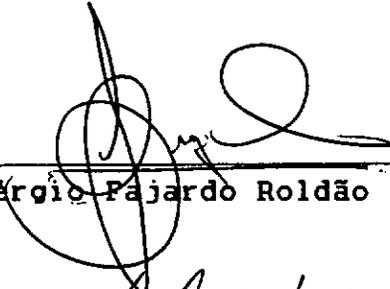


DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO EM RIOS,
ATRAVES DE TRAÇADORES RADIOATIVOS E FLUORESCENTES

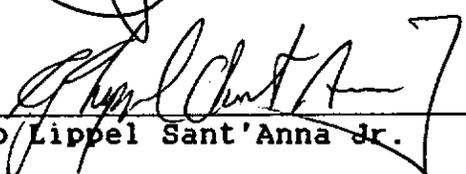
Thereza Christina de Almeida Rosso

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COODENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
POS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIENCIAS (M.Sc.).

Aprovada por:



João Sérgio Fajardo Roldão



Geraldo Lippel Sant'Anna Jr.



Carlos Antonio de Leers Costa Ribeiro



Paulo Canedo de Magalhães

Rio de Janeiro, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1986.

ROSSO, THEREZA CHRISTINA DE ALMEIDA

Determinação do Coeficiente de Dispersão, em Rios, através de Traçadores Radioativos e Fluorescentes (Rio de Janeiro) 1986.

xiv , 134 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ), M.Sc., Engenharia Civil, 1986)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1. Coeficiente de dispersão | 2. Rios |
| 3. Traçadores | 4. Teses |
| I. COPPE/UFRJ | II. Título (série) |

"Minha condição humana me fascina..."

A. Einstein

A José Antônio e aos

meus filhos:

Christiano Henrique (em memória)

Breno Augusto

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador João Sérgio Fajardo Roldão pela paciência, eficiência na orientação, e cooperação dedicada.

Ao Jonatas e a toda equipe do Laboratório de Traçadores, em especial aos que participaram dos experimentos de campo: Emydio Perreira, Sidney, Homero, Bruno, Ho, Palhano, Moura e Amauri.

Ao amigo Julian pelas valiosas sugestões.

As equipes de medições do DNAEE e FEEMA, em especial ao Eng. André Joia.

A CAPES e CNEN pelo apoio financeiro que, direta e indiretamente tornou possível este trabalho.

Aos meus pais Carlos e Lucy, e aos meus irmãos: Lidia Angélica, Carlos Jr. e Leonardo, que sempre me incentivaram.

Ao meu filho Breno Augusto e meu marido José Antônio pela compreensão, estímulo e pelas horas de carinho e diversões "emprestadas".

A Ivanilda que pacientemente me ajudou a cuidar do Breno Augusto.

Ao Landau, Gilbertinho e aos colegas das salas da ligação ABC 116 e ABC 118 pela amizade.

A Secretaria do Programa de Engenharia Civil, em especial a Beth.

Um carinho especial à Jorge Marssilac, José Paulo e Humberto Mauro que de maneira indireta me ajudaram na realização deste trabalho.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

"DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO, EM RIOS,
ATRAVÉS DE TRAÇADORES RADIOATIVOS E FLUORESCENTES"

Thereza Christina de Almeida Rosso

Março/1986

Orientador: João Sérgio Fajardo Roldão

Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste trabalho foi determinar experimentalmente o coeficiente de dispersão, em escoamentos naturais, através da aplicação de traçadores radioativos e fluorescentes.

A técnica utilizada na obtenção dos dados experimentais consistiu na injeção instantânea do traçador radioativo, Bromo - 82 e traçadores fluorescentes, Amidorodamina G. extra e Uranina.

Foi feita uma comparação entre o desempenho dos diferentes traçadores e observada a eficiência da Uranina, em escoamentos sujeitos a forte carga de poluição e de sedimentos em suspensão.

O local escolhido para os experimentos de campo foi o Rio Piabanha, entre as localidades de Pedro do Rio e Areal, no estado do Rio de Janeiro compreendendo um trecho de aproximadamente 20 km.

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

"DETERMINATION OF THE DISPERSION COEFFICIENT, IN RIVERS,
THROUGH RADIOACTIVE AND FLUORESCENT TRACERS"

Thereza Christina de Almeida Rosso

March, 1986

Chairman: João Sérgio Fajardo Roldão

The purpose of this work was to determine experimentally the dispersion coefficient in natural streams through the application of radioactive and fluorescent tracers.

The technique used to obtain the experimental data was the simultaneous injection of the radioactive tracer Bromim - 82 and the fluorescent ones, Amidorodamine G. extra and Uranine.

A comparison among these different tracers is shown as well as the performance of Uranine in a polluted stream in the presence of suspended sediments.

The site chosen for the experiments was the Piabanha River, between Pedro do Rio and Areal, located at Rio de Janeiro state, in a nearly 20 km stretch.

LISTA DE SIMBOLOS

- a - raio da tubulação (m).
- A - área da seção transversal (m^2).
- \bar{A} - área média entre o ponto de injeção e o ponto de observação (m^2).
- At - atividade a ser injetada de traçador radioativo (mCi/m^3).
- c - concentração do traçador (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- \bar{c} - concentração média do traçador (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- c' - concentração devida a flutuação entre os valores instantâneos e os valores médios (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- c* - coeficiente de Chézy ($m^{1/2} s^{-1}$).
- c_o - concentração inicial do traçador (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- Cc - concentração do traçador radioativo no recipiente de calibração ($\mu Ci/m^3$).
- Cdes - concentração máxima desejada, em uma dada seção (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- Cf - concentração de traçador radioativo na "Amostra Gardner" ($\mu Ci/m^3$).
- Cfmax - concentração de pico de traçador fluorescente no ponto mais a jusante (ppb).
- Cmax - concentração máxima de traçador (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- Cmax₁ - concentração máxima de traçador no posto P1 (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- Cmax₂ - concentração máxima de traçador no posto P2 (ppb ou $\mu Ci/m^3$).
- Crmax - concentração máxima que se deseja alcançar de traçador radioativo no ponto mais a jusante em

- relação ao ponto de injeção (ppb ou $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$).
- CMP - concentração máxima permitida em água potável de um dado traçador radioativo ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$).
- Dl - coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/s).
- Dq - coeficiente de atenuação.
- Dz - coeficiente de dispersão lateral (m^2/s).
- E' - coeficiente de transferência de massa .
- E* - taxa média de dissipação de energia por unidade de massa do fluido ($\text{erg}/\text{s}/\text{g}$).
- Ex, Ey, Ez - coeficiente de difusão turbulenta, nas direções x,y,z (m^2/s).
- f* - coeficiente de rugosidade de Weisbach-Darcy (adm).
- fd - fator de diluição da alíquota (adm).
- F - número de Froude (adm).
- F" - fator de sensibilidade de medição ($\text{cps}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$).
- Fc - fator de sensibilidade de medição no recipiente de calibração ($\text{cps}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$).
- Ff - Fator de sensibilidade de medição no campo ($\text{cps}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$).
- g - aceleração da gravidade (m/s^2).
- h - profundidade de uma vertical na seção transversal (m).
- hm - profundidade média da seção transversal (m).
- h° - profundidade adimensional (adm).
- hi - profundidade na vertical de ordem i (m).
- k - coeficiente de difusão molecular (m^2/s).
- ko - constante utilizada na equação de Ward (adm).
- k" - constante de von Kármán (adm).
- l - largura da seção transversal (m).

- L - distância de bom misturamento (m).
- M - massa de traçador utilizada (g).
- Mf - massa de traçador fluorescente (g).
- n - números de verticais utilizados no método de Fischer (adm).
- N - número de contagens líquidas detectadas durante a passagem do traçador radioativo (adm).
- N* - fator de correção utilizado para o traçador radioativo (adm).
- q - vazão por unidade de largura ($m^3/s/m$).
- q^o - vazão adimensional (adm).
- Q - vazão (m^3/s).
- r - coordenada transversal em relação ao centro da tubulação (m).
- R - raio hidráulico da seção transversal (m).
- Rc - taxas de contagem da aliquota medidas no recipiente de calibração (cps).
- Rf - taxas de contagem medidas no momento em que é retirada a "Amostra Gardner" (cps).
- Rg - taxas de contagem da "Amostra Gardner" medidas no recipiente de calibração (cps).
- R" - taxas de contagem (cps).
- S - declividade (m/m).
- t - tempo após a injeção (h).
- t_o - instante da injeção (h).
- \bar{t} - tempo associado ao centro de gravidade da curva ou tempo médio de passagem da nuvem traçadora (h).
- \bar{t}_1 - tempo associado ao centro de gravidade da curva no posto P1 (h).

- \bar{t}_2 - tempo associado ao centro de gravidade da curva no posto P2 (h).
- t_{max} - instante em que a concentração é máxima (h).
- t_{max_1} - instante em que a concentração é máxima no posto P1 (h).
- t_{max_2} - instante em que a concentração é máxima no posto P2 (h).
- Δt - tempo de passagem da nuvem traçadora em um dado posto (h)
- $2t_{1/2}$ - intervalo de tempo durante o qual a concentração é maior do que a metade da concentração máxima (h).
- T - tempo de escala Lagrangeana.
- T_0 - hora da injeção (h).
- u - velocidade instantânea na direção x (m/s).
- \bar{u} - velocidade média na direção x (m/s).
- u' - velocidade devida a flutuação entre os valores instantâneos e os valores médios na direção x (m/s).
- \bar{u}' - velocidade instantânea média na seção (m/s).
- u'' - velocidade de advecção ou celeridade (m/s).
- u° - velocidade adimensional (adm).
- u_0 - velocidade no centro da tubulação (m/s).
- u^* - velocidade de fricção (m/s).
- u_i - velocidade média na fatia vertical de ordem i (m/s).
- U - coeficiente adimensional utilizado na equação de Rimar (adm).
- v - velocidade instantânea na direção y (m/s).
- \bar{v} - velocidade média na direção y (m/s).
- v' - velocidade devida a flutuação entre os valores instantâneos e os valores médios na direção y (m/s).

- V - volume da tubulação (m^3).
- Vc - volume da aliquota (m^3).
- Vf* - volume virtual de diluição para o traçador fluorescente (m^3).
- Vr* - volume virtual de diluição para traçador radioativo (m^3).
- w - velocidade instantânea na direção z (m/s).
- \bar{w} - velocidade média na direção z (m/s).
- w' - velocidade devida a flutuação entre os valores instantâneos e os valores médios na direção z (m/s).
- x - posição ou direção longitudinal (m).
- y - posição ou direção vertical (m).
- Yo - valores medidos experimentalmente (adm).
- Yp - valores previstos no modelo (adm).
- z - posição ou direção lateral (m).
- z* - raio reduzido (adm).
- z° - distância adimensional segundo o eixo z (adm).
- Δz - largura da fatia vertical (m).
- γ - tipo de radiação emitida pelo traçador radioativo.
- θ - medida de desvio de erro (adm).
- Π - constante igual a 3,1416.
- ρ - densidade do fluido (adm).
- σ^2 - variância adimensional (adm).
- σ_t^2 - variância em relação ao tempo (h^2).
- $\sigma_{t_1}^2$ - variância em relação ao tempo no posto P1 (h^2).
- $\sigma_{t_2}^2$ - variância em relação ao tempo no posto P2 (h^2).
- σ_x^2 - variância em relação a distância longitudinal (m^2).
- τ - tensão de cisalhamento num ponto r (N/m^2).
- τ_0 - tensão de cisalhamento na parede da tubulação (N/m^2).
- ω - peso específico (kg/m^3).

SUMARIO

I.	INTRODUÇÃO	1
I.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
I.2.	DIFUSÃO E DISPERSÃO	3
I.3.	OBJETIVOS DO TRABALHO	4
I.4.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
II.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
II.1.	INTRODUÇÃO	6
II.2.	ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO POR EQUA - ÇÕES EMPIRICAS	14
II.2.1.	Introdução	14
II.2.2.	Fórmula de TAYLOR	14
II.2.3.	Fórmula de PARKER	16
II.2.4.	Fórmula de GLOVER	17
II.2.5.	Fórmula de ELDER	18
II.2.6.	Fórmula de YOTSUKURA	19
II.2.7.	Fórmula de FISCHER	19
II.2.8.	Fórmula de HENRY LIU	22
II.2.9.	Fórmula de McQUIVER e KEEFER	23
II.2.10.	Fórmula de KRENKEL e THACKSTON	25
II.3.	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO POR ME- TODOS EXPERIMENTAIS	29
II.3.1.	Introdução	29
II.3.2.	Método de TAYLOR	29
II.3.3.	Método de LEVENSPIEL e SMITH	30
II.3.4.	Método de FISCHER	32

II.3.5. Método de PARKER	35
II.3.6. Método de KRENKEL	35
II.3.7. Ajustes das Curvas Experimentais	36
III. METODOLOGIA APLICADA	39
III.1. DESCRIÇÃO DOS TRAÇADORES	39
III.1.1. Traçadores Radioativos	40
III.1.2. Traçadores Fluorescentes	41
III.2. ESCOLHA DOS TRAÇADORES	42
III.3. MEDIÇÃO DOS TRAÇADORES	43
III.3.1. Medição do Traçador Radioativo	43
III.3.2. Medição do Traçador Fluorescente	44
III.4. PROCEDIMENTO DE CAMPO	45
III.4.1. Critérios de Seleção dos Postos de Amostragem	45
III.4.2. Pré-dimensionamento	46
III.4.2.1. Cálculo da Distância de Bom Misturamento	47
III.4.2.2. Massa e Atividade a Injetar	48
III.4.3. Proteção Radiológica	51
III.4.4. Preparação e Injeção da Mistura de Traçadores	52
III.4.5. Medição das Características Hidráulicas	54
III.5. PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO	55
III.5.1. Preparação e Análise das Amostras Fluorescentes	55
III.5.2. Transformação das Taxas de Contagem em Concentrações	56
IV. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA - RESULTADOS	59
IV.1. AREA SELECIONADA E LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE AMOSTRAGEM	59
IV.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO	64

IV.2.1. Distância de Bom Misturamento	64
IV.2.2. Atividade e Massa a Injetar	66
IV.3. EXPERIMENTOS DE CAMPO	70
IV.4. RESULTADOS OBTIDOS	78
V. ANALISE DOS RESULTADOS	92
VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	103
APENDICES	107

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A evolução dos povos está intimamente ligada à abundância e carência de água por ser esta um recurso natural essencial à subsistência do homem, tanto em termos quantitativos como qualitativos. Contudo, observa-se que com o desenvolvimento econômico e o crescimento industrial desordenados, ocorre elevação do volume de despejos de águas residuárias, de origem doméstica e industrial, nos corpos de águas naturais causando quase sempre, complexos problemas de poluição.

Segundo OLIVEIRA (1), pode-se considerar poluição como sendo qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas, que podem constituir prejuízo à saúde, à segurança e ao bem estar das populações, comprometendo o equilíbrio do meio ambiente natural (flora e fauna aquáticas) e a qualidade da água para fins de consumo humano, industrial ou recreativo.

Os poluentes lançados em águas receptoras podem ser classificados em conservativos e não conservativos.

O poluente conservativo ou não degradável, é aquele que mantém suas propriedades ao longo do tempo. Pode-se citar como exemplo os ions metálicos e as substâncias radioativas de longa meia vida.

O poluente não conservativo ou degradável, é aquele

cujas propriedades não se mantêm constantes ao longo do tempo. Neste tipo de poluente são classificados, por exemplo, a maioria dos compostos orgânicos e os rejeitos radioativos de curta meia vida.

Estes poluentes, conservativos ou não, podem trazer graves consequências ambientais e econômicas, necessitando, assim de controle cujos melhores resultados são sempre obtidos através de ação preventiva.

Com o crescimento industrial desordenado aumenta a possibilidade de ocorrerem despejos industriais clandestinos ou não e de descargas acidentais contendo substâncias tóxicas solúveis, ou mesmo material radioativo. A ação das autoridades competentes através da adoção de medidas visando evitar perigos à saúde da população que utiliza esta água, depende muitas vezes do conhecimento das condições de transporte e de misturamento do poluente no corpo de água contaminado pelo despejo.

As características hidrodinâmicas, de transporte e de misturamento de determinados trechos de rios são de fundamental importância. O conhecimento destas características são essenciais para a modelagem de um sistema que permita prever os níveis de contaminação que seriam alcançadas a jusante de um determinado ponto de descarga acidental, intencional ou clandestina.

As características de transporte dependem de parâmetros hidráulicos e podem ser obtidas com relativa facilidade por métodos convencionais bem conhecidos, tais como molinetes, vertedores, calhas, etc. ou mesmo por métodos não convencionais com o emprego de traçadores, a serem descritos

mais adiante.

As características de misturamento são mais difíceis de serem obtidas, pois, além de dependerem das características hidráulicas, dependem do conhecimento do processo de difusão e do processo de dispersão, ambos de difícil avaliação.

I.2 -DIFUSÃO E DISPERSÃO

Na literatura técnica os termos difusão e dispersão não estão definidos com muita clareza. O Shorter Oxford Dictionary (1808) definiu difusão, com relação ao processo físico, como sendo a interpenetração molecular espontânea de dois fluidos sem combinação química. De maneira geral, neste dicionário, como em outras fontes bibliográficas, os termos difusão e dispersão são sinônimos um do outro, ou têm definições pouco precisas.

O misturamento de um fluido em outro pode ser devido ao movimento turbulento aleatório de maneira análoga ao movimento molecular ou pode resultar das diferenças de velocidades na seção transversal de um escoamento.

Partindo deste princípio, RAUDKIVI (2) considerou difusão como sendo o espalhamento que ocorre no fluido, estando o mesmo em movimento ou não, causado pelo movimento aleatório das moléculas do fluido ou do poluente; e, considerou dispersão como um processo de misturamento decorrente do espalhamento de partículas no escoamento causado pelo gradiente de velocidade em diferentes pontos da seção transversal e pelo efeito da difusão turbulenta.

Neste trabalho os processos de difusão e dispersão serão considerados da mesma maneira como foram definidos acima.

I.3 - OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho pode ser dividido em duas partes distintas.

A primeira foi desenvolver uma metodologia de determinação experimental do coeficiente de dispersão, para rios, fazendo uso da técnica de traçadores radioativos e fluorescentes. A metodologia foi aplicada ao Rio Piabanha (RJ) e os valores dos coeficientes de dispersão obtidos no campo, foram comparados com os valores obtidos através de diversas equações empíricas disponíveis na literatura.

Na segunda parte foi feita uma análise crítica do emprego de traçadores radioativos e fluorescentes na determinação experimental do coeficiente de dispersão, bem como no estudo da eficiência do traçador fluorescente Uranina, em escoamentos sujeitos a forte carga de poluição e de sedimentos em suspensão.

Também neste caso, os trabalhos experimentais foram realizados no Rio Piabanha (RJ) devido aos seus altos índices de poluição causados por descargas permanentes de efluentes industriais e domésticos ao longo de suas margens e eventualmente por descargas acidentais.

Na seleção do local foram considerados fatores ligados à sua representatividade e a facilidades logísticas que permitissem a realização dos ensaios com recursos financeiros

disponíveis. A seleção do local contou ainda, com o apoio da Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente - FEEMA, RJ.

I.4 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo II, que se segue, é apresentada a revisão bibliográfica que contém um resumo das fórmulas empíricas mais utilizadas na literatura para estimativa do coeficiente de dispersão, bem como a utilização de alguns métodos para a sua determinação experimental, com a aplicação da técnica de traçadores.

No Capítulo III, são apresentados o pré-dimensionamento, o equipamento empregado e os procedimentos de campo e de laboratório para a determinação experimental do coeficiente de dispersão em campo, utilizando a técnica dos traçadores radioativos e fluorescentes, aplicados ao Rio Piabanha (RJ).

Os dados e os resultados obtidos nos experimentos de campo são apresentados no Capítulo IV, onde os resultados são comparados aos valores fornecidos pelas diversas fórmulas empíricas de estimativas do coeficiente de dispersão.

No Capítulo V são apresentadas as análises dos resultados e no Capítulo VI as conclusões obtidas e algumas recomendações para a continuação da pesquisa.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - INTRODUÇÃO

Quando uma quantidade determinada de uma substância solúvel conservativa com concentração c_0 é introduzida num escoamento num determinado tempo t_0 , esta substância é transportada a jusante ao mesmo tempo que se mistura com o líquido em escoamento conforme se observa na Figura (II.1).

Considerando que o movimento da substância processa-se em fluxo turbulento, a distribuição de velocidades e concentrações ao longo de uma seção transversal qualquer é similar às apresentadas nas Figuras (II.2a) e (II.2b) ao longo da linha AB.

