como pode ser observado nas Tabelas 6, 7 e 8 foram detectados somente radionuclídeos naturais, sendo que a maioria dos resultados mostraram-se abaixo da atividade significativa mínima detectável. No caso da monitoração de água de superfície e sedimentos não houve diferenças significativas entre os resultados encontrados no branco e os demais pontos.

## 7. CONCLUSÕES.

Como pode ser verificado o impacto causado no meio ambiente em virtude da liberação de efluentes radioativos líquidos pelas instalações do IPEN-CNEN/SP é desprezível. Os níveis de radioatividade encontrados nas amostras de água e sedimentos do rio Pinheiros confirmam essa afirmativa.

As medidas de monitoração ambiental também confirmaram que o resultado da dose de radiação no grupo crítico determinado a partir do uso de um modelo genérico, e portanto mais restritivo, estava correto.

Apesar da dose equivalente efetiva no grupo crítico ter dado zero continuará sendo feita a monitoração ambiental operacional, a fim de se avaliar o impacto causado no meio ambiente em virtude de possíveis liberações não planejadas acima dos limites de descarga pré-estabelecidos.

É evidente que se forem levados em conta os dados relativos à utilização da água do rio Pinheiros e os enormes volumes de diluição envolvidos, poderá ser demonstrado através de uma análise custo-benefício diferencial que os limites de descarga adotados atualmente são extremamente

baixos.

É necessária portanto, a determinação, com o uso de modelos apropriados, dos limites derivados de descarga de tal forma a se avaliar qual o nível de radioatividade que pode ser liberado no meio aquático sob influência do IPEN-CNEN/SP que irá resultar em uma dose equivalente no grupo crítico igual ao limite máximo permissível anual . Para isso, é preciso um estudo mais detalhado dos fatores de diluição e tempo de trânsito até a chegada dos efluentes no rio Pinheiros. Este estudo poderá ser feito lançando-se corantes ou traçadores radioativos no ponto de emigsão e acompanhando-se sua trajetória até o ponto de descarga dos efluentes no rio.

Em uma segunda etapa deverão ser determinados os limites de descarga otimizados de tal forma a se obedecer à filosofia ALARA, cujo princípio básico é que as doses de radiação devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequível levando-se em conta fatores sócio-econômicos.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Dr.Gian-Maria A.A.Sordi pelas sugestões dadas na elaboração deste trabalho, aos técnicos Jurandyr S.de Carvalho, Ana Claudia Perez e Marcelo Bessa Nisti pela coleta, preparo e contagem das amostras e ao técnico Marcelo Francis Maduar pela ajuda na elaboração do "termo-fonte".

ANEXO 1

**FORMA DE CONTROLE DE ELIMINAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS LÍQUIDOS.**

Divisão de Monitoração Ambiental - DPA -

**CONTROLE DE ELIMINAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS LÍQUIDOS.**

IDENTIFICAÇÃO DO EFLENTE ( ) LÍQUO DATA DE COLETA : \_\_\_\_\_  
 ( ) SÓLIDO DATA DE ENTRADA PARA ANÁLISE: \_\_\_\_\_ VOLUME : \_\_\_\_\_  
 DATA DE CONTROLE: \_\_\_\_\_

ORIGEM: \_\_\_\_\_ RESPONSÁVEL PELO EFLENTE: \_\_\_\_\_  
 VOLUME TOTAL: \_\_\_\_\_ MANOCHULADOS PERMITS: \_\_\_\_\_ RECEBIDO POR: \_\_\_\_\_

CONVERSÃO QUÍMICA PERMITS:

MANOCHULADOS	LÍQUO	RESOLUÇÃO DA ANÁLISE POR	
		CONCENTRAÇÃO	ATIVIDADE TOTAL
		CdO (kg/L)	(kg)

MÉTODO DE ANÁLISE	LÍQUO	REQUISITOS ANÁLISE PARA	
		CONCENTRAÇÃO	QUANTIDADE TOTAL
		g/L	(g)
FLUORIMETRIA	1,5kg		
ESPECTROSCÓPIA			
MÉTODO DE ANÁLISE	LÍQUO	REQUISITOS ANÁLISE PARA	
		CONCENTRAÇÃO	QUANTIDADE TOTAL
		mg/L	kg
CERTIFICAÇÃO			

REGRAS DO RESPONSAVEL

FORMA DE ELIMINAÇÃO:

- ( ) ELIMINAÇÃO ÓTICA
- ( ) ELIMINAÇÃO FRACTIONADA
- ( ) REJEITO

RESPONSÁVEL:

OBS.: LÍQUO = LÍQUIDO DE DESCARCA DIÁRIA			
--	--	--	--

DATA:	DATA:	DATA:
VOLUME:	VOLUME:	VOLUME:

**ANEXO 2**

**ETIQUETAS DE IDENTIFICAÇÃO**

**Efluente**

**Amostra...../.....**

**Data da Coleta**

**Volume total do efluente**

**Fator de diluição**

**Radionuclídeos prováveis**

**Taxa de exposição**

**Outras Observações**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988. (CNEN-NE-3.01-88).
- (2) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas. Rio de Janeiro, 1985. (CNEN-NE-6.05-85).
- (3) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Unidade de tratamento e estocagem de rejeitos radioativos sólidos e solidificados. São Paulo, 1983. p.8. Documento interno.
- (4) CORLEY, C.P.; DENHAM, D.M.; JAQUISH, R.E.; MICHELS, D.E.; OLSEN, A.R.; WAITE, D.A. A guide for environmental radiological surveillance at U.S. Department of Energy Installations. Washington, D.C., Department of Energy, 1981. (DOE/EP-0023).
- (5) GARCIA AGUDO, E.; SANCHES, W.; SANTOS, J.L.; MERIGHI, A.J. Determinação das características hidráulicas da represa Billings utilizando traçadores radioativos. Trabalho apresentado no 89 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. ABES, Rio de Janeiro- 14.12 a 19.12.1975.
- (6) GARCIA AGUDO, E.; SANTOS, J.L.; MERIGHI, A.J.; SANCHES, W.; ALBUQUERQUE, A.M. Estudo do tempo de trânsito das águas dos rios Tietê e Pinheiros. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1976. (IEA-PUB-404).

- (7) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Vienna, 1982. (IAEA-SS-57).
- (8) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Monitoring of airborne and liquid radioactive releases from nuclear facilities to the environment. Vienna, 1978. Vienna, 1978. (IAEA-SS-46).
- (9) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Objectives and design of environmental monitoring programmes for radioactive contaminants. Vienna, 1975. (IAEA-SS-41).
- (10) KORKISH, J. & HÜBNER, M. Determination of uranium in minerals and rocks. Talanta, 23 :283-288, 1971.
- (11) MANUAL de procedimentos para execução do programa de monitoração ambiental da usina de enriquecimento de urânio Almirante Álvaro Alberto, Divisão de Monitoração Ambiental, Departamento de Proteção Radiológica do IPEN-CNEN/SP. São Paulo, 1988. (Informação privada).
- (12) ROUTTI, J.T. SAMPO, A FORTRAN IV program for computer analysis of gamma spectra from Ge(Li) detectors and for other spectra with peaks. Berkeley, Calif. Univ. California, Oct. 1969. (UCRL-19452).
- (13) UNITED STATES REGULATORY COMMISSION. Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor for the purpose of evaluating compliance with 10CFR part 50, Appendix. Washington, D.C., 1977. (Regulatory Guide 1.109-77 (Rev.1)).