A distribuição da massa deste material conservativo ou o movimento geral da nuvem (variação espacial da concentração deste material) é governado por uma equação baseada na lei de conservação de massa, que para o caso tridimensional, pode ser descrita como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k \frac{\partial c}{\partial x} + k \frac{\partial c}{\partial y} + k \frac{\partial c}{\partial z} \quad 2.01$$

onde:

c - concentração do material,

x - posição ou direção longitudinal,

- y - posição ou direção vertical,
 z - posição ou direção lateral,
 u - velocidade instantânea na direção x ,
 v - velocidade instantânea na direção y ,
 w - velocidade instantânea na direção z ,
 t - tempo após a injeção,
 k - coeficiente de difusão molecular,

cuja solução permite obter valores instantâneos de c , incluindo as flutuações, uma vez que as velocidades u , v , e w são valores totais instantâneos incluindo as flutuações turbulentas. O valor destas flutuações geralmente não é conhecido, devido à sua difícil avaliação; além disso, há maior interesse em se conhecer um valor médio da concentração num intervalo de tempo Δt . Para expressar a equação de balanço de massa em função desses valores médios toma-se a concentração e as velocidades instantâneas como a soma de duas parcelas:

$$c = \bar{c} + c'$$

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

2.02

onde:

$\bar{c}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ - valores médios,

c', u', v', w' - flutuações obtidas das diferenças entre os valores instantâneos e os valores médios.

Substituindo as equações (2.02) na expressão (2.01)

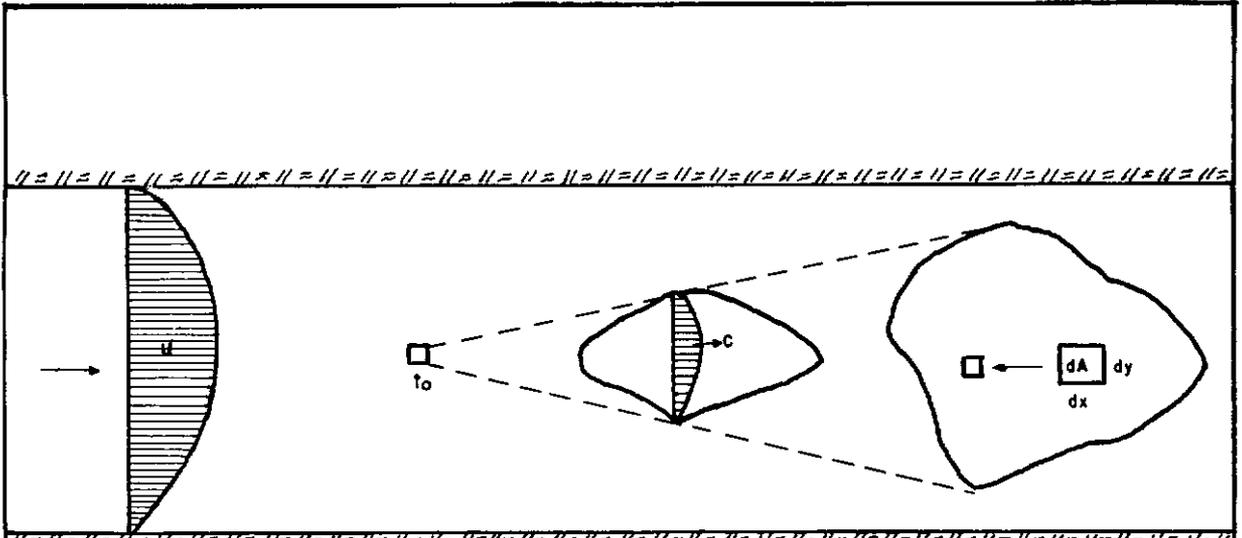


FIG. (II.1) - PONTO DE LANÇAMENTO DE UMA SUBSTÂNCIA SOLÚVEL E DISPERSÃO DA MESMA.

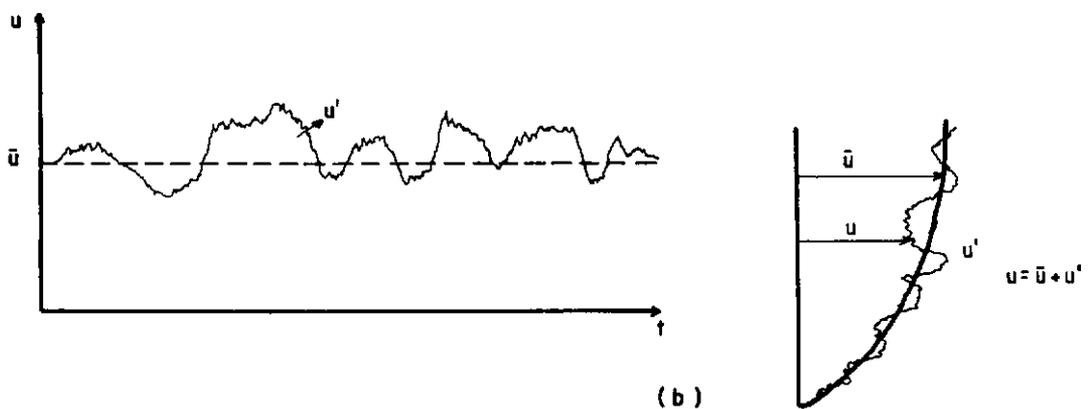
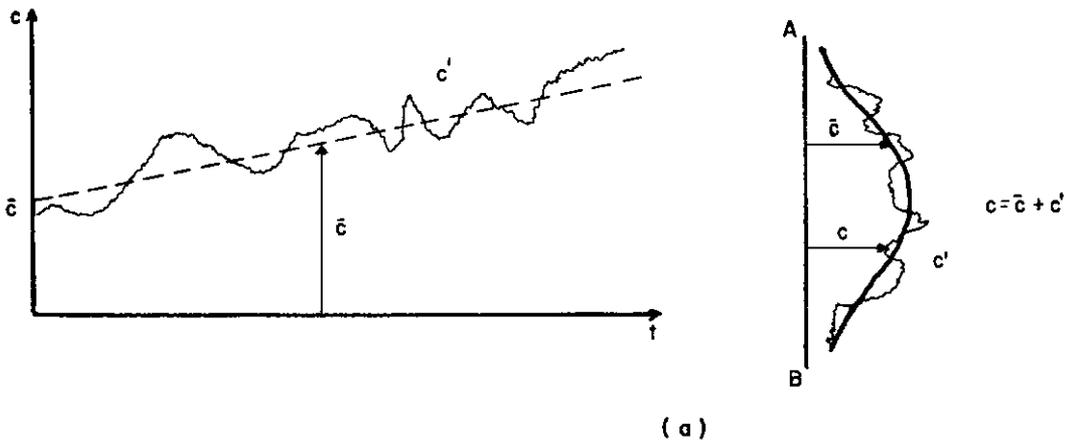


FIG. (II.2) - DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÕES E VELOCIDADES.

e integrando em relação ao tempo, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = k \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + k \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + k \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial (-\overline{u'c'})}{\partial x} \\ + \frac{\partial (-\overline{v'c'})}{\partial y} + \frac{\partial (-\overline{w'c'})}{\partial z} \end{aligned} \quad 2.03$$

onde os termos $\overline{u'c'}$, $\overline{v'c'}$ e $\overline{w'c'}$ representam as convecções líquidas devidas as flutuações turbulentas e podem ser expressas em função do gradiente da concentração média.

De acordo com a lei de Fick para a difusão, onde o transporte associado as flutuações turbulentas é proporcional ao gradiente de \bar{c} , tem-se:

$$\overline{u'c'} = -E_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad \overline{v'c'} = -E_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad \overline{w'c'} = -E_w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad 2.04$$

onde:

E_x, E_y, E_z - coeficientes de difusão turbulenta.

Fazendo as substituições, a equação (2.03) torna-se :

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = (k+E_x) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + (k+E_y) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + (k+E_w) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \quad 2.05$$

Substituindo a soma dos coeficientes de difusão molecular, k , e de difusão turbulenta, E_i , por um único coeficiente, D_i , denominado coeficiente de

misturamento ou coeficiente de dispersão, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \quad 2.06$$

Considerando somente a direção de fluxo longitudinal, escoamento permanente e fazendo $D_x = D_l$,

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = D_l \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} \quad 2.07$$

onde:

D_l - coeficiente de dispersão longitudinal.

Esta equação (2.07), representando a dispersão longitudinal, é válida para o período no qual as hipóteses feitas em sua dedução são verdadeiras. Em escoamento natural isto acontece somente depois do misturamento lateral ser completado, após o qual se inicia um período em que a variação da concentração média na seção transversal é muito pequena, ou seja $c' \ll \bar{c}$. Este período foi chamado "período difusivo" por FISCHER (3). O período inicial, imediatamente após a injeção, onde a convecção é o mecanismo responsável pela distorção na forma da nuvem, foi denominado "período convectivo".

Para o caso de rios e canais, a distância percorrida pelo poluente solúvel ou pelo traçador durante o período convectivo, também chamada de "Distância de Bom Misturamento",

(DBM), pode ser estimada através de várias fórmulas empíricas, que estão apresentadas no Capítulo III - Seção 4.2.1. A Figura (II.3) ilustra o misturamento do poluente mostrando os períodos convectivo e difusivo.

Se a substância solúvel conservativa é introduzida instantaneamente, numa tubulação reta e lisa, com escoamento permanente uniforme, em $x = 0$ e $t = 0$, com fluxo turbulento plenamente desenvolvido, uma solução da equação (2.07) é dada por:

$$c(x,t) = \frac{M}{A(4 \pi D_l t)^{1/2}} \exp. - \left[\frac{x^2}{4 D_l t} \right] \quad 2.08$$

onde:

M - massa do material,

A - área da seção transversal.

Para simplificação será usado somente c em vez de $c(x,t)$.

De acordo com esta solução, a distribuição do material com a distância, em qualquer tempo, é representada por uma curva normal ou gaussiana.

As condições iniciais e de contorno, que satisfazem a equação (2.08), são as seguintes:

$$\begin{aligned} c(x,0) &= 0 && \text{para } x > 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} A(x)c(x,t)dx &= M && \text{para todo } t \\ c(\infty,t) &= 0 && \text{para } t > 0 \\ \frac{\partial c}{\partial x} &\rightarrow 0 && \text{para } t \rightarrow \infty \end{aligned}$$

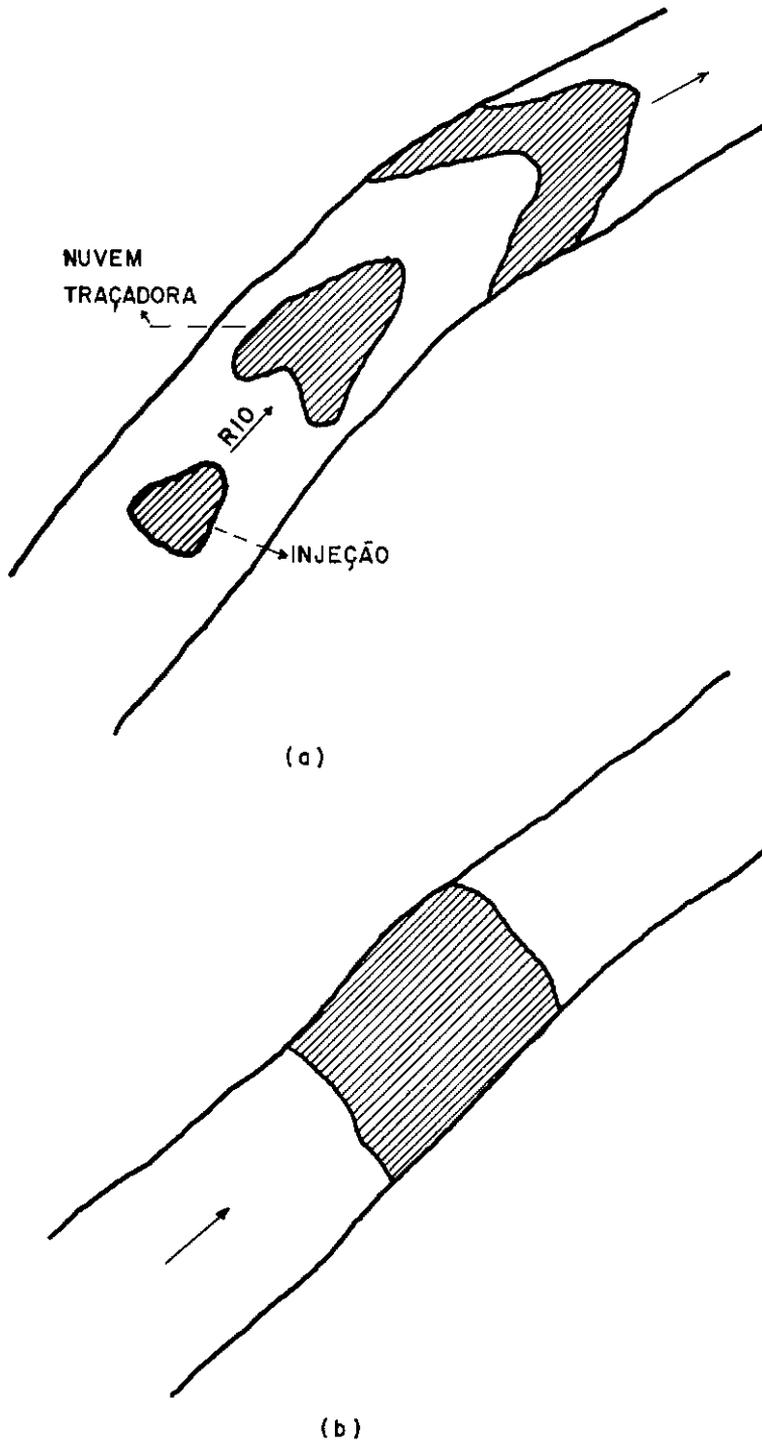


FIG. (11.3) - MISTURAMENTO DO POLUENTE

(a) - PERÍODO CONVECTIVO

(b) - PERÍODO DIFUSIVO

No caso do fluido não estar em repouso, mas se movendo com uma determinada velocidade, a equação (2.08) se transforma:

$$c = \frac{M}{A(4 \pi D_l t)^{1/2}} \exp. - \left[\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4 D_l t} \right] \quad 2.09$$

A equação (2.09), conhecida como Fórmula de Taylor (4), é importante pois permite prever a concentração de um poluente lançado acidental ou intencionalmente, em qualquer instante em uma seção transversal a jusante do ponto de lançamento.

Os parâmetros desta equação, tais como a M, A, x, e o tempo após a injeção, são conhecidos e de fácil determinação. A velocidade média também pode ser obtida com relativa facilidade; aproximadamente, com a utilização de molinetes, ou mais precisamente com a utilização da técnica de traçadores, aplicada em trabalhos de campo.

O maior problema para o uso desta equação está na determinação do valor de D_l . A sua determinação pode ser feita de modo bastante imprecisa, através de fórmulas empíricas baseadas em dados hidráulicos do escoamento, ou mais corretamente através do emprego de traçadores.

É importante ressaltar, porém, que a equação (2.09) foi desenvolvida para o uso em tubulações, mas que devido à sua simplicidade e compacidade seu uso foi estendido para o caso de rios e canais (considerando que o transporte e a dispersão só ocorrem na direção longitudinal), por diversos autores, com relativo sucesso.

II.2 - ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO POR EQUAÇÕES EMPIRICAS

II.2.1 - Introdução

Vários autores têm propostos modelos para reproduzir as variações na concentração de materiais conservativos e estimativas de Dl , a partir das características hidráulicas do rio.

Estas equações propostas foram obtidas para determinadas condições de fluxo e seções características e, ainda, levam em consideração os principais fatores hidráulicos (de fácil obtenção) influentes no valor de Dl : forma da seção transversal, velocidade e profundidade médias.

Algumas destas equações, usadas neste trabalho, são apresentadas a seguir e podem ser vistas, de forma reduzida, na Tabela II.1.

II.2.2 - Fórmula de TAYLOR

Para as suas análises, TAYLOR (4) se baseou em dois resultados experimentais:

a) o perfil de velocidade na seção transversal dado por:

$$\frac{u_0 - \bar{u}}{u^*} = f(z^*) \quad 2.10$$

onde:

u_0 - velocidade no centro da tubulação,

- u^* - velocidade de fricção,
 $u^* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$
 τ_0 - tensão de cisalhamento na parede da tubulação,
 ρ - densidade do fluido,
 z^* = r/a (raio reduzido),
 r - coordenada transversal em relação ao centro da tubulação,
 a - raio da tubulação,
 $f(z^*)$ - uma função medida experimentalmente por vários autores.

b) analogia de Reynolds: a transferência de momento é análoga à transferência de massa:

$$E' = \frac{\tau}{\rho \frac{\partial u}{\partial r}} = \frac{M}{\frac{\partial c}{\partial r}} \quad 2.11$$

onde:

- E' - coeficiente de transferência de massa,
 τ - tensão de cisalhamento num ponto r ,
 M - taxa de transporte de massa do traçador na direção radial.

Usando as relações acima e um sistema de referência em coordenadas cilíndricas que se move com velocidade igual à velocidade média do fluido, com a hipótese de que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração, TAYLOR (4) determinou, para tubulações, o valor do coeficiente Dl como sendo:

$$Dl = 10,1 a u^*$$

2.12

TAYLOR (4) calculou separadamente o efeito da difusão turbulenta na direção longitudinal, que já está incluído no cálculo do valor de Dl e que seu valor é pequeno quando comparado à dispersão; sua contribuição é de 0.5% do valor de Dl .

Convém ressaltar que a equação (2.12) não foi empregada diretamente neste trabalho porque a sua aplicação é restrita a tubulações.

II.2.3 - Fórmula de PARKER

PARKER (5) transformando as unidades métricas da fórmula de TAYLOR (4) para o sistema de unidades americano, para tubulações, obteve:

$$Dl = 1,785 a \bar{u} (f^*)$$

2.13

onde:

f^* - coeficiente de rugosidade de Weisbach-Darcy.

Para canais abertos:

$$Dl = 14,28 u^* R^{1/2}$$

2.14

onde:

R - raio hidráulico da seção.

II.2.4 - Fórmula de GLOVER

GLOVER (6) adaptando a fórmula de TAYLOR (4) para escoamentos naturais, chegou à seguinte relação:

$$Dl = 500 R u^* \quad 2.15$$

Algumas relações podem facilitar o uso das expressões (2.14) e (2.15), observando-se, que a velocidade de fricção pode ser expressa da seguinte forma:

$$u^* = \left(\frac{\tau_o g}{\omega} \right)^{1/2} \quad 2.16$$

onde:

ω - peso específico,

g - aceleração da gravidade,

e, τ_o , também pode ser obtido através de:

$$\tau_o = \omega R S \quad 2.17$$

onde:

S - declividade.

Por substituição,

$$u^* = (g R S)^{1/2} \quad 2.18$$

Introduzindo a aceleração da gravidade na equação de Chézy,

$$\bar{u} = \frac{c^*}{(g)^{1/2}} (g R S)^{1/2} \quad 2.19$$

onde:

c^* - coeficiente de Chézy.

Pode-se expressar a equação (2.15) como:

$$Dl = 500 \bar{u} \frac{(g)^{1/2}}{c^*} \quad 2.20$$

II.2.5 - Fórmula de ELDER

ELDER (7) partiu da análise Euleriana da equação de difusão e calculou o valor de Dl a partir da distribuição logarítmica da velocidade, estendendo o modelo de Taylor para o caso bidimensional em canais abertos.

Baseando-se, também, na analogia de Reynolds (apresentada em Taylor), considerando que a velocidade só varia na direção vertical, que o escoamento é permanente e uniforme e a injeção é instantânea, ELDER (7) obteve o seguinte valor para o cálculo de Dl :

$$Dl = 5,93 h u^* \quad 2.21$$

onde, h é a profundidade do escoamento. Para o coeficiente de dispersão lateral, Dz , obteve:

$$Dz = 0,23 h u^* \quad 2.22$$

II.2.6 - Fórmula de YOTSUKURA

YOTSUKURA (8) aplicando a distribuição empírica de TAYLOR (4) para canais abertos e assumindo as mesmas simplificações de ELDER (7), chegou à seguinte expressão:

$$Dl = 11,7 h u^* \quad 2.23$$

YOTSUKURA (8) observou que numa comparação entre as equações (2.21) e (2.23) os valores das constantes variam dependendo de como se assume o perfil da velocidade e do valor de k'' , constante de von Kármán, que neste caso está entre 0,36 e 0,42.

II.2.7 - Fórmula de FISCHER

a) Alternativa 1:

Seguindo o mesmo procedimento de ELDER (7) mas levando em consideração a variação lateral da velocidade ao invés da

variação vertical, FISCHER (9) chegou à seguinte expressão para o cálculo de Dl , aplicado a escoamentos naturais:

$$Dl = -\frac{1}{A} \iint_A u' dA \int_0^z \frac{1}{Dz h(z)} dz \int_0^z \int_0^{y(z)} u' dy dz \quad 2.24$$

O cálculo do coeficiente de dispersão por meio desta expressão (2.24) é fácil, uma vez que se trata apenas de efetuar integrações sucessivas.

Para efeitos práticos, a equação (2.24) pode ser escrita na forma de somatório:

$$Dl = -\frac{1}{A} \sum_{k=2}^n q'_k \Delta z \left[\sum_{j=2}^k \frac{z}{Dz h} \left(\sum_{i=1}^{j-1} q'_i \Delta z \right) \right] \quad 2.25$$

sendo:

$$q'_i = \frac{1}{2} (h_i + h_{i+1}) (u_i + \bar{u}) \quad 2.26$$

onde:

u_i - velocidade média na fatia vertical de ordem i ,

h - profundidade na vertical de ordem i ,

Δz - largura da fatia vertical,

n - número de verticais.

É importante ressaltar que a equação de FISCHER (10) para escoamentos naturais, não pode ser aplicada até que

termine o período convectivo definido anteriormente; e que para o uso da expressão (2.24), Fischer usou o valor de Dz calculado por ELDER, equação (2.22), cuja expressão foi determinada experimentalmente em laboratórios.

Para medir o período convectivo definido anteriormente, FISCHER (10) usou o tempo de escala Lagrangeano:

$$T = 0,30 \frac{l'^2}{R u^*} \quad 2.27$$

onde:

l' - comprimento característico do canal tomado igual a distância do ponto onde a velocidade superficial é máxima até a margem mais distante,

T - tempo de escala Lagrangeana.

b) Alternativa 2:

Baseando-se neste tempo, Fischer encontrou uma fórmula simplificada para o cálculo do coeficiente de dispersão:

$$Dl = \bar{u}'^2 T \quad 2.28$$

Fazendo as substituições:

$$Dl = \bar{u}'^2 0,30 \frac{l'^2}{R u^*} \quad 2.29$$

II.2.8 - Fórmula de HENRY LIU

HENRY LIU (11) para facilidade em suas análises, adotou:

$$h = R h^{\circ} \quad z = w z^{\circ} \quad u = \bar{u} u^{\circ} \quad q = \bar{u} R q^{\circ} \quad 2.30$$

onde todas as quantidades com o superíndice zero denotam quantidades adimensionais, por exemplo, h° - profundidade adimensional.

Substituindo estas expressões na equação de Fischer (2.25) e usando o valor de Dz calculado por Elder, equação (2.22), LIU (11) obteve:

$$Dl = \frac{B \bar{u}^2 w^3}{u^* A} \quad 2.31$$

sendo:

$$B = -\frac{1}{0.23} \int_0^1 (h^{\circ} - q^{\circ}) \int_0^{z^{\circ}} (h^{\circ})^{-2} \int_0^{z^{\circ}} (h^{\circ} - q^{\circ}) dz^{\circ} dz^{\circ} dz^{\circ} \quad 2.32$$

Usando as relações:

$$\bar{u} = Q/A; \quad A/l = hm = R \quad (\text{para canais largos})$$

$$Dl = B \frac{Q^2}{u^* R} \quad 2.33$$

onde:

Q - vazão,

hm - profundidade média.

Uma vez que h° , q° e z° são quantidades adimensionais, isto significa que dependem somente da forma da seção transversal do canal e da forma da distribuição da velocidade ao longo do fluxo.

Deve ser observado, entretanto, que toda a análise de B baseada na equação de Fischer assume que o canal é prismático e relativamente reto. Na realidade quase todos os rios são sinuosos ou tortuosos e contêm zonas de estreitamento e alargamento de seção. Sabendo-se que, em geral, estes fatores não alteram somente o coeficiente de dispersão mas também aumentam a resistência ao fluxo, pode-se esperar uma correlação entre o termo adimensional, B , e o fator de resistência, f^* , da equação de Weisbach-Darcy.

Por razões práticas, em vez de se usar o parâmetro, f^* , pode-se usar u^*/U que nada mais é do que $(f^*/8)^{1/2}$.

Deste modo, Liu obteve o seguinte valor de B :

$$B = 0,18 \left(\frac{u^*}{u} \right)^{1/5} \quad 2.34$$

II.2.9 - Fórmula de McQUIVER e KEEFER

O procedimento usado por McQUIVER e KEEFER (12) para

estimar o coeficiente de dispersão é derivado da analogia entre a equação de dispersão unidimensional (2.07) e a equação de escoamento unidimensional (2.35):

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u'' \frac{\partial q}{\partial x} = Dq \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad 2.35$$

onde:

q - vazão por unidade de largura,

u'' - velocidade de advecção ou celeridade,

Dq - coeficiente de atenuação.

McQUIVER E KEEFER (12) observaram que as equações (2.07) e (2.35) são traduzidos analiticamente pela mesma equação diferencial com parâmetros similares, e que uma pode ser usada como análoga à outra. Uma relação entre Dl e Dq e \bar{u} e u'' foi examinada para determinar sob que condições esta analogia é possível e, McQuiver e Keefer obtiveram:

$$Dl = 0,66 \frac{\bar{u}}{u''} Dq \quad 2.36$$

sendo:

$$Dq = \frac{Q}{2 S l} \left(1 - \frac{F}{4} \right)^2 \quad 2.37$$

onde:

l - largura da seção,

F - número de Froude.

O segundo termo da equação (2.37), $-QF / 8Sl$ foi negligenciado por ser relativamente pequeno para $F < 0,5$.

E para u'' , obteve-se:

$$u'' = 1,79 \bar{u} \quad 2.38$$

Logo:

$$Dl = 0,058 \frac{Q}{S l} \quad \text{para } F < 0,5. \quad 2.39$$

II.2.10 - Fórmulas de KRENKEL e THACKSTON

Alguns autores, baseando-se no princípio de similaridade de Kolmogoroff, que para o caso de Dl , pode ser expresso como:

$$Dl = \text{cte. } h^{4/3} E^{1/3} \quad 2.40$$

determinaram outras relações para o cálculo de Dl .

O princípio de Kolmogoroff estabelece uma relação entre o coeficiente de mistramento, a dissipação de energia e a turbulência. A teoria demonstra que num domínio espacial e temporal de um sistema turbulento isotrópico, a turbulência depende da taxa de dissipação de

energia.

KRENKEL (13) baseando-se neste princípio, mostrou que o coeficiente de dispersão em canal aberto pode ser descrito como:

$$Dl = 6,4 h^{1,24} E^{*0,30} \quad 2.41$$

onde:

E^* - taxa média de dissipação de energia por unidade de massa do fluido, que para canal aberto é representada por:

$$E^* = S \bar{u} g \quad 2.42$$

THACKSTON (14) observou uma relação entre as equações (2.21) , (2.23) e a equação (2.40), onde mostra que as equações (2.21) e (2.23) podem ser escritas da seguinte forma:

$$Dl = cte. h^{4/3} h^{-1/3} u^* \quad 2.43$$

Observa-se que a equação (2.42) é similar à equação:

$$u^* = (h S g)^{1/2} \quad 2.44$$

logo:

$$u^{*2} = h S g = \frac{E^* h}{\bar{u}} \quad 2.45$$

$$E^* = \frac{\bar{u} u^{*2}}{h} \quad 2.46$$

Substituindo a equação (2.46) na (2.43), vem:

$$Dl = \text{cte. } h^{4/3} E^{*1/3} \left(\frac{\bar{u} u^{*2}}{h} \right)^{-1/3} h^{-1/3} u^* \quad 2.47$$

THACKSTON, recombinao os termos e encontrando o valor da constante igual a 11,9, obteve:

$$Dl = 11,9 h^{4/3} E^{*1/3} \left(\frac{\bar{u}}{u^*} \right)^{-1/3} \quad 2.48$$

As equações (2.41) e (2.48) podem ser expressas em termos da velocidade de fricção tornando-se, respectivamente:

$$Dl = 7,25 h u^* \left(\frac{\bar{u}}{u^*} \right)^{1/4} \quad (\text{THACKSTON}) \quad 2.49$$

$$Dl = 5,82 h u^* \left(\frac{\bar{u}}{u^*} \right)^{1/4} \quad (\text{KRENKEL}) \quad 2.50$$

AUTOR	EQUAÇÕES
TAYLOR Tubulação	$Dl = 10,1 a u^*$
PARKER Fluxo em canal aberto	$Dl = 14,28 u^* R^{1/2}$
GLOVER Escoamentos naturais	$Dl = 500 u^* R$
ELDER Fluxo em canal aberto	$Dl = 5,93 h u^*$
YOTSUKURA e FIERING Fluxo em canal aberto	$Dl = 11,7 h u^*$
FISCHER (1) Escoamentos naturais	$Dl = - \frac{1}{A} \iint_A u' dA \int_0^z \frac{1}{Dz h(z)} dz \int_0^z \int_0^{y/2} u' dy dz$
FISCHER (2) Escoamentos naturais	$Dl = \bar{u}^2 0,30 \frac{1'}{R u^*}$
LIU Fluxo em canal aberto	$Dl = B \frac{Q^2}{u^* R}$
McQUIVER e KEEFER Fluxo em canal aberto	$Dl = 0,058 \frac{Q}{S l}$
KRENKEL (1) Fluxo em canal aberto	$Dl = 5,82 h u^* \left[\frac{\bar{u}}{u^*} \right]^{1/4}$
KRENKEL (2) Fluxo em canal aberto	$Dl = 6,4 h^{1,24} E^{*0,30}$
THACKSTON (1) Escoamentos naturais	$Dl = 11,9 h^{4/3} E^{*1/3} \left[\frac{\bar{u}}{u^*} \right]^{-1/3}$
THACKSTON (2) Escoamentos naturais	$Dl = 7,25 h u^* \left[\frac{\bar{u}}{u^*} \right]^{1/4}$

TABELA (II.1) - Fórmulas empíricas para estimar o valor do coeficiente de dispersão.

II.3 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO POR MÉTODOS EXPERIMENTAIS

II.3.1 - Introdução

A determinação do coeficiente de dispersão por métodos experimentais pode ser feita com a utilização da técnica de traçadores. Neste caso, os traçadores, que simulam a substância solúvel (no caso o poluente), são lançados instantaneamente num determinado ponto da seção transversal do escoamento, movendo-se para jusante acompanhando o fluxo, inicialmente como uma massa concentrada e, após algum tempo, dispersando-se e sofrendo um aumento de tamanho e um decréscimo na sua concentração. Em dois ou mais postos a jusante deste lançamento são coletadas amostras em intervalos de tempo pré-determinados. Em cada um destes postos de coleta são obtidas curvas de concentração versus tempo.

Baseando-se nestas curvas, alguns autores propuseram métodos diferentes de determinação de D_1 , apresentados a seguir e que podem ser vistos de forma resumida na Tabela II.2.

II.3.2 - Método de TAYLOR

Partindo da equação (2.09), com experimentos realizados em tubulação com regime permanente, TAYLOR (4) determina o coeficiente de dispersão de maneira simplificada:

$$D_1 = \frac{\bar{u}^3 t_{1/2}^2}{4 \times \ln 2} \quad 2.51$$

onde:

$2t_{1/2}$ - intervalo de tempo durante o qual a concentração é maior do que a metade da concentração máxima,

x - distância do ponto de injeção do traçador ao ponto de observação.

II.3.3 - Método de LEVENSPIEL e SMITH

LEVENSPIEL e SMITH (15) realizaram experimentos em tubulação e chegaram a uma análise adimensional para o cálculo de Dl . Observaram que, se a vazão e o grau de misturamento independem da posição radial, a nuvem do traçador irá se mover com uma velocidade média igual a:

$$\bar{u} = \frac{Q x}{V} \quad 2.52$$

onde:

V - volume da tubulação entre as secões.

A sua localização num tempo t , será:

$$x = \bar{u} t \quad 2.53$$

Substituindo as equações (2.52) e (2.53) na (2.09), ela se torna:

$$\frac{c}{M} \frac{V}{M} = \frac{1}{\left(4\pi \frac{Q t}{V} \frac{Dl}{\bar{u} x}\right)^{1/2}} \exp. - \left[\frac{\left(\frac{1 - Q t}{V}\right)^2}{4 \frac{Q t}{V} \frac{Dl}{\bar{u} x}} \right] \quad 2.54$$

Considerando que a curva se aproxima a uma curva normal para valores muito pequenos de $Dl/\bar{u}x$, Levenspiel e Smith obtiveram o seguinte valor para o cálculo de Dl :

$$Dl = \frac{\bar{u} x}{8} ((8 \sigma^2 + 1)^{1/2} - 1) \quad 2.55$$

onde, σ^2 é a variância reduzida da curva de concentração.

Para o cálculo de σ^2 pode-se fazer:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma^2 t}{\left(\frac{V}{Q}\right)^2} \quad \sigma^2 = \frac{\sigma^2 t}{\bar{t}} \quad 2.56$$

onde:

$\bar{t} = x/\bar{u}$ - tempo associado ao centro de gravidade da curva
ou tempo médio de passagem da nuvem,

$\sigma^2 t$ - variância em relação a t .

Para o cálculo de $\sigma^2 t$, Levenspiel e Smith usaram a equação de Wilks modificada, ou seja:

$$\sigma^2 t = \frac{\sum t^2 c}{\sum c} - \left(\frac{\sum t c}{\sum c} \right)^2 \quad 2.57$$

considerando, neste caso, que o intervalo de tempo é constante.

II.3.4 - Método de FISCHER

FISCHER (10) supondo que a distribuição completa da concentração é observada por um observador móvel, transformou a equação (2.7) na seguinte:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D1 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad 2.58$$

Multiplicando ambos os lados por x^2 e integrando de $x = -\infty$ a $x = \infty$, obtém-se:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{\partial c}{\partial t} dx = D1 \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{\partial c}{\partial x} dx \quad 2.59$$

O lado esquerdo da equação (2.59) para integração e diferenciação pode ser modificado de maneira que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{\partial c}{\partial x} dx = \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 c dx \quad 2.60$$

Integrando, por partes, duas vezes sucessivamente o lado direito da equação (2.60), obtém-se:

$$D1 \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x} dx = 2D1 \int_{-\infty}^{\infty} c dx = 2D1M \quad 2.61$$

Esta integração depende de duas suposições com relação a distribuição de c com x tendendo a $\pm \infty$:

- (i) - que c tende a zero mais rápido do que x^{-1} , e
- (ii) - que $\partial c / \partial t$ tende a zero mais rápido do que x^{-2} .

Estas transformações resultam em:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 c \, dx = 2D1M \quad 2.62$$

Como o traçador é conservativo, M é constante:

$$D1 = \frac{1}{2M} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 c \, dx = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 c \, dx}{\int_{-\infty}^{\infty} c \, dx} \quad 2.63$$

Tem-se que:

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 c \, dx}{\int_{-\infty}^{\infty} c \, dx} = \sigma_x^2 \quad 2.64$$

ou seja, σ_x^2 , é a variância com relação a x ou o segundo momento da curva de distribuição, de forma que:

$$D1 = \frac{1}{2} \frac{d(\sigma_x^2)}{dx} \quad 2.65$$

Esta fórmula é também conhecida como sendo a definição matemática ampla de $D1$.

Como Dl também é constante, pode ser calculado pela medida de $\sigma^2 x$ de duas distribuições de concentração em dois locais diferentes:

$$Dl = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\sigma^2 x)}{\Delta x} \quad 2.66$$

Como tal procedimento na prática normalmente é muito difícil, faz-se a medida de concentração como uma função do tempo com dois postos de medição fixados quando da passagem da nuvem do traçador. Deste modo, obtém-se:

$$\sigma^2 x = \bar{u} \sigma^2 t \quad 2.67$$

e,

$$\Delta(\sigma^2 x) = \bar{u} (\sigma^2 t_2 - \sigma^2 t_1) \quad 2.68$$

onde, $\sigma^2 t_1$ e $\sigma^2 t_2$ são as variâncias das distribuições temporais nos postos 1 e 2. O incremento de tempo, Δt , da equação (2.65) pode ser calculado como $\bar{t}_1 - \bar{t}_2$, onde, \bar{t}_1 e \bar{t}_2 são os tempos médios de passagem da nuvem nas duas seções, logo:

$$Dl = \frac{1}{2} \bar{u} \frac{\sigma^2 t_1 - \sigma^2 t_2}{\bar{t}_1 - \bar{t}_2} \quad 2.69$$

II.3.5 - Método de PARKER

PARKER (5) alguns anos antes, relacionou o valor de Dl com apenas uma curva de distribuição, ou seja, considerou cada seção separadamente, obtendo:

$$Dl = \frac{\bar{u} \sigma^2 t}{2 \bar{t}} \quad 2.70$$

II.3.6 - Método de KRENKEL

KRENKEL (13) mostrou que quando a curva de concentração versus tempo atinge o seu valor máximo, o valor de $(x - \bar{u}t)$ na equação (2.09) deve ser zero. Então, para quaisquer dois pontos a jusante do ponto de injeção, as concentrações de pico destes dois pontos podem ser comparadas:

$$C_{max_1} = \frac{M}{A (4 \Pi Dl t_{max1})^{1/2}} \quad 2.71$$

$$C_{max_2} = \frac{M}{A (4 \Pi Dl t_{max2})^{1/2}} \quad 2.72$$

Elevando ao quadrado e subtraindo uma expressão da outra:

$$(C_{max_1}^2 - C_{max_2}^2) = \frac{M^2}{A^2 4 \Pi Dl t_{max_1}} - \frac{M^2}{A^2 4 \Pi Dl t_{max_2}} \quad 2.73$$

$$Dl = \frac{M^2}{4 \pi A^2 (C_{\max_1}^2 - C_{\max_2}^2)} \cdot \frac{t_{\max_2} - t_{\max_1}}{t_{\max_2} \cdot t_{\max_1}} \quad 2.74$$

II.3.7 - Ajustes das Curvas Experimentais

Neste trabalho, todos os procedimentos seguidos para se determinar experimentalmente os valores de Dl e \bar{u} , a partir de dados observados de concentração versus tempo, são baseados no fato de que a equação (2.07) representa exatamente o processo de misturamento, cuja solução, equação (2.09), descreve a curva de concentração versus tempo.

Entretanto, como pode ser visto em THACKSTON et alii (17) a equação (2.07) não descreve exatamente o processo de misturamento, sendo, apenas uma aproximação, logo a sua solução particular, equação (2.09), é também apenas uma aproximação da curva de concentração versus tempo.

O mais sério desvio do modelo teórico com relação aos dados experimentais, é que a maioria das curvas com dados medidos experimentalmente em escoamentos naturais apresentam uma "cauda" maior do que a prevista pelo modelo. Esta "cauda" tende a fazer com que os momentos das curvas sejam maiores do que o previsto. Devido ao fato da "cauda" ser maior do que a região próxima ao pico, ela terá maior peso, uma vez que os métodos de estimativas de Dl são baseados nos momentos das curvas, e o erro será considerável.

O objetivo dos ajustes de modelos teóricos às curvas experimentais é tentar minimizar a influência da "cauda", uma vez que o modelo não segue as características das curvas

experimentais reais.

Este método determina os parâmetros, Dl e \bar{u} , minimizando a função θ , definida como sendo uma medida dos desvios entre os resultados previstos pelo modelo e os resultados observados no sistema. Neste trabalho, como na maioria dos casos, os desvios são devidos tanto ao fato do modelo proposto não descrever rigorosamente o sistema, como pelos erros ocorridos nas medições experimentais. Analiticamente, uma maneira de se minimizar θ é utilizando o método dos mínimos quadrados para os desvios entre os valores observados, Y_o e os valores previstos, Y_p :

$$\theta (Dl, \bar{u}) = \sum_{t=t_a}^{t_b} [Y_o(t) - Y_p(t)]^2 \quad 2.75$$

onde t é usado para indicar a variável independente, t_a e t_b referem-se aos tempos que limitam a região da curva onde os valores dos desvios serão minimizados e Y_p é definido segundo a equação (2.09).

AUTOR	MÉTODO
TAYLOR (2) Tubulação	$Dl = \frac{\bar{u}^3 t_1^2}{4 \times \ln 2}$
LEVENSPIEL e SMITH Tubulação	$Dl = \frac{\bar{u}}{8} \times ((8\sigma^2 + 1)^{1/2} - 1)$
FISCHER (3) Escoamentos naturais	$Dl = \frac{1}{2} \bar{u}^2 \frac{\sigma^2 t_1}{\bar{t}} - \frac{\sigma^2 t_1}{\bar{t}}$
PARKER (2) Fluxo em canal aberto	$Dl = \frac{\bar{u}^2 \sigma^2 t}{2 \bar{t}}$
KRENKEL (3) Fluxo em canal aberto	$Dl = \frac{M^2}{4 \pi A^2 (C_{\max_1^2} - C_{\max_2^2})} \cdot \frac{t_{\max_2} - t_{\max_1}}{t_{\max_2} \cdot t_{\max_1}}$

TABELA (II.2) - Métodos experimentais para a determinação do coeficiente de dispersão.

CAPITULO III

METODOLOGIA APLICADA

III.1 - DESCRIÇÃO DOS TRAÇADORES

De maneira geral, considera-se traçador qualquer substância incorporada à massa de outra substância que permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico, químico ou biológico.

Quando o traçador é usado como simulador de um poluente solúvel e conservativo, como é o caso deste trabalho, ele deve se comportar exatamente como o material que se quer estudar, sem interagir com o meio, nem modificar suas características durante o experimento, devendo ser facilmente detectável, mesmo em baixas concentrações.

A seleção do traçador é o ponto de maior importância para qualquer tipo de trabalho. No caso específico de aplicações em Hidrologia, o que se espera de um traçador é que ele se comporte exatamente como a água, deslocando-se junto com ela, sem alterar nem modificar as condições do escoamento ou a natureza do fluido em estudo.

Neste caso, os traçadores que mais se adaptam são os fluorescentes e os radioativos, observando-se que as decisões devam ser tomadas de acordo com o objetivo a ser alcançado. Algumas características básicas, apresentadas a seguir, devem ser consideradas.

III.1.1 - Traçadores radioativos

Como pode ser visto em PLATA (17), na escolha dos radioisótopos os fatores principais a serem observados são a meia-vida, o tipo e a energia da radiação e o comportamento físico, químico ou biológico do radioisótopo.

O traçador radioativo deve ter meia-vida compatível com o tempo de duração do experimento de modo que ao seu final existam ainda quantidades mínimas do radioisótopo no sistema.

O tipo e a energia da radiação emitida pelo traçador radioativo são de grande importância uma vez que devem ser compatíveis com os detectores a serem empregados no experimento. Os radioisótopos emissores de radiação tipo gama, são os mais usados na aplicação em hidrologia de superfície. No caso de estudos de diluição e dispersão o comportamento do traçador deve ser tal que suas moléculas escoem e se dispersem como o fluido.

Não são admitidas reações químicas entre o traçador e o meio que resultem em perda de material e erros nas medidas.

A grande vantagem dos traçadores radioativos é que a única variação de suas características com o tempo deve-se ao seu decaimento radioativo, que é constante e bem conhecido, permitindo fácil correção dos dados experimentais, bem como a possibilidade da sua medição "in situ".

Deve ser observado ainda, que como os traçadores fluorescentes, os traçadores radioativos possuem a vantagem de terem alta sensibilidade nas medições experimentais, permitindo boas medidas mesmo com pequenas quantidades de material

injetado.

A sua desvantagem está ligada principalmente a problemas logísticos, na necessidade de autorização oficial para a sua aquisição e manipulação, no custo da aparelhagem usada na sua detecção, na necessidade de pessoal habilitado para o seu manuseio, na dificuldade de coleta de amostras para análise posterior em laboratório devido ao seu decaimento, bem como toda a segurança envolvida num trabalho de campo desta natureza.

III.1.2 - Traçadores fluorescentes

A grande vantagem dos traçadores fluorescentes é serem de fácil obtenção, baixo custo e não necessitarem de pessoal altamente qualificado para o seu manuseio. Deve-se observar, ainda, que eles não são prejudiciais aos organismos e bastantes solúveis em água. Como são pequenos os volumes das amostras não acarretam problemas no transporte ou na estocagem, o que já não acontece com o traçador radioativo.

A desvantagem para o seu uso está ligada ao fato de que a intensidade de fluorescência é afetada pelos fatores físicos e químicos, como pode ser visto em WILSON (18), tais como: temperatura, pH, decaimento fotoquímico e a absorção e/ou adsorção.

A temperatura da amostra é o fator mais importante que afeta a fluorescência de soluções diluídas. 'A medida que a temperatura diminui, a atividade fluorescente aumenta. Sendo um fator reversível, a sua leitura, nas amostras, deve ser sempre observada, visando uma correção nos resultados.

O pH da amostra pode afetar a intensidade da fluorescência mas de uma maneira geral, na faixa em que o pH é normalmente encontrado em escoamentos naturais, este fator não é de grande importância. Cuidados maiores devem ser observados quando se trabalha em meios extremamente ácidos, com $\text{pH} < 4$, neste caso, há diminuição de fluorescência.

O decaimento fotoquímico ou fotodecomposição pode causar uma redução permanente na fluorescência. Este fotodecaimento ocorre devido ao fato das substâncias fluorescentes serem sensíveis à luz, que pode causar a destruição da substância. Nos trabalhos de campo, a luz solar exerce tal efeito sobre este tipo de traçador. A minimização deste efeito pode ser conseguida, selecionando-se o traçador adequado e definindo a época e os horários ideais para o experimento; ou pelas próprias características do local, tais como: profundidade do escoamento, turbidez ou céu nublado.

A absorção ou a adsorção se manifestam através da tendência que o traçador possui de se aderir ou se incorporar aos sólidos em suspensão ou ao leito do rio. Apesar destes fatores não afetarem diretamente na fluorescência do traçador, os resultados finais podem estar afetados por erros importantes, de difícil correção.

III.2 - ESCOLHA DOS TRAÇADORES

O radioisótopo escolhido para os experimentos descritos neste trabalho foi o Bromo-82, que tem sido bastante usado em medidas de vazão e estudos de determinação do coeficiente de dispersão. Este radioisótopo tem uma meia

vida de 36 horas (adequada para os experimentos cuja duração prevista era de aproximadamente 30 horas).

No caso de traçadores fluorescentes selecionou-se a Amidorodamina G-EXTRA (COLOR INDEX 45220, λ exc. max. 535 nm, λ fluo. max. 550 nm), por ser bastante estável e de excelente detectabilidade. Seu inconveniente maior é devido à necessidade de importação. O outro traçador fluorescente escolhido foi a Fluoresceína Sódica ou Uranina (COLOR INDEX 45350, λ exc. max. 492 nm, λ fluo. max. 515 nm) disponível no mercado nacional. Deve ser observado, entretanto, que a sua sensibilidade ao fotodecaimento é bem conhecida, não sendo em princípio, adequado para estudos em que a conservação de massa é fundamental, como por exemplo o caso de medições de vazões líquidas.

A Uranina foi escolhida tendo por objetivo averiguar até que ponto o fotodecaimento é importante quando o corpo d'água traçado se apresenta muito poluído e com alta carga de sólidos em suspensão e se eventuais perdas são aceitáveis em estudos de determinação de D1.

III.3 - MEDIÇÃO DOS TRAÇADORES

III.3.1 - Medição do traçador radioativo

O traçador radioativo é normalmente medido diretamente no campo. Sua detecção é feita utilizando-se sondas de cintilação submersas no escoamento. Estas sondas são constituídas basicamente de duas partes: um cristal de cintilação e uma válvula fotomultiplicadora. O cristal de cintilação é de Iodeto de Sódio ativado por Tálcio é capaz de

emitir fótons quando interceptados por radiação gama. Através da válvula fotomultiplicadora esses fótons são transformados em pequenos pulsos elétricos que podem ser medidos. A amplitude destes pulsos elétricos é proporcional à energia da radiação incidente e sua frequência relacionada com a das radiações detectadas. As sondas são acopladas a cintilômetros, que são aparelhos capazes de determinar a frequência dos pulsos elétricos gerados pela sonda de cintilação, fornecendo leituras que representam a média de pulsos elétricos, por segundo, que chegam à sonda.

A transformação destas leituras, ou taxas de contagem, em concentração foi feita utilizando-se o "Método da Amostra Única" ou "Método de Gardner-Dunn III", (que daqui em diante será chamado, por facilidade, "Método de Gardner") apresentado neste capítulo, Seção III.5.2.

Para a utilização deste método, foi retirada uma amostra de 8000 ml, em cada ponto de coleta, próxima à passagem do pico da nuvem traçadora e levada para o laboratório a fim de ser usada na calibração.

III.3.2 - Medição dos traçadores fluorescentes

A medição dos traçadores fluorescentes pode ser feita diretamente no campo, com o uso de fluorímetros, ou através de coleta de amostras para posterior análise em laboratório.

As amostras coletadas para análises no laboratório foram feitas manualmente com um coletor de 120 ml, especialmente projetado e construído no Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ, para esta finalidade.

Imediatamente após a coleta, as amostras devidamente

identificadas, foram transferidas para frascos de polietileno de aproximadamente 60 ml, armazenadas em engradados especialmente projetados para este fim e guardadas em sacos plásticos pretos evitando-se assim, a influência das radiações solares, causadoras de fotodecaimento, sendo posteriormente transportadas para o laboratório para serem analisadas.

Nestes postos foi instalado um fluorímetro, com o objetivo de se obter informações da concentração do traçador fluorescente, na passagem da nuvem traçadora pelo posto. Uma descrição detalhada do fluorímetro Turner, modelo 111, usado nos experimentos de campo, pode ser encontrada em AUGUSTO (19).

A frequência de amostragem foi intensificada durante a passagem do pico da nuvem traçadora por cada posto.

O método de "Varredura Síncrona" usado no laboratório para a análise de comparação dos picos dos traçadores e para a transformação das leituras de fluorescência em concentração pode ser visto na Seção III.5.1.

III.4 - PROCEDIMENTO DE CAMPO

III.4.1 - Critérios de seleção dos postos de amostragem

Os postos de amostragem foram localizados de modo a permitirem definir-se trechos os mais uniformes possíveis sob o ponto de vista das características hidráulicas do rio.

Na localização destes postos observou-se também a facilidade ao acesso de veículos, do grupo de trabalho, bem como a instalação dos equipamentos a serem utilizados no

experimento.

Os experimentos de campo visando a determinação do coeficiente de dispersão foram realizadas em condições mais desfavoráveis sob o ponto de vista da qualidade da água. Estas condições ocorrem no período de estiagem, quando as vazões e velocidades são baixas fazendo com que o tempo de trânsito do poluente seja maior e a capacidade de diluição do escoamento menor.

III.4.2 - Pré-dimensionamento

A necessidade de um pré-dimensionamento de experimentos está relacionada com a otimização de fatores que estão intimamente ligados com a precisão, a segurança e aos custos envolvidos.

O pré-dimensionamento é baseado nos parâmetros do escoamento, parâmetros estes, que devem ser estimados ou obtidos de experimentos anteriores realizadas no local ou em situações semelhantes.

O objetivo do pré-dimensionamento é estimar a Distância de Bom Misturamento (DBM), a quantidade de traçador (massa ou atividade) a ser utilizada, bem como prever a duração e frequência de amostragem, número de pessoas em cada posto de amostragem, número de postos ativos, e todo o desenvolvimento logístico dos experimentos.

III.4.2.1 - Cálculo da Distância de Bom Misturamento (DBM)

Algumas fórmulas empíricas foram apresentadas por diversos autores para a determinação da DBM, porém seus resultados fornecem apenas informações indicativas para o caso de aplicações em rios.

FISCHER (9) propôs a expressão:

$$L = \frac{1,8 l' \bar{u}'}{R u^*} \quad 3.01$$

onde:

L - DBM.

Para a sua aplicação em rios, além do problema da determinação do comprimento característico, l' , há uma outra aproximação contida na relação acima: em sua dedução é usado o coeficiente de misturamento lateral, Dz , cuja expressão foi determinada experimentalmente por ELDER (6) em laboratório. É de se esperar, portanto, que a relação acima, não seja uma aplicação direta para o caso de rios.

WARD (20) tratou analiticamente a DBM para canais e a relacionou com a geometria do canal:

$$L = \frac{k l^2}{0,02 h} \quad 3.02$$

onde:

k - 0,08 (injeção central),

k - 0,22 (10% fora do centro).

YOTSUKURA (21) para injeção pontual, apresentou:

$$L = 1,3 \frac{\bar{u} l^2}{h} \quad 3.03$$

RIMAR (24) propos:

$$L > 0,13 \frac{U l^2}{h} \quad 3.04$$

onde:

$$U = c^* (0,7c^* + 6)/g$$

sendo:

c^* - coeficiente de Chézy, $15 < c^* < 20$.

A aplicação destas fórmulas a rios não leva a resultados precisos uma vez que supõe valores constantes de profundidade e largura, características dificilmente encontradas.

III.4.2.2 - Massa e Atividade a Injetar

No caso de traçador fluorescente, não existem valores de CMP (Concentração Máxima Permissível na Água), uma vez que este traçador não oferecesse riscos à saúde humana ou ao meio ambiente e pode ser utilizado mesmo em altas concentrações. Neste caso a CPM é substituída pela Cdes., que é a concentração desejada, no ponto X_n , que está associada à concentração de pico (C_{pico}) no posto de amostragem mais afastado em relação ao ponto de injeção.

Com dados de vazão, largura e velocidades médias do rio, entra-se no normograma de KILPATRICK e WILSON (22), obtendo-se a quantidade de massa necessária de traçador para produzir uma concentração de pico igual a 1 ppb (partes por bilhão igual a 1 mg/m^3). Fixando a concentração desejada de acordo com a sensibilidade do sistema de medição e com a precisão requerida, obtém-se a massa do traçador.

No caso específico deste trabalho, uma vez estimada a massa do traçador, foram levantadas curvas de concentração versus tempo, para diferentes valores de Dl e U , usando a equação (2.09). Estas curvas serviram para se prever toda a variação temporal da nuvem: o tempo de chegada, tempo de subida e de descida de cada curva, e ainda, a obtenção aproximada da concentração máxima do traçador em cada posto de coleta. Os gráficos destas curvas, bem como os valores reais medidos experimentalmente, podem ser vistos no Capítulo IV - Seção IV.2.1.

No caso de traçador radioativo, usado somente a partir do terceiro experimento, o pré-dimensionamento visando determinar o valor da atividade a ser injetada, foi feito com base nos resultados obtidos no primeiro experimento com traçador fluorescente.

Definindo V^* como volume virtual de diluição igual a:

$$Vf^* = \frac{Mf}{Cf_{\max}}$$

3.05

pode-se estabelecer que:

$$V_f^* = V_r^* \quad 3.06$$

onde:

V_f^* - volume virtual de diluição para o traçador fluorescente,

V_r^* - volume virtual de diluição para o traçador radioativo.

A partir do primeiro experimento, era conhecida a massa injetada de traçador fluorescente, M_f , e a concentração máxima determinada no ponto de amostragem mais a jusante com relação ao ponto de injeção, (C_{fmax}).

A mesma relação da equação (3.06) pode ser estabelecida para o traçador radioativo, ou seja:

$$V_r^* = \frac{A_t}{C_{rmax}} \quad 3.07$$

onde:

A_t - atividade do traçador radioativo a ser injetada,

C_{rmax} - concentração máxima que se deseja alcançar no ponto de amostragem mais a jusante em relação ao ponto de injeção.

O valor de C_{rmax} pode ser obtido também a partir da relação:

$$C_{rmax} = \frac{R''}{F''} \quad 3.08$$

onde:

R'' - taxas de contagem (valor fixado como sendo igual a 10

vezes o valor da "Radiação de Fundo" - BKG),

F" - fator de sensibilidade (obtido a partir de valores experimentais em laboratório, determinado para os diversos valores da profundidade).

Utilizando-se da relação (3.06) e substituindo-se a equação (3.08) na equação (3.07), obtém-se o valor da atividade a ser injetada.

III.4.3 - Proteção Radiológica

No Brasil, o uso de traçadores radioativos em experimentos de campo está condicionado a licenciamento prévio da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEM. Este licenciamento tem por objetivo garantir a segurança da população, eventualmente sujeita às consequências da liberação controlada de material radioativo no meio ambiente, bem como a da equipe de trabalho diretamente envolvida no manuseio de substâncias radioativas. A atividade a ser injetada deve obedecer a critérios que a relacionam à concentração máxima permissível, CMP, para o traçador radioativo em questão. A CMP é calculada a partir do Limite de Incorporação Anual por Injeção, previsto pelas Normas Básicas de Proteção Radiológica, (23), Resolução CNEN - 6/73.

Maiores detalhes sobre a proteção radiológica com relação ao meio ambiente e à equipe de trabalho podem ser vistos em VENDREME (24) pois os procedimentos seguidos foram os mesmos.

III.4.4 - Preparação e Injeção da Mistura de Traçadores

A princípio, no plano de trabalho fixado, somente no primeiro experimento não seria empregado o traçador radioativo. Por ser preliminar, todas as características do trabalho de campo seriam observadas para facilitar os demais experimentos. No segundo experimento, apesar de toda preparação, não foi possível o uso do traçador radioativo, devido a problemas logísticos.

Devido às pequenas massas e de modo a evitar maiores atrasos na hora da injeção estes traçadores foram preparados no dia anterior ao trabalho de campo e colocados juntos no frasco de injeção sendo diluídos em água num volume de 5000 ml. Este frasco de injeção foi colocado sob uma agitação contínua durante um período de aproximadamente 30 minutos, com o objetivo de se conseguir a mistura completa dos dois traçadores.

No dia seguinte foram transportados para o local da injeção prontos para o lançamento.

A injeção foi instantânea e no centro do rio, sob a ponte principal da localidade de Pedro do Rio, distrito de Petrópolis - RJ.

No terceiro e quarto experimentos foram utilizadas também o traçador radioativo. Neste caso, a preparação do traçador radioativo foi feita no próprio local de injeção.

O material utilizado foi irradiado no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear - CDTN - em Belo Horizonte, e transportado para o Rio de Janeiro por via aérea devidamente blindado para atendimento da legislação da CNEN.

O material ativado na manhã do dia anterior ao

experimento de campo foi constituído de seis pastilhas de KBr. A noite foi transportado para o Rio de Janeiro e no dia seguinte uma equipe de trabalho retirou o material no aeroporto, transportando-o diretamente para o local de injeção.

As seis pastilhas de BKr foram colocadas num frasco, diluídas em água num volume de 1000 ml e colocadas num misturador durante um período de aproximadamente 5 minutos. Posteriormente foram misturadas no frasco de injeção dos traçadores fluorescentes e lançados simultaneamente.

Foram tomadas 2 alíquotas de 10 ml contendo Bromo-82, em cada experimento, para posterior preparação de padrões a serem utilizados na calibração dos cintilômetros. Estas coletas foram feitas antes da mistura do traçador radioativo com os fluorescentes, guardadas em pequenos cofres de chumbo e posteriormente levadas para o laboratório.

Foram tomadas as medidas obrigatórias, que normalmente acompanham o manuseio de material radioativo, utilizando-se manipuladores especiais, avental de chumbo e permanente monitorização.

A injeção da mistura de traçadores foi realizada por pessoal qualificado e treinado no manuseio de material radioativo, usando botas e luvas de borracha e avental de chumbo, evitando, assim, a contaminação direta. A injeção foi feita do mesmo modo quando se usou somente traçador fluorescente.

A descontaminação do frasco de injeção foi feita com a própria água do rio, logo após a injeção, e completada posteriormente no laboratório.

III.4.5 - Medição das Características Hidráulicas

A fim de se obter a comparação entre os valores dos coeficientes de dispersão estimados pelas equações empíricas e os valores obtidos no campo, é necessário a medição das propriedades hidráulicas do escoamento, tais como velocidade, profundidade e declividade que intervêm nas fórmulas.

Os dados de velocidade média nos trechos foram obtidos utilizando-se o tempo médio de viagem do centro de gravidade da nuvem traçadora entre duas seções e a distância medida entre as mesmas.

Os dados de vazão foram obtidos pelo método de integração, HULL (25), para injeção instantânea onde a vazão é calculada simplesmente pela razão entre a massa (ou atividade) injetada do traçador e a integral da curva de concentração versus tempo, sem a necessidade de conhecimento da seção transversal.

As declividades médias foram obtidas da publicação do Ministério das Minas e Energia - MME e Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE - "Inventário das Estações Fluviométricas" (26), novembro de 1983; e os comprimentos entre os postos de amostragem foram medidos em um mapa do IBGE (Petrópolis) na escala 1:50000.

Foram feitas, paralelamente, medidas de velocidades em determinadas seções específicas. Estas velocidades, tendo como objetivo o cálculo do coeficiente de dispersão pelo método de Fischer utilizando a equação (2.45), foram medidas em 25 pontos da seção transversal, em diferentes profundidades,

de forma a se obter o perfil da velocidade naquela seção. Estas medidas serviram também para os cálculos das vazões por métodos convencionais para posterior comparação com os valores obtidos com o uso dos traçadores.

III.5 - PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO

III.5.1 - Preparação e Análise das Amostras Fluorescentes

As análises das amostras fluorescentes foram feitas utilizando-se o espectrofluorímetro marca Jobin-Yvon JY-3.

Este espectrofluorímetro é ligado a um registrador gráfico HP, modelo 7015B X-Y, que permite a medida da fluorescência das amostras através do método de "Varredura Síncrona", como pode ser visto em ROLDAO (27). A partir deste método, pode-se levantar o espectro de fluorescência através da movimentação solidária dos monocromadores de excitação e fluorescência. Os comprimentos de ondas de excitação e emissão fixados para o início da varredura foram 425 nm e 450 nm; e para o término em 575 nm e 600 nm, respectivamente. A distância entre o monocromador de excitação e fluorescência, é neste caso mantida igual a 25 nm.

No Anexo II são apresentados algumas curvas obtidas por este método.

A calibração deste aparelho foi feita através de leituras de concentrações-padrões.

As curvas de calibração foram obtidas separadamente para a Amidorodamina G extra e Uranina, cobrindo toda a faixa de concentração ocorrida no campo, que variou entre $0,1 \text{ mg/m}^3$ a 20 mg/m^3 .

III.5.2 - Transformação das Taxas de Contagem em Concentrações

HULL (25) mostrou que a taxa de contagem, R'' , obtida pelo detector, é proporcional à concentração, c , naquele mesmo instante, ou seja:

$$R'' = F'' c \quad 3.09$$

onde, F'' é a constante de proporcionalidade, denominada "fator de sensibilidade".

Para o caso da medida dentro do rio, $F'' = Ff$, onde Ff é o fator de sensibilidade de medição, obtém-se que:

$$\int c \, dt = \frac{1}{Ff} \int R'' \, dt = \frac{N}{Ff} \quad 3.10$$

onde, $N = \int R'' \, dt$ é o número de contagens "liquidas" detectadas durante toda a passagem do traçador.

A dificuldade prática encontrada para se usar este método está na determinação precisa do fator de sensibilidade Ff de medição "in situ", ou seja, dentro do próprio escoamento. Visando superar esta dificuldade, GARDNER e DUNN (28) desenvolveram o "Método da Amostra Única" ou "Método de Gardner".

Como pode ser visto em AUGUSTO (19), este método é baseado no fato de que a taxa de contagem medida em um ponto do fluxo, em um determinado momento, é diretamente proporcional a concentração de traçador que passa por aquele ponto, naquele instante. Assim, toma-se, instantaneamente, uma única amostra do

fluxo, denominada "Amostra Gardner", e ao mesmo tempo anota-se a taxa de contagem correspondente, medida pelo cintilômetro que está acoplado ao detector submerso naquele ponto.

Sendo R_f a taxa de contagem no momento em que a amostra é retirada e C_f a concentração de traçador na "Amostra Gardner" (concentração idêntica a concentração no fluxo naquele instante), tem-se que:

$$R_f = F_f C_f \quad 3.11$$

A "Amostra Gardner", no laboratório, é medida em um recipiente de calibração, cujo o volume, V_c , é perfeitamente conhecido, com o mesmo detector usado ao se medir a passagem da nuvem no campo. Como a concentração da "Amostra Gardner" é idêntica a concentração do traçador no rio, no instante em que a amostra foi retirada, tem-se que :

$$F_f = R_f / C_f \quad e \quad F_c = R_g / C_f \quad 3.12$$

onde:

F_c - fator de sensibilidade no recipiente de calibração,

R_g - taxas de contagem da "Amostra Gardner" medidas no recipiente de calibração.

Da equação (3.12) obtém-se:

$$C_f = R_g / F_c = R_f / F_f \quad 3.13$$

$$F_f = R_f F_c / R_g \quad 3.14$$

Substituindo a expressão (3.14) na expressão (3.10), vem:

$$\int c \, dt = \frac{N}{\frac{R_f}{R_g} F_c} \quad 3.15$$

A determinação de F_c é feita com a alíquota retirada antes da injeção. Esta alíquota é medida com o mesmo detector usado no campo e no mesmo recipiente de calibração, cuja concentração é igual a $C_c = f_d A_t / V_c$, onde f_d é o fator de diluição da alíquota e A_t é a atividade injetada. Levando na expressão (3.10), para o caso da alíquota:

$$F_c = R_c / C_c = (R_c V_c) / (f_d A_t) \quad 3.16$$

Substituindo a equação (3.16) na (3.15):

$$\int c \, dt = \frac{N}{\frac{R_f}{R_g}} \frac{f_d A_t}{R_c V_c} \quad 3.17$$

Devido ao decaimento do traçador radioativo, todas as leituras foram corrigidas por um fator de correção, N^* , definido como: $N^* = \exp(-0,693/36) \cdot (t_i - t_0)$, onde todas as leituras são corrigidas para um único referencial de tempo, que neste caso foi a hora da injeção, t_0 .

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS

IV.1 - AREA SELECIONADA E LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE AMOSTRAGEM

O rio selecionado para a realização dos experimentos de campo foi o Rio Piabanha. Este rio nasce na Serra do Mar, próximo à cidade de Petrópolis e deságua no Rio Paraíba do Sul, próximo à cidade de Três Rios. Sua escolha deveu-se ao fato deste rio drenar uma região bastante industrializada e por ser margeado pela BR - 040 e pela estrada União Indústria, sendo cortado por esta em diversos trechos, estando sujeito a descargas acidentais de poluentes em concentrações elevadas. Na Figura IV.1 pode-se ver a localização do Rio Piabanha.

Sob o ponto de vista hidráulico, o Rio Piabanha possui acentuada declividade, apresentando trechos bastantes encachoeirados.

O trecho selecionado para as pesquisas, situa-se entre as localidades de Pedro do Rio e Areal, com comprimento de aproximadamente 20 quilômetros, conforme pode ser visto na Figura IV.2.

O ponto de injeção, P0, foi localizado sob a ponte principal da localidade de Pedro do Rio.

O primeiro posto de amostragem, P1, foi localizado a 2200 m do ponto de injeção, no bairro Adriano Teixeira de Bastos, em um areal local, de fácil acesso, no final de um trecho bastante uniforme do rio.

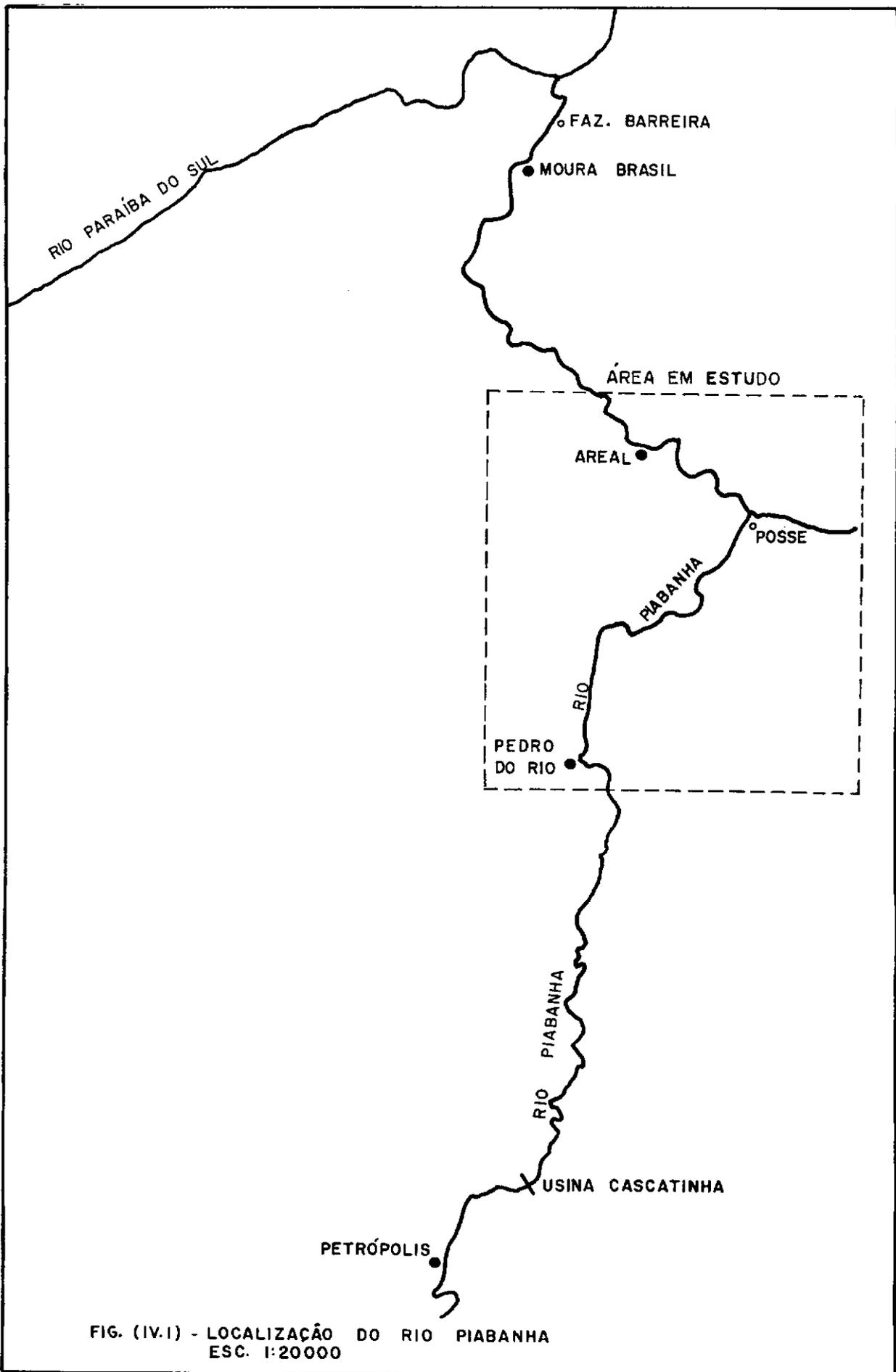
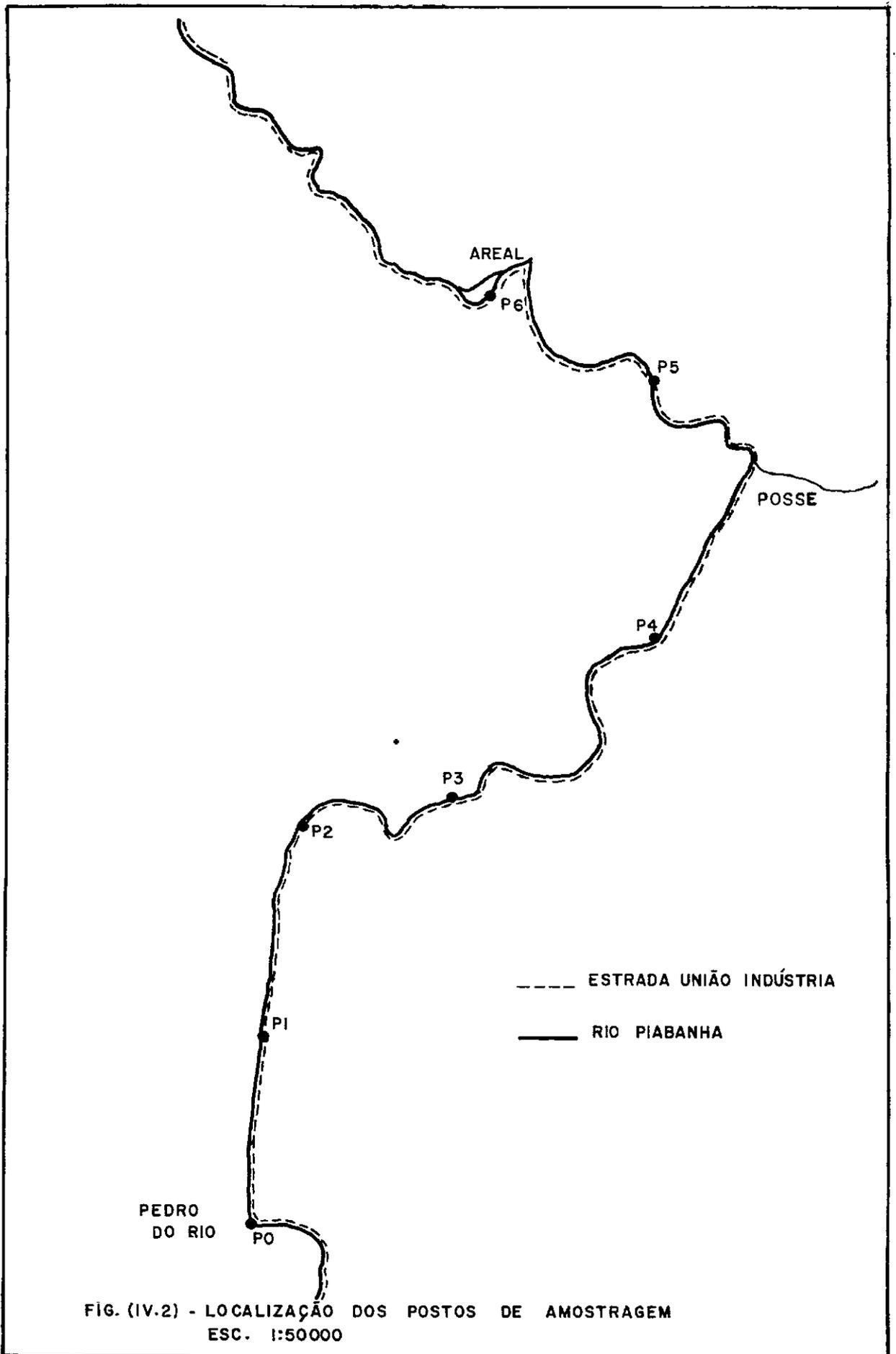


FIG. (IV.1) - LOCALIZAÇÃO DO RIO PIABANHA
ESC. 1:20000



O segundo posto, P2, foi localizado a 5000 m do ponto de injeção, sob a ponte que liga a estrada União Indústria à localidade de Carlos Canedo.

O terceiro posto de amostragem, P3, foi localizado a 7500 m do ponto de injeção, sob a ponte particular da fazenda de Maanain.

Do ponto de injeção até o posto P3, o trecho é misto, apresentando seções um pouco encachoeiradas e seções de escoamento tranquilo.

O quarto posto, P4, foi localizado a 11600 m do ponto de injeção, sob a ponte que liga a estrada União Indústria à uma estrada secundária de uma área residencial.

O quinto posto, P5 é localizado a 16400 m do ponto de injeção, sob a ponte na estrada União Indústria. Tanto o posto P4 e o P5 são em trechos bastantes encachoeirados.

Nestes postos as sondas de cintilação, usadas na detecção do traçador radioativo, foram localizadas imediatamente acima da linha d'água, devido a dificuldade da fixação dos aparelhos no interior do escoamento.

O sexto posto, P6, foi localizado a 18600 m do ponto de injeção, selecionado sob uma ponte dentro da própria cidade de Areal. Neste local, o Rio Piabanha encontra-se com o Rio Preto e seguem a jusante até encontrar com os Rios Paraibuna e Paraíba do Sul, na cidade de Três Rios. No primeiro experimento não foi possível coletar amostras neste ponto devido a um atraso inesperado no horário da injeção.

Durante todo o trecho percebe-se visualmente que a água transporta grande carga de poluentes, que afetam sua cor e sua

turbidez original.

No 3º e 4º experimentos foram coletadas amostras, em cada posto de amostragem, para análise de turbidez feitas no laboratório da FEEMA. Os resultados estão apresentados na Tabela IV.1.

Na Tabela IV.2 são mostrados os dados de qualidade da água, coletados em dias próximos aos dos trabalhos experimentais, obtidos pela FEEMA. O posto de coleta (PB11) é localizado próximo à primeira ponte que corta o Rio Piabanha, na estrada que liga a cidade de Areal a Moura Brasil.

De acordo com as Tabela IV.2, os dados de pH (entre 5 e 9), O.D. (superior a 5 mg/l) e DBO₅ (maior do que 5 mg/l), encontram-se dentro das especificações exigidas para as águas de Classe 2 - Portaria GM/0013 de 15 de Janeiro de 1973 - Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA.

Com relação a Turbidez, os valores encontram-se acima dos valores recomendáveis para águas potáveis mas inferiores ao valor considerado limite para águas utilizadas para consumo público, após devido tratamento - Normas Técnicas 305 - Critérios de Qualidade de Água para Abastecimento Público com Filtração Lenta e Desinfecção.

TURBIDEZ (UT)						
EXP/POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
3	12	14	16	10	8	10
4	19	14	16	14	22	19

TABELA (IV.1) - Análise de Turbidez do Rio Piabanha no 3º e 4º experimentos.

DATA DA COLETA	pH	TURBIDEZ (UT)	O.D. (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)
04/12/84	7,38	22	8,0	2,0
08/07/85	7,31	22	8,6	3,6
13/08/85	7,19	14	8,2	3,2
19/09/85	7,00	12	7,6	3,0

TABELA (IV.2) - Dados de qualidade da água do Rio Piabanha.
Posto de Coleta (PB11), entre as cidades de
Areal e Moura Brasil.

IV.2 - PRÉ-DIMENSIONAMENTO

O pré-dimensionamento foi elaborado de acordo com a formulação apresentada no Capítulo III - Seção 4.2. Para a aplicação das equações apresentadas, foi necessário fazer uma estimativa das características hidráulicas médias, apresentadas na Tabela IV.3.

IV.2.1 - Distância de Bom Misturamento (DBM)

A partir dos dados apresentados na Tabela IV.3 e das equações apresentadas no Capítulo III - Seção III.4.2.1, os valores para a DBM, podem ser vistos na Tabela IV.4.

CARACTERISTICAS HIDRAULICAS	VALORES MEDIOS ESTIMADOS
Largura (m)	21,50
Profundidade (m)	0,70
Perimetro molhado (m)	23,40
Raio Hidráulico (m)	0,70
Área molhada (m ²)	15,00
Velocidade (m/s)	0,30
Velocidade de Fricção (m/s)	0,26
Vazão (m ³ /s)	4,50

TABELA (IV.3) - Valores utilizados no pré-dimensionamento.

AUTOR	DBM
Ward	2766
Yotsukura	368
Rimar	2956
Fischer	2360

TABELA (IV.4) - Valores previstos por diversos autores para a Distância de Bom Mistramento (DBM).

IV.2.2 - Atividade e Massa a Injetar

As massas dos traçadores fluorescentes, Amidorodamina G extra e Uranina, utilizadas nos três primeiros experimentos foram 170g e 100g, respectivamente.

No quarto experimento, diminuiu-se a quantidade de Amidorodamina G extra para 100g, visando obter a amplitude dos picos de Amidorodamina G extra e Uranina, aproximadamente iguais.

A atividade injetada do traçador radioativo de 500 mCi, foi obtida a partir dos resultados do primeiro experimento com traçador fluorescente. Esta atividade (em cada posto de coleta), estava dentro do valor da CMP, calculada a partir do Limite de Incorporação Anual por Injeção, prevista pelas Normas da CNEN, como sendo igual a $300 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$, para água potável. A carta enviada à CNEN para liberação deste material, bem como os cálculos feitos para se chegar a esta atividade, são apresentados no Anexo I.

Nas Figuras IV.3.1, IV.3.2, IV.3.3, IV.3.4, e IV.3.5, são apresentadas as curvas de concentração versus tempo, obtidas no pré-dimensionamento, bem como os valores reais obtidos no próprio campo, com a análise de algumas amostras feitas no fluorímetro. O fluorímetro utilizado foi o fluorímetro Turner, modelo 111.

Com a análise destas amostras, foi possível verificar qual das curvas de medição simulada era mais adequada para cada posto, a determinação exata da concentração máxima no posto, o tempo de passagem da nuvem traçadora (tempo de duração de subida

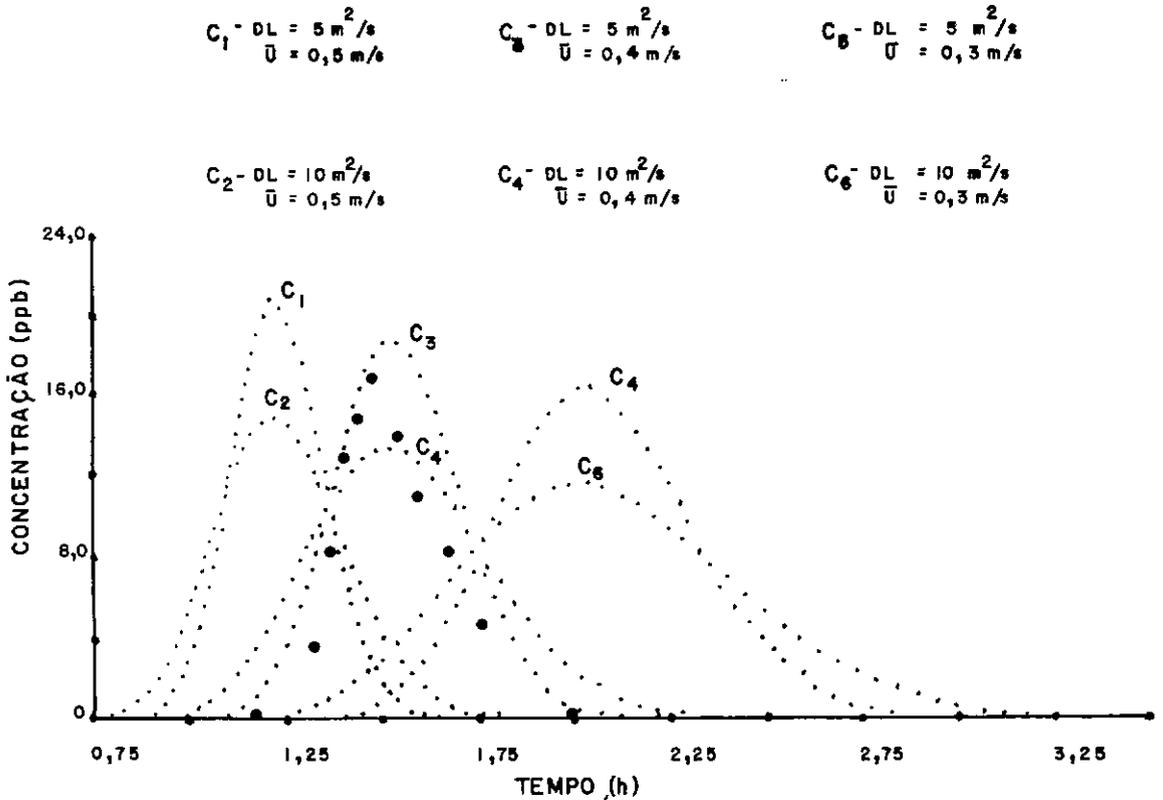


FIG. (IV.3.1) - CURVAS OBTIDAS NO PRÉ-DIMENSIONAMENTO POSTO 1

..... - VALORES TEÓRICOS
 ●●●●● - VALORES REAIS

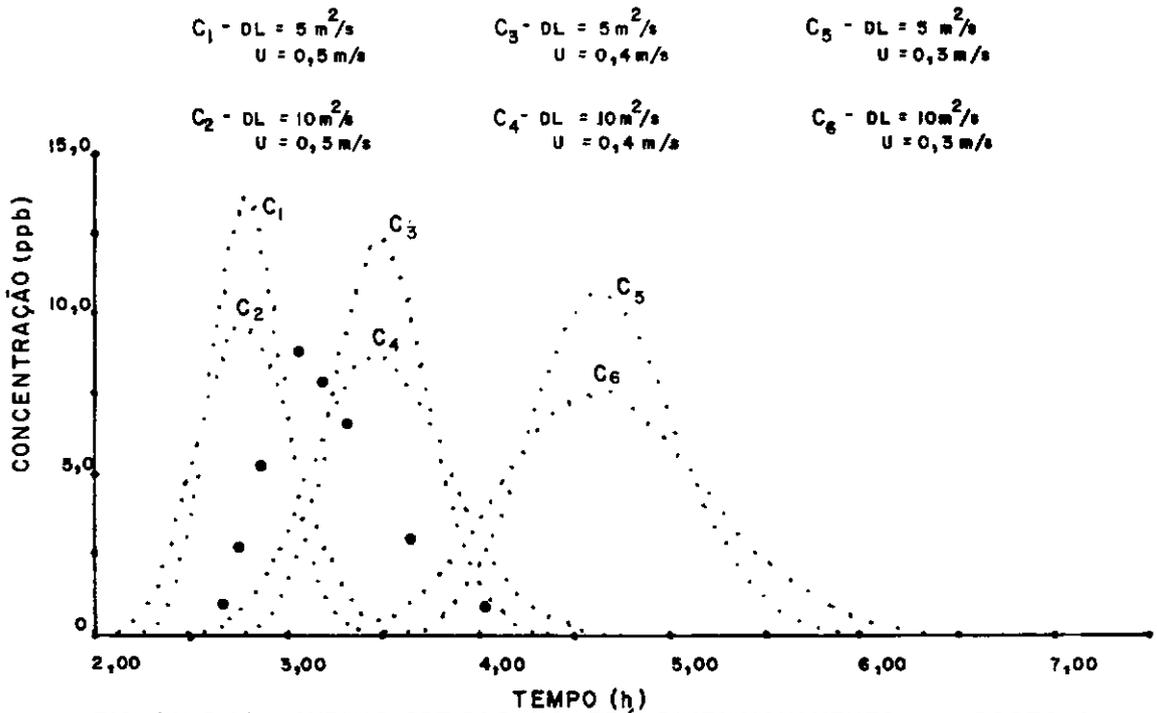


FIG. (IV.3.2) - CURVAS OBTIDAS NO PRÉ-DIMENSIONAMENTO - POSTO 2

..... - VALORES TEÓRICOS
 ●●●●● - VALORES REAIS

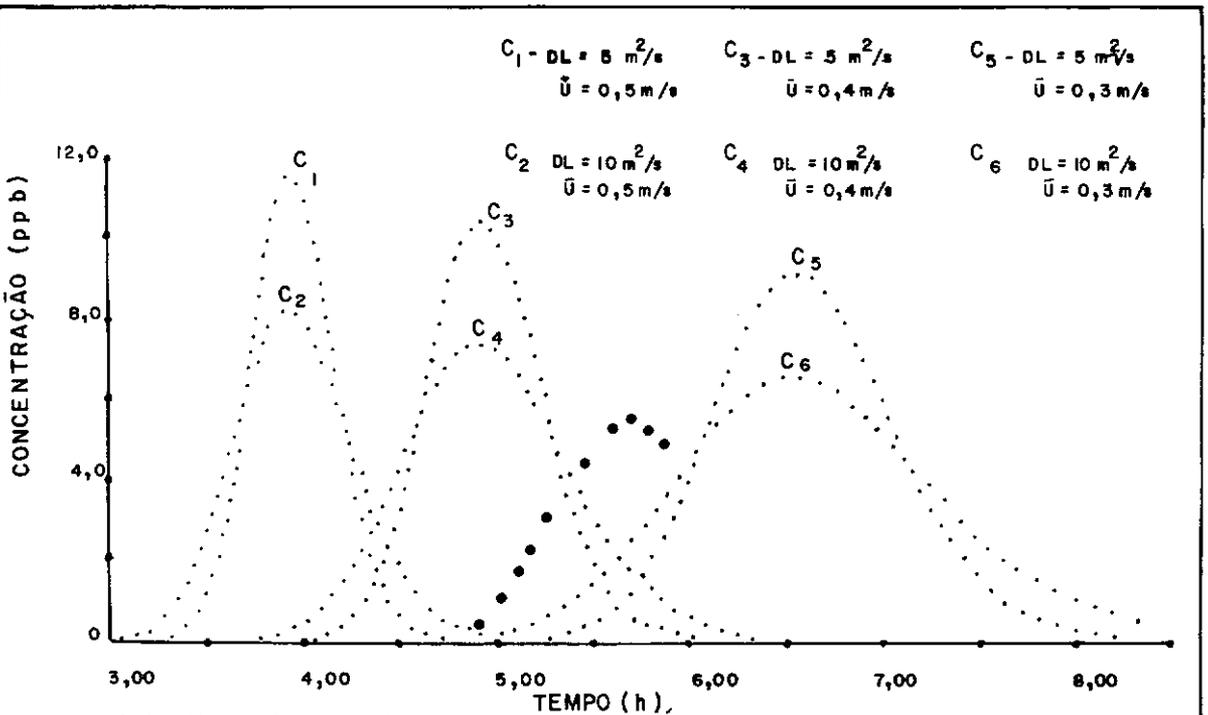


FIG. (IV.3.3) - CURVAS OBTIDAS NO PRE-DIMENSIONAMENTO - POSTO 3

..... VALORES TEORICOS

●●●●● - VALORES REAIS

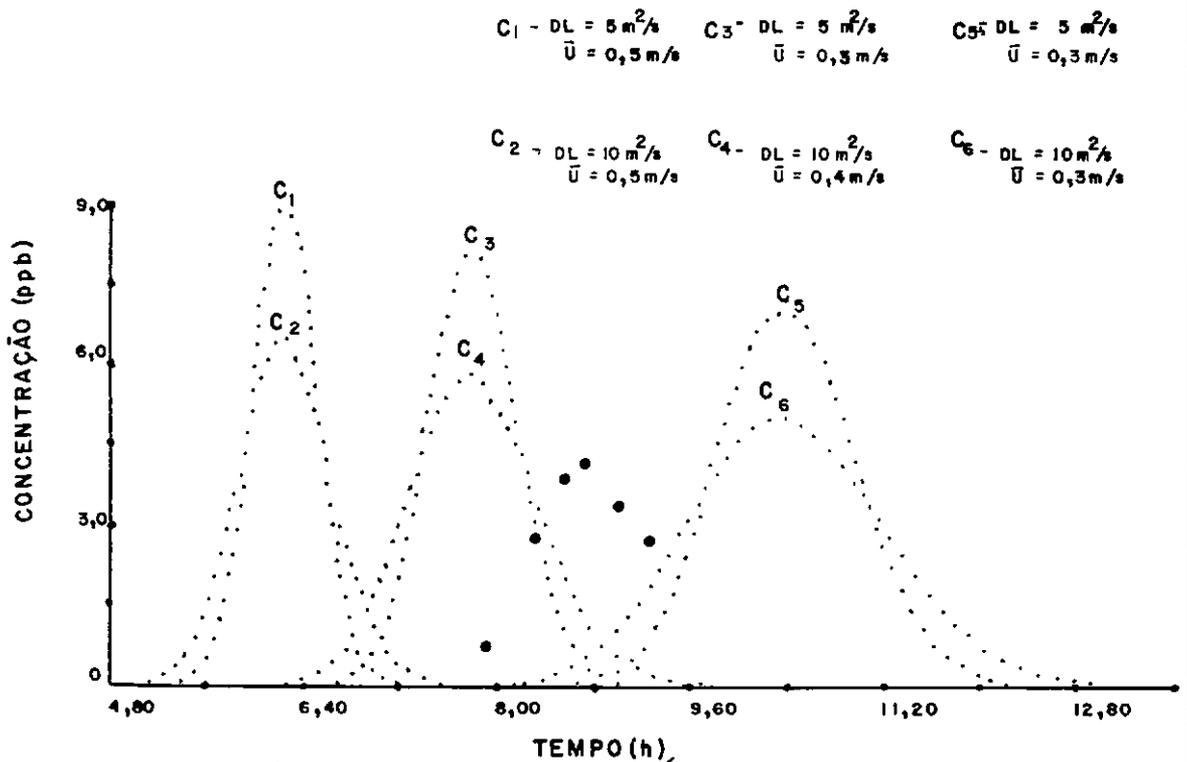


FIG. (IV.3.4) - CURVAS OBTIDAS NO PRE-DIMENSIONAMENTO - POSTO 4

..... VALORES TEORICOS

●●●●● VALORES REAIS

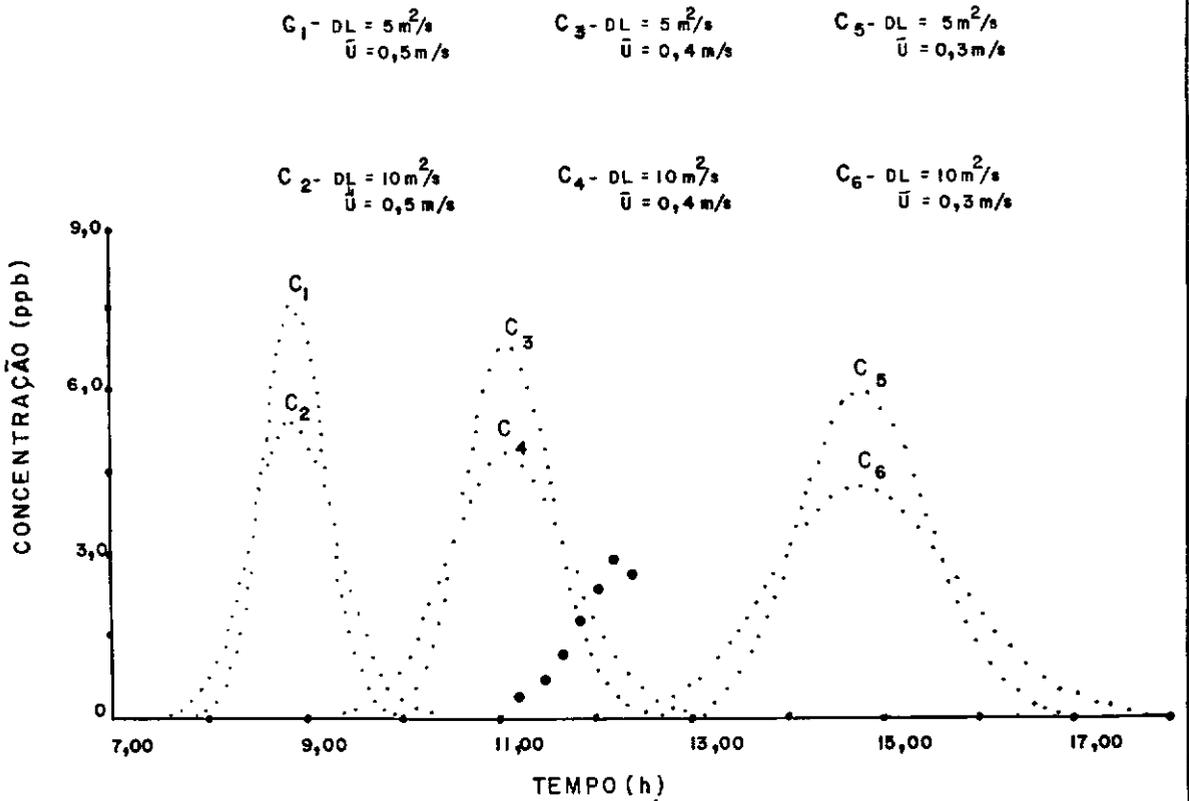


FIG. (IV.3.5) - CURVAS OBTIDAS NO PRÉ-DIMENSIONAMENTO - POSTO 5

- VALORES TEÓRICOS
- VALORES REAIS

e tempo de duração de descida da curva), permitindo, assim, a extrapolação para os postos seguintes.

IV.3 - EXPERIMENTOS DE CAMPO

Foram realizadas quatro experimentos nas seguintes datas: 05/12/84, 03/07/85, 08/08/85 e 05/09/85.

O primeiro experimento serviu também como teste preliminar para os equipamentos, bem como para determinar a atividade do traçador radioativo e verificar se as quantidades de traçadores fluorescentes eram suficientes.

Em todos os experimentos as injeções foram instantâneas e pontuais, feitas no mesmo local (P0), sob a ponte principal de Pedro do Rio.

A distância de cada posto de amostragem ao ponto de injeção é mostrado na Tabela IV.5.

CODIGO	POSTO DE AMOSTRAGEM					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
DIST. APOS INJEÇÃO	2,20	5,00	7,50	11,60	16,40	18,60

TABELA (IV.5) - Distâncias dos postos de amostragem ao ponto de injeção (km).

Em todos os experimentos os postos P1, P2 e P3, foram subdivididos em dois sub-postos de coleta, posicionados a um terço e dois terços da largura da seção transversal, de modo a

estabelecer uma comparação visando a verificação do atingimento completo da Distância de Bom Misturamento, assim, como fator de segurança para o caso de falhas em algum dos equipamentos.

Como todos os experimentos tiveram uma duração de mais de 24 horas, a equipe do L.T. encarregada de coletar as amostras, foi dividida em 3 grupos de trabalho, cada grupo trabalhando em turno de 8 horas. Cada um destes grupos foi separado em duas equipes independentes, uma coletando amostras nos postos pares e a outra nos postos ímpares.

Durante todos os experimentos de campo, foram realizadas medições de perfis de velocidades em algumas seções transversais, com a finalidade de se obter dados para serem usados na aplicação do método de Fischer, equação (2.25), e medir as vazões por métodos convencionais para posterior comparação com os resultados obtidos pelo método dos traçadores. A metodologia aplicada pode ser vista no Capítulo III - Seção III.4.5. As medições foram realizadas por três equipes independentes, uma do L.T., uma da FEEMA e uma do DNAEE.

Devido à impossibilidade de algumas medições de velocidade serem feitas no mesmo local dos postos de coletas, devido ao seu difícil acesso ou por serem trechos bastante encachoeirados, estas medidas foram feitas imediatamente à jusante ou à montante de cada posto.

No primeiro experimento não foi possível fazer a coleta de amostras no posto P6 devido a um atraso no horário da injeção.

O primeiro passo dado em todos os trabalhos de campo, foi coletar amostras de água representativas das condições

ambientais vigentes. Estas amostras foram coletadas no ponto de injeção e guardadas em "bombonas" (recipientes de plástico de 20000 ml), usadas posteriormente no laboratório para as curvas de calibração do material fluorescente e radioativo.

Para a aplicação do "Método de Gardner", foram coletadas amostras em torno do pico da nuvem do traçador, guardadas também em "bombonas" numeradas para serem, posteriormente analisadas no L.T.

Nos postos P1 e P2, devido ao fato da nuvem traçadora alcançar o pico mais rapidamente, as coletas foram feitas de 5 em 5 minutos e intensificadas, próximo à passagem do pico, para 3 em 3 minutos. Nos postos P3 e P4, como a subida é menos acentuada, foram coletadas amostras de 5 em 5 minutos e de 10 em 10 minutos nos postos P4, P5 e P6, durante a passagem completa da nuvem.

As medições feitas com o traçador radioativo seguiram o mesmo procedimento.

As Figuras IV.4.1, IV.4.2, IV.4.3, IV.5.1, IV.5.2, IV.5.3, IV.6.1, IV.6.2 e IV.6.3, mostram, como exemplo as curvas do terceiro experimento, que apesar dos postos P1, P2, e P3, terem sido subdivididos em 2 pontos de coleta (P1.1, P1.2, P2.1, P2.2, P3.1 e P3.2), para o caso dos três traçadores, os resultados não sofrem variações consideráveis, sendo, portanto daqui para frente somente considerados os pontos P1.1, P2.1 e P3.1, denominados P1, P2 e P3, respectivamente. As demais curvas do terceiro experimento podem ser vistas no Anexo III.

As Figuras IV.7.1, IV.7.2, e IV.7.3, mostram as curvas de passagem da nuvem de cada traçador separadamente, para o

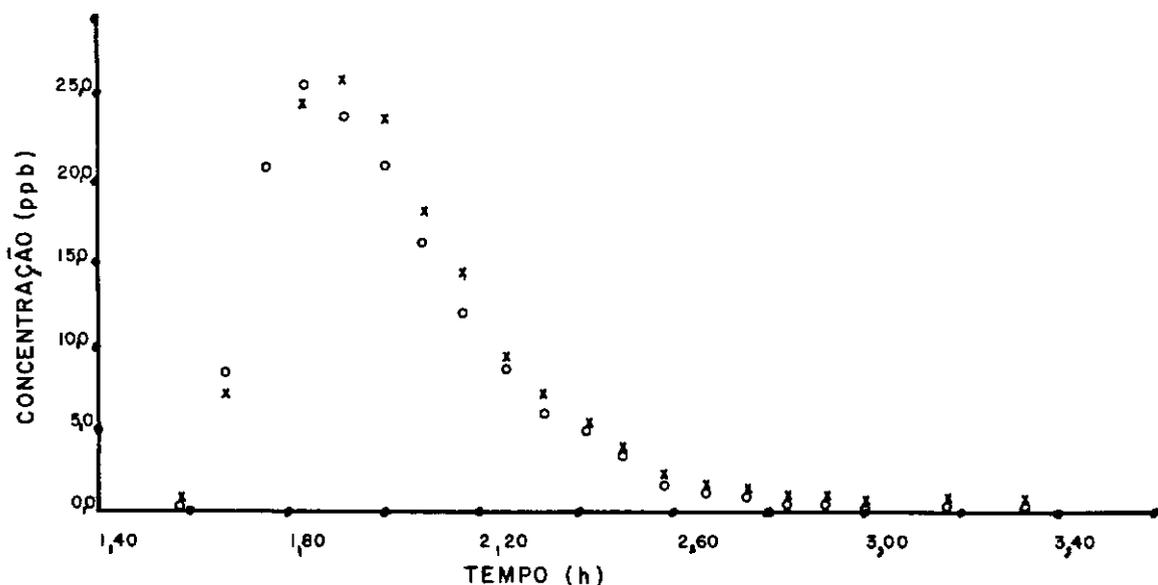


FIG.(IV. 4.1) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 1

o SUB-POSTO 1.1
x SUB-POSTO 1.2

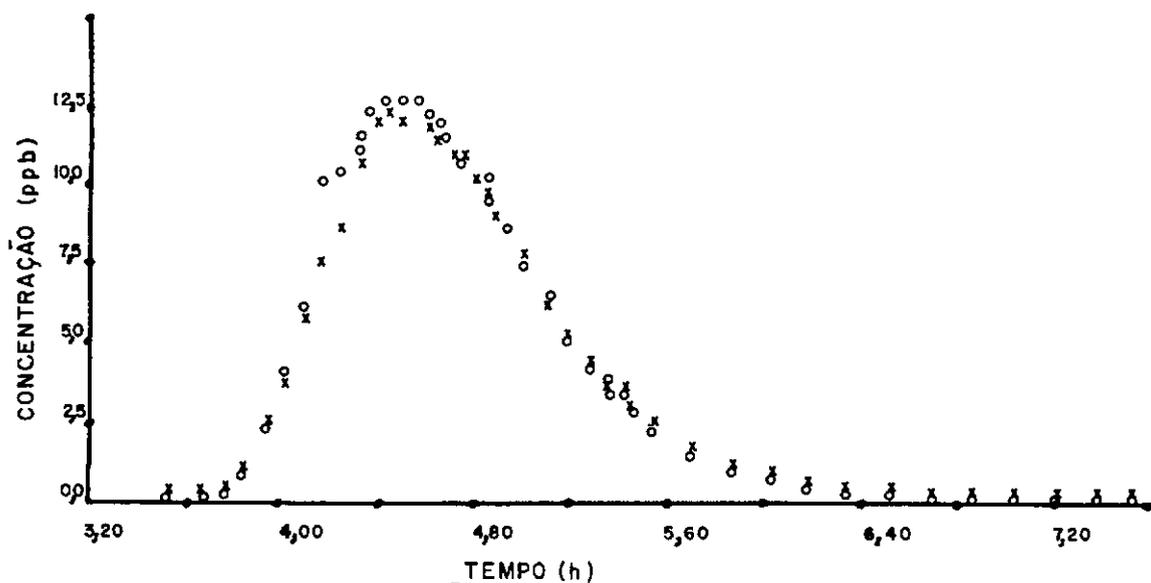


FIG. (IV. 4.2) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 2

o SUB-POSTO 2.1
x SUB-POSTO 2.2

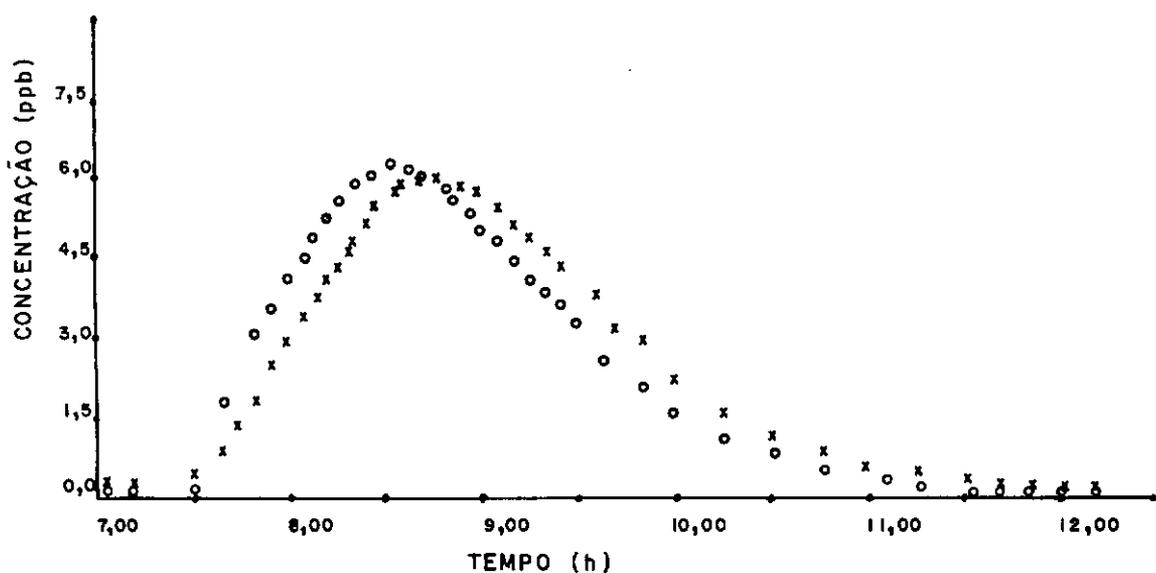


FIG. (IV. 4.3) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. x TEMPO
 3º EXPERIMENTO POSTO 3
 o SUB-POSTO 3.1
 x SUB-POSTO 3.2

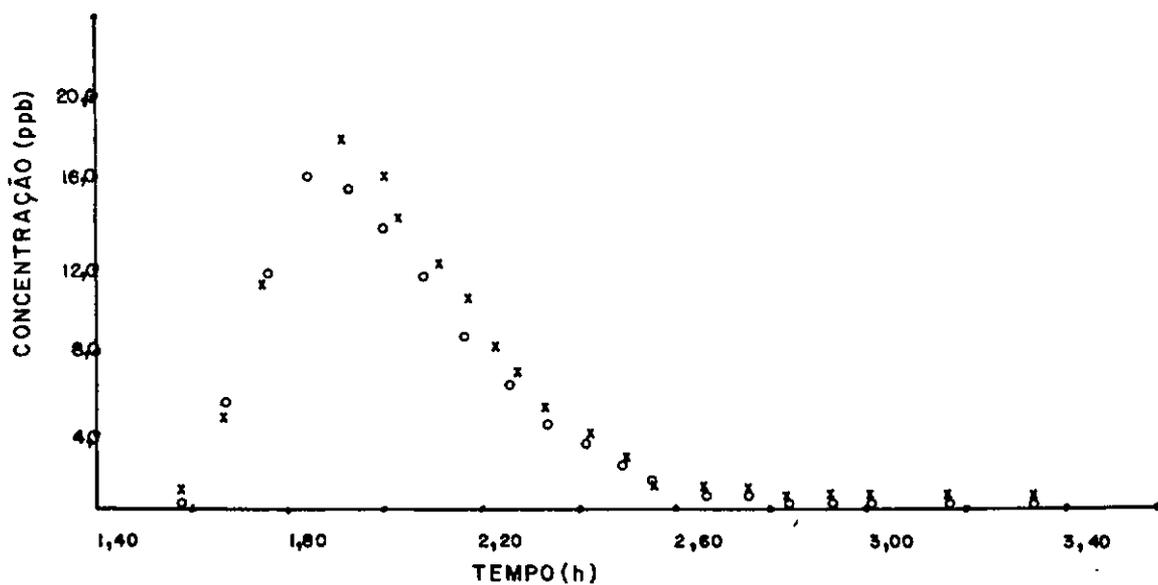


FIG. (IV. 5.1) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
 3º EXPERIMENTO POSTO 1
 o SUB-POSTO 1.1
 x SUB-POSTO 1.2

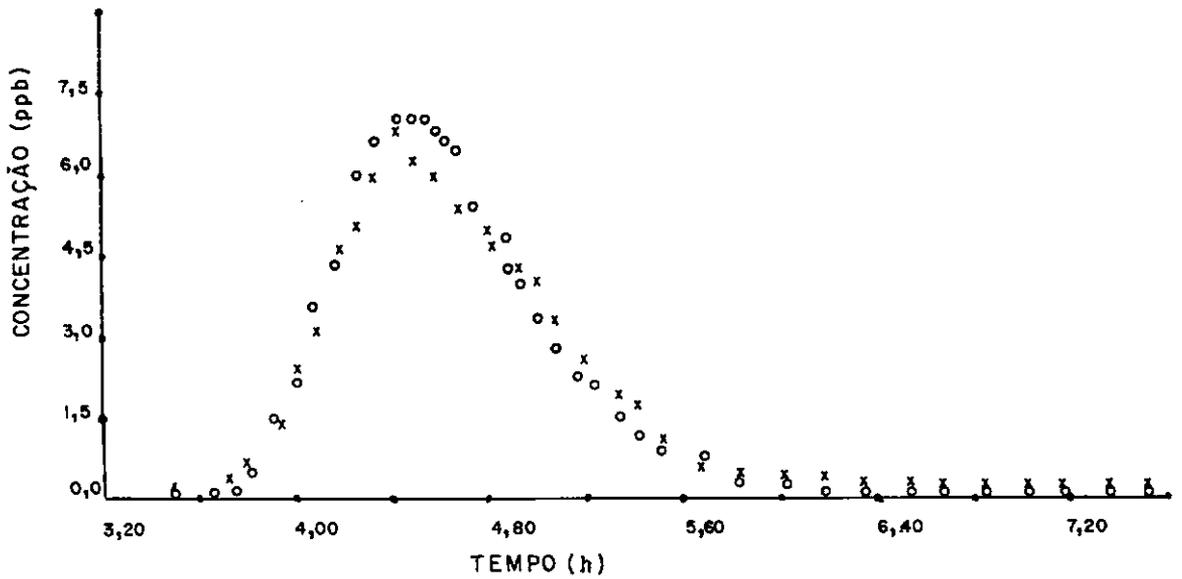


FIG.(IV.5.2) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 2
o SUB-POSTO 2.1
x SUB-POSTO 2.2

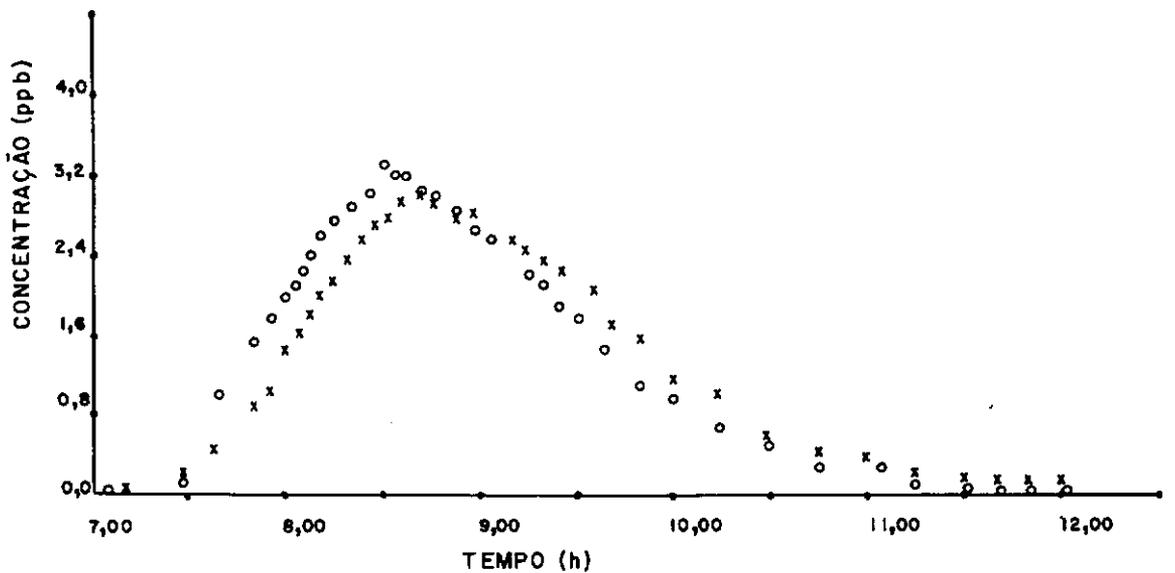


FIG.(IV.5.3) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 3
o SUB-POSTO 3.1
x SUB-POSTO 3.2

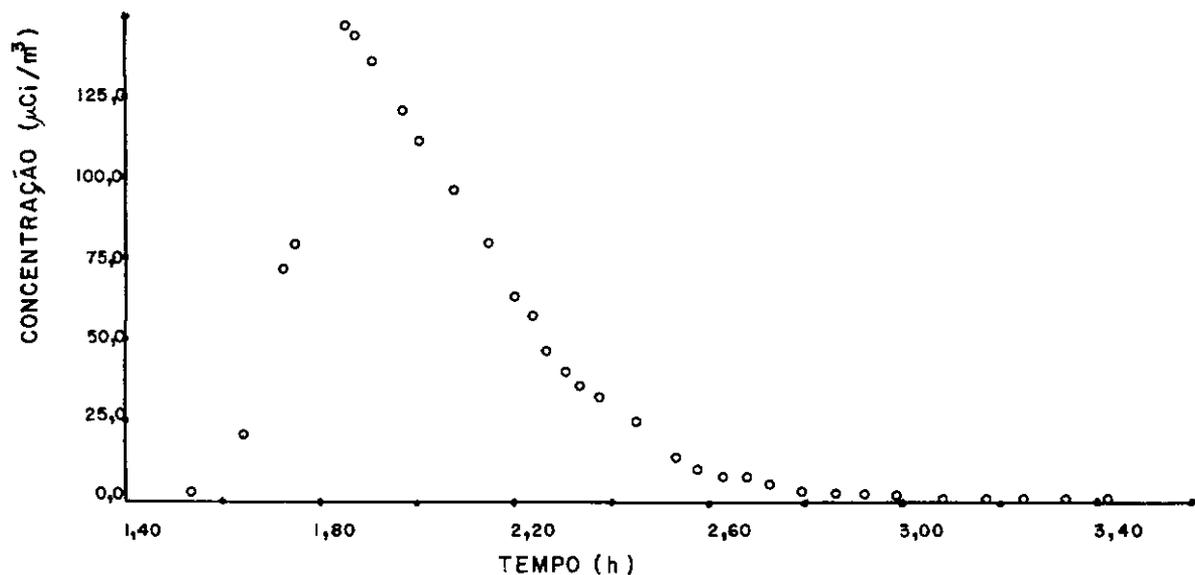


FIG.(IV.6.1) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO-82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 1
○ SUB-POSTO 1.1
x SUB-POSTO 1.2

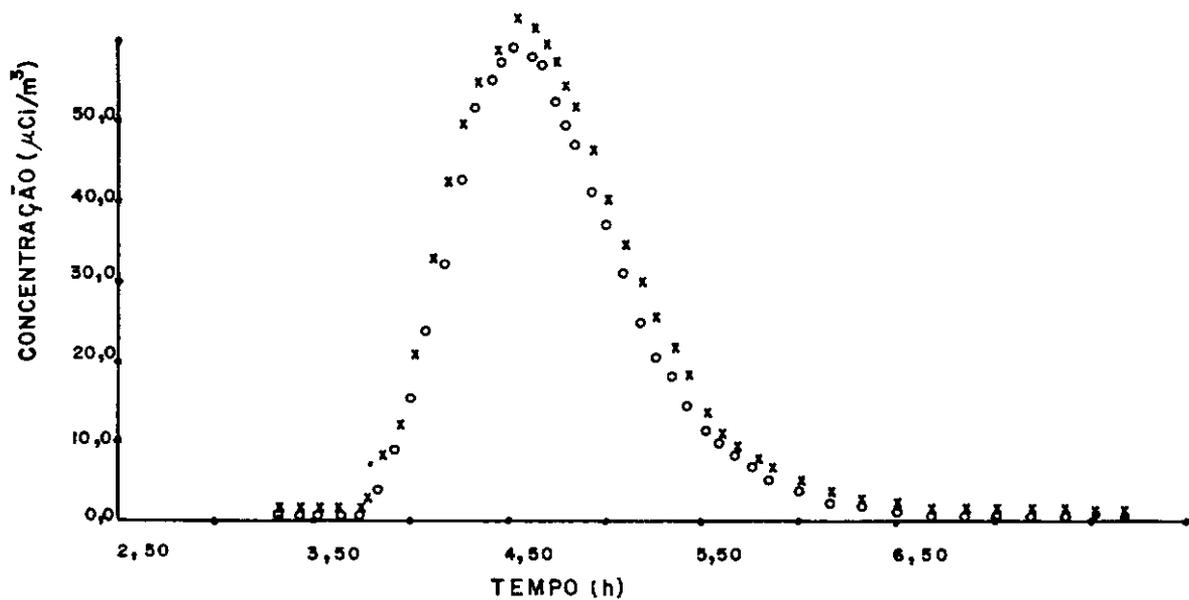
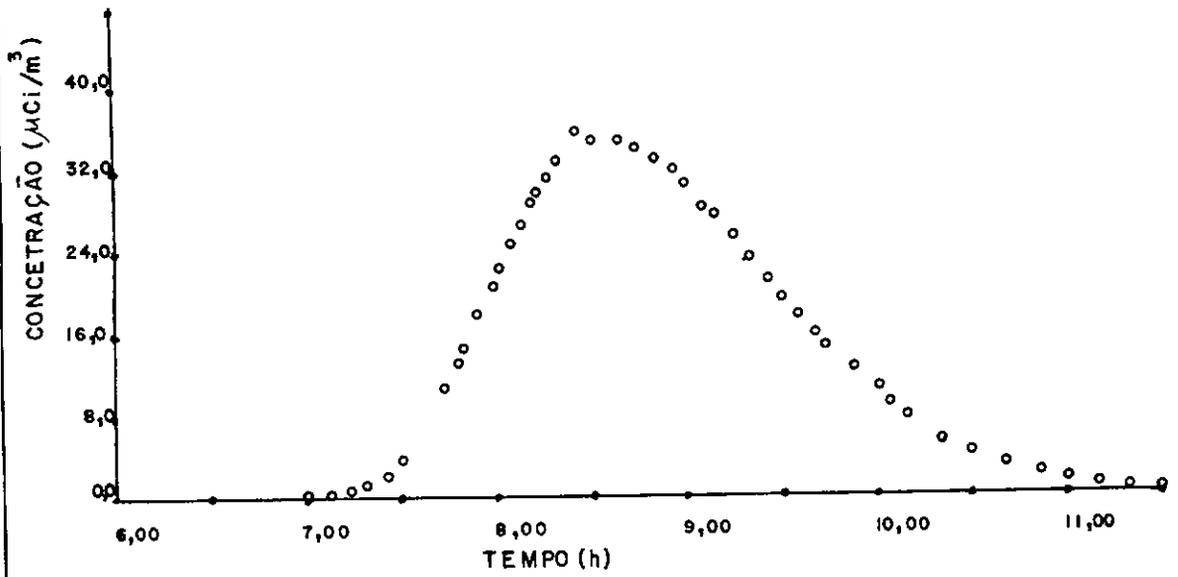


FIG.(IV.6.2) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO-82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 2
○ SUB-POSTO 2.1
x SUB-POSTO 2.2



FIG(IV.6.3) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO-82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 3
o SUB-POSTO 3.1

terceiro experimento. As demais curvas (1º, 2º e 4º experimentos) obtidas no campo podem ser vistas no Anexo III.

IV.4. - RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela IV.6 encontram-se os dados hidráulicos do Rio Piabanha, obtidos pelas equipes de medição hidrométrica, para cada experimento. Neste caso os valores de velocidades médias são valores médios na seção, calculados pelo método convencional com a utilização de molinetes, e as vazões pelo método do produto da área da seção transversal pelas velocidades médias. Para os locais onde não foi possível realizar medições, são usados valores obtidos pela publicação do Boletim Fluviométrico do DENAEE, indicados por (*). Estes valores foram usados posteriormente para os cálculos dos coeficientes de dispersão estimados pelas equações empíricas.

Os valores dos coeficientes de dispersão estimados pelas equações empíricas apresentadas no Capítulo II - Seção II.2, podem ser vistos nas Tabelas IV.7.1 (1º experimento), IV.7.2 (2º experimento), IV.7.3 (3º experimento) e IV.7.4 (4º experimento).

Para a estimativa de D_1 , a partir de equações empíricas, o valor de S (declividade) foi tomado como sendo um valor médio igual a 0,0108, no trecho entre Pedro do Rio e Areal, obtido pela publicação do DNAEE, citada no Capítulo III -

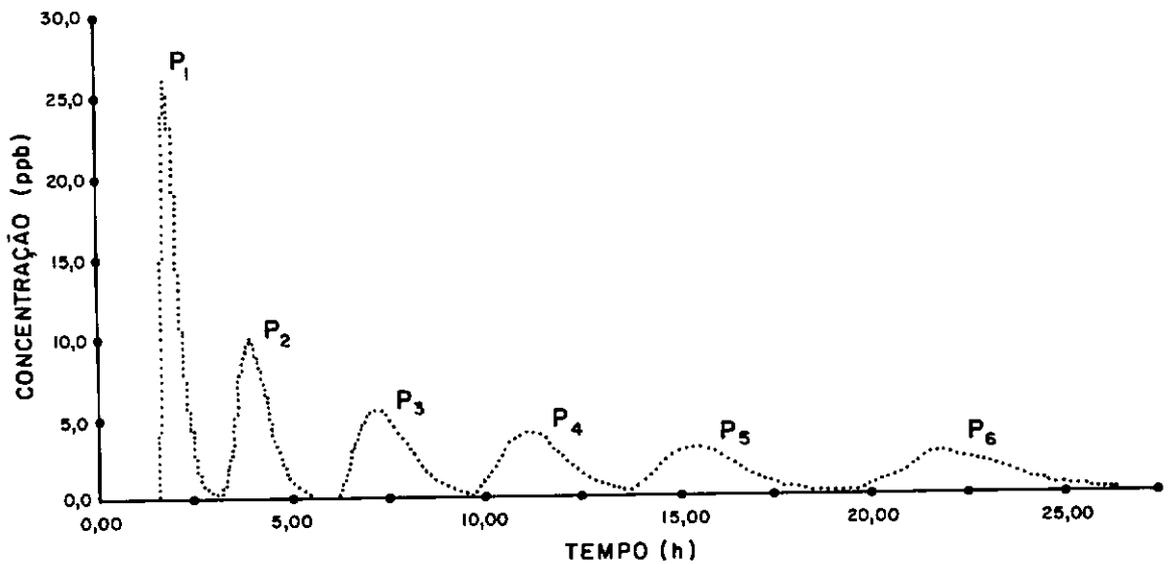


FIG. (IV.7.1) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO

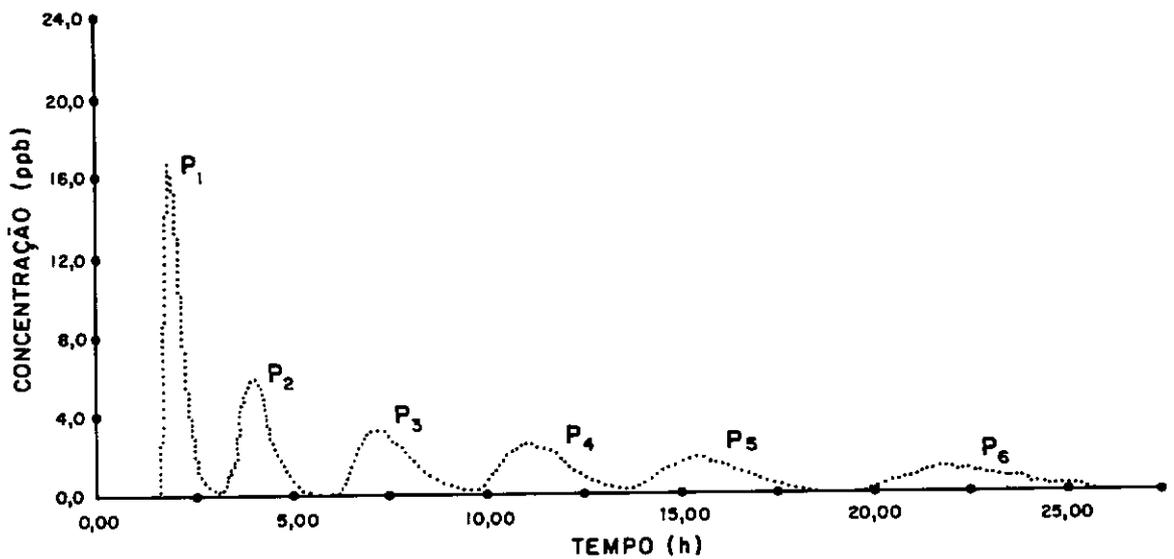


FIG. (IV.7.2) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO

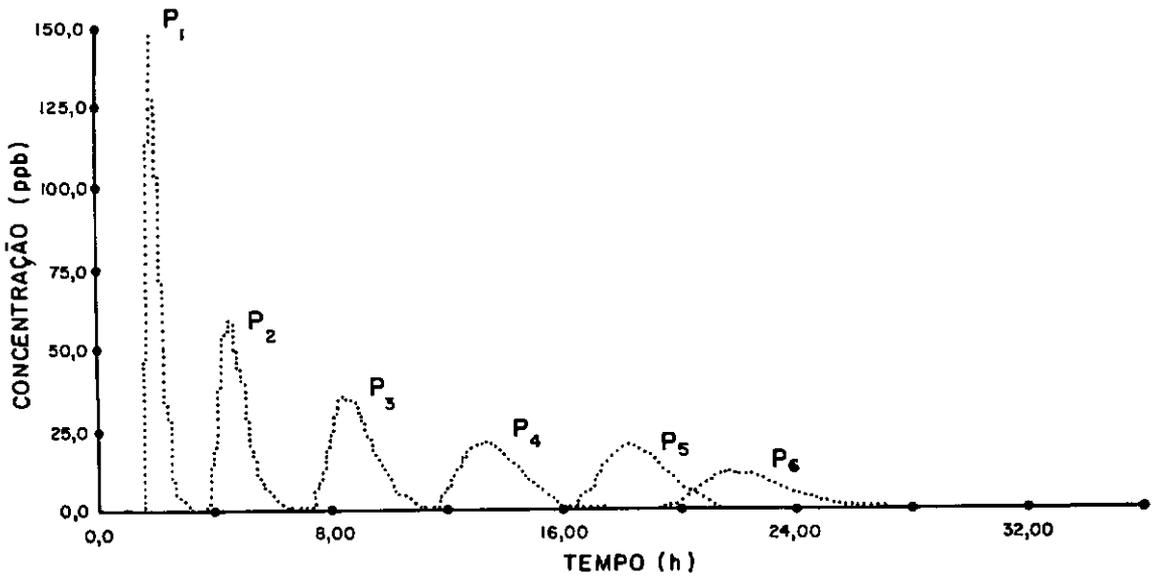


FIG. (IV.7.3) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE BROMO-82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO

EXP.	POSTO	LARG. (m)	PROF. (m)	RAIO HID. (m)	ÁREA (m ²)	VEL. MED. (m/s)	VEL. FRIC. (m/s)	VAZÃO (m ³ /s)
1	1	19,00	0,78	0,73	14,26	0,27	0,28	3,78
	2	20,00	0,79	0,71	14,24	0,28	0,28	3,63
	3	21,50 (*)	0,70 (*)	0,70 (*)	15,00 (*)	0,30 (*)	0,26 (*)	4,50 (*)
	4							
	5							
	6							
2	1	21,50 (*)	0,70 (*)	0,70 (*)	15,00 (*)	0,30 (*)	0,26 (*)	4,50 (*)
	2							
	3							
	4	20,00	0,57	0,49	9,84	0,48	0,23	4,71
	5	21,00	0,75	0,71	15,54	0,32	0,28	5,11
	6	29,00	0,87	0,82	24,07	0,21	0,30	5,01
3	1	21,50 (*)	0,70 (*)	0,70 (*)	15,00 (*)	0,30 (*)	0,26 (*)	4,50 (*)
	2	17,50	0,67	0,60	10,90	0,32	0,25	3,47
	3	24,00	1,28	1,03	26,00	0,13	0,33	3,48
	4	21,50 (*)	0,70 (*)	0,70 (*)	15,00 (*)	0,30 (*)	0,26 (*)	4,50 (*)
	5							
	6							
4	1	21,50 (*)	0,70 (*)	0,70 (*)	15,00 (*)	0,30 (*)	0,26 (*)	4,50 (*)
	2	21,00	0,56	0,53	11,11	0,42	0,24	4,61
	3	25,00	1,29	1,22	30,96	0,16	0,36	4,79
	4	24,00	0,35	0,35	8,52	0,53	0,19	4,49
	5	21,50	0,43	0,47	9,74	0,42	0,22	4,04
	6	28,50	0,86	0,84	24,19	0,21	0,30	4,99

TABELA (IV.6) - Dados Hidráulicos do Rio Piabanha obtidos pelas equipes de medições hidrométricas.

(*) - valores médios obtidos pela publicação do DNAEE.

AUTOR \ POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
PARKER	3,42	3,37		3,10		
GLOVER	102,20	99,40		91,00		
ELDER	1,23	1,25		1,08		
YOTSUKURA	2,42	2,46		2,13		
LIU	14,06	15,90		16,16		
MCQUIVER	1,07	1,36		1,12		
KRENKEL (1)	1,07	1,18		1,00		
KRENKEL (2)	1,50	1,68		1,46		
THACKSTON (1)	2,38	3,00		2,49		
THACKSTON (2)	1,47	1,62		1,37		
FISCHER	1,09	3,63		-		

TABELA (IV.7.1) - Coeficientes de dispersão estimados por fórmulas empíricas.

- 1º Experimento.

AUTOR \ POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
PARKER		3,10		2,30	3,39	3,88
GLOVER		91,00		56,35	100,80	123,00
ELDER		1,08		0,75	1,20	1,48
YOTSUKURA		2,13		1,48	2,36	2,91
LIU		16,16		11,75	18,22	31,36
MCQUIVER		1,12		1,27	1,31	0,93
KRENKEL (1)		1,00		0,83	1,11	1,21
KRENKEL (2)		1,46		1,25	1,56	1,62
THACKSTON (1)		2,49		2,56	2,68	2,35
THACKSTON (2)		1,37		1,10	1,52	1,65
FISCHER		-		1,49	2,16	1,99

TABELA (IV.7.2) - Coeficientes de dispersão estimados por fórmulas empíricas.

- 2º Experimento.

AUTOR \ POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
PARKER	3,10	2,77	4,78		3,10	
GLOVER	91,00	75,00	169,90		91,00	
ELDER	1,08	1,00	2,39		1,08	
YOTSUKURA	2,13	1,87	4,71		2,13	
LIU	16,16	9,86	25,94		16,16	
McQUIVER	1,12	1,06	0,78		1,12	
KRENKEL (1)	1,00	0,90	1,69		1,00	
KRENKEL (2)	1,46	1,33	2,26		1,46	
THACKSTON (1)	2,49	2,33	2,77		2,49	
THACKSTON (2)	1,37	1,23	2,31		1,37	
FISCHER	-	3,10	1,28		-	

TABELA (IV.7.3) - Coeficientes de dispersão estimados por fórmulas empíricas.

- 3º Experimento.

AUTOR \ POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
PARKER	3,10	2,50	5,68	1,61	2,15	3,92
GLOVER	91,00	63,60	219,60	33,25	51,70	126,00
ELDER	1,08	0,74	2,65	0,39	0,57	1,53
YOTSUKURA	2,13	1,46	5,22	0,76	1,13	3,02
LIU	16,16	12,99	31,74	11,71	10,77	30,37
McQUIVER	1,12	1,18	1,03	1,00	1,01	0,94
KRENKEL (1)	1,00	0,76	1,93	0,45	0,60	1,25
KRENKEL (2)	1,46	1,12	2,46	0,76	0,91	1,69
THACKSTON (1)	2,49	2,15	3,16	1,54	1,77	2,47
THACKSTON (2)	1,37	1,04	2,64	0,61	0,83	1,15
FISCHER	-	3,99	1,00	1,92	3,37	4,66

TABELA (IV.7.4) - Coeficientes de dispersão estimados por fórmulas empíricas.

- 4º Experimento.

Seção III.4.5.

Nas Tabelas IV.8.1, IV.8.2 e IV.8.3 podem ser vistos os parâmetros simplificados, relacionados com a dispersão, tais como: concentrações máximas, concentrações médias, tempos associados às concentrações máximas, centros de gravidade das curvas, velocidades médias de trânsito e vazões.

Por concentrações máximas entendem-se as correspondentes somente à amostra de concentração máxima do pico. Por concentrações médias entendem-se as obtidas através da média aritmética dos valores das concentrações das amostras.

As velocidades médias de trânsito foram obtidas dividindo-se o comprimento do trecho pelo tempo de viagem da nuvem traçadora (centro de gravidade), e as vazões calculadas pela razão entre a massa ou atividade injetada e a área total sobre a curva.

Inicialmente, os coeficientes de dispersão calculados pelo método dos ajustes das curvas experimentais, foi realizado com a variação de dois parâmetros, Dl e \bar{u} .

A Tabela IV.9 mostra, para o segundo experimento, os valores da velocidade média de trânsito, determinada pela razão entre a distância do posto de amostragem ao ponto de injeção e o tempo de trânsito da nuvem traçadora, e os valores de Dl e \bar{u} , obtidos pelo método dos ajustes com a variação dos dois parâmetros, bem como os valores de Dl calculados pelo método dos ajustes, fixando \bar{u} e variando somente Dl .

A concordância entre os valores das velocidades obtidas, permitiu que os ajustes fossem feitos a um só parâmetro (Dl), fornecendo maior rapidez nos resultados através de

EXP.	POSTO	CMAX (ppb)	CMED. (ppb)	TMAX (h)	C.G. (h)	VEL.MED. (m/s)	VAZÃO (m ³ /s)
1	1	16,24	2,18	1,43	1,49	0,41	8,80
	2	7,92	2,13	3,34	3,51	0,40	7,08
	3	5,05	1,98	6,00	6,13	0,34	7,23
	4	3,67	1,69	9,00	9,12	0,35	7,28 *
	5	2,75	1,26	12,75	13,20	0,35	7,66 *
	6	-	-	-	-	-	-
2	1	20,96	6,72	1,67	1,76	0,35	4,96
	2	10,00	4,55	3,92	4,13	0,34	4,98
	3	5,57	2,39	7,09	7,55	0,28	5,20 *
	4	4,02	1,97	11,00	11,44	0,28	5,64 *
	5	3,07	1,30	15,59	15,77	0,29	6,14
	6	2,52	0,88	18,34	18,76	0,28	6,61
3	1	26,25	8,46	1,83	2,03	0,30	3,42
	2	12,78	5,28	4,47	4,74	0,30	3,56
	3	6,83	3,72	8,55	8,97	0,23	3,90
	4	4,25	1,64	13,33	13,68	0,24	4,54
	5	2,92	1,19	18,00	18,62	0,25	5,74 *
	6	2,53	1,03	21,83	22,44	0,23	5,93
4	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	3,78	1,64	6,61	7,06	0,30	4,87
	4	2,57	1,13	10,66	10,84	0,30	5,66 *
	5	2,07	0,89	14,83	15,06	0,30	5,74 *
	6	1,77	0,80	17,75	18,07	0,29	5,81

TABELA (IV.8.1) - Parâmetros obtidos a partir da curva de concentração de Amidorodamina G extra x tempo.

* - Curva com valores extrapolados.

(-) - Não foram feitas medições.

C.G. - Centro de gravidade da curva.

EXP.	POSTO	CMAX (ppb)	CMED. (ppb)	TMAX (h)	C.G. (h)	VEL.MED. (m/s)	VAZÃO (m ³ /s)
1	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-
2	1	15,46	4,80	1,67	1,76	0,35	4,09
	2	5,89	2,56	3,92	4,13	0,34	4,97
	3	3,36	1,43	7,09	7,54	0,28	5,11 *
	4	2,55	1,21	11,09	11,43	0,28	5,36 *
	5	1,93	0,76	15,59	15,76	0,29	6,18
	6	1,40	0,49	18,34	18,73	0,28	7,08
3	1	16,67	5,54	1,83	2,03	0,30	2,93
	2	7,00	2,74	4,42	4,71	0,30	3,99
	3	3,33	1,82	8,50	8,95	0,23	4,65
	4	2,00	0,77	13,18	13,65	0,24	5,69
	5	1,56	0,60	18,00	18,53	0,25	6,93 *
	6	1,22	0,50	21,83	22,46	0,23	7,33
4	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	3,83	1,69	6,61	7,07	0,30	4,69
	4	2,75	0,96	10,49	10,86	0,30	5,45 *
	5	2,10	0,90	14,83	15,14	0,30	5,49 *
	6	1,83	0,83	17,83	18,13	0,29	5,51

TABELA (IV.8.2) - Parâmetros obtidos a partir da curva de concentração de Uranina x tempo.

* - Curva com valores extrapolados.

(-) - Não foram feitas medições.

C.G - Centro de gravidade da curva.

EXP.	POSTO	CMAX ($\mu\text{Ci}/\text{m}$)	CMED. ($\mu\text{Ci}/\text{m}$)	TMAX (h)	C.G. (h)	VEL.MED. (m/s)	VAZÃO (m^3/s)
1	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-
2	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-
3	1	148,74	42,75	1,85	2,30,	0,30	2,95
	2	59,27	23,83	4,52	4,76	0,30	3,81
	3	35,62	19,43	8,42	8,87	0,23	3,86
	4	20,05	7,76	13,33	13,64	0,24	5,08
	5	14,15	9,63	18,19	18,65	0,25	5,65 *
	6	11,28	4,83	21,50	22,38	0,23	6,23
4	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	37,25	14,24	10,50	7,13	0,30	4,45
	4	29,97	10,15	10,50	10,74	0,30	4,60 *
	5	22,72	10,52	14,40	15,04	0,30	4,79 *
	6	15,56	6,77	17,83	18,31	0,28	5,65

TABELA (IV.8.3) - Parâmetros obtidos a partir da curva de concentração de Bromo - 82 x tempo.

* - Curva com valores extrapolados.

(-) - Não foram feitas medições.

C.G.- Centro de gravidade da curva.

	PARAMETRO/POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
AMIDO.	U1	0,35	0,34	0,28	0,28	0,29	0,28
	U2	0,36	0,35	0,28	0,28	0,29	0,28
	D11	4,78	7,10	11,75	14,01	18,53	21,93
	D12	4,85	7,16	11,95	14,67	19,61	23,31
URANINA	U1	0,35	0,34	0,28	0,28	0,29	0,28
	U2	0,36	0,35	0,28	0,28	0,29	0,28
	D11	3,49	6,95	11,47	13,09	19,97	23,39
	D12	4,37	7,16	11,71	13,76	19,39	23,21

TABELA (IV.9) - Comparação entre os valores de Dl e \bar{u} obtidos com o método dos ajustes.

2º Experimento.

U1 - Velocidade média de trânsito obtida pela razão entre a distância do ponto de injeção ao posto de coleta (m/s).

U2 - Velocidade média de trânsito obtida pelo método dos ajustes com a variação de dois parâmetros (m/s).

D11 - Coeficiente de dispersão obtido pelo método dos ajustes com a variação de dois parâmetros (m^2/s).

DL2 - Coeficiente de dispersão obtido pelo método dos ajustes com a variação de um parâmetro (m^2/s).

processos de cálculos mais simplificados.

As Tabelas IV.10.1 (1º experimento), IV.10.2 (2º experimento), IV.10.3 (3º experimento) e IV.10.4 (4º experimento), apresentam os coeficientes de dispersão calculados experimentalmente para cada traçador utilizado nos experimentos de campo.

Todos os métodos aplicados e os cálculos realizados foram programados para microcomputadores, visando ganho de tempo e maiores facilidades no processamento dos dados, assim como para se obter melhor segurança nos resultados obtidos.

AUTOR	TRAC. /POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
TAYLOR	AMIDO.	3,08	7,68	7,95	10,04	11,32	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
PARKER	AMIDO.	7,73	11,16	10,77	11,87	14,36	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
LEVENSPIEL	AMIDO.	7,49	10,91	10,60	11,73	14,22	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
AJUSTES	AMIDO.	6,53	10,97	14,62	23,98	28,60	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
FISCHER	AMIDO.	13,07	7,30	14,33	18,99	-	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
KRENKEL	AMIDO.	5,32	8,74	12,23	14,49	-	-
	URANI.	-	-	-	-	-	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-

TABELA (IV.10.1) - Valores dos coeficientes de dispersão calculados por métodos experimentais (m^2/s).
- 1º Experimento.

AUTOR	TRAC. /POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
TAYLOR	AMIDO.	3,74	6,25	7,56	7,96	9,30	10,14
	URANI.	3,43	6,12	7,31	7,40	8,11	9,62
	BROMO	-	-	-	-	-	-
PARKER	AMIDO.	7,26	9,07	10,08	10,21	11,75	11,18
	URANI.	7,74	9,13	10,36	10,54	11,51	11,14
	BROMO	-	-	-	-	-	-
LEVENSPIEL	AMIDO.	7,01	8,89	9,98	10,08	11,64	11,08
	URANI.	7,45	9,04	9,65	10,50	11,39	11,04
	BROMO	-	-	-	-	-	-
AJUSTES	AMIDO.	4,85	7,16	11,95	14,67	19,61	23,31
	URANI.	4,37	7,16	11,71	13,76	19,39	23,21
	BROMO	-	-	-	-	-	-
FISCHER	AMIDO.	10,26	7,27	10,40	16,38	7,61	-
	URANI.	10,03	7,49	10,85	14,37	8,14	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-
KRENKEL	AMIDO.	2,88	4,70	9,63	11,23	8,93	-
	URANI.	1,68	4,70	9,84	9,21	8,30	-
	BROMO	-	-	-	-	-	-

TABELA (IV.10.2) - Valores dos coeficientes de dispersão calculados por métodos experimentais (m^2/s).
- 2º Experimento.

AUTOR	TRAC./POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
TAYLOR	AMIDO.	3,14	5,90	5,33	6,62	7,44	6,50
	URANI.	3,03	5,44	5,56	6,22	6,15	6,53
	BROMO	3,57	6,40	5,81	6,89	6,97	8,40
PARKER	AMIDO.	5,42	9,82	7,89	8,71	9,48	8,36
	URANI.	5,32	9,24	7,56	8,28	8,56	8,64
	BROMO	5,28	9,41	6,37	7,93	8,30	9,95
LEVENSPIEL	AMIDO.	5,25	9,44	7,45	8,60	9,90	8,42
	URANI.	5,16	9,05	5,93	7,56	8,09	9,64
	BROMO	5,13	9,05	5,93	7,56	8,09	9,64
AJUSTES	AMIDO.	4,09	4,67	8,54	11,14	22,09	26,48
	URANI.	3,50	4,81	9,92	13,94	22,20	28,22
	BROMO	-	-	-	-	-	-
FISCHER	AMIDO.	12,82	5,07	10,03	11,84	6,96	
	URANI.	12,06	5,14	9,13	12,47	6,46	
	BROMO	11,47	5,43	9,06	12,47	6,05	
KRENKEL	AMIDO.	1,74	2,61	4,16	10,78	13,20	
	URANI.	1,37	2,84	5,67	12,71	10,32	
	BROMO	-	-	-	-	-	

TABELA (IV.10.3) - Valores dos coeficientes de dispersão calculados por métodos experimentais (m^2/s).

- 3º Experimento.

AUTOR	TRAC./POSTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6
TAYLOR	AMIDO.	-	-	7,36	8,26	9,18	9,37
	URANI.	-	-	7,47	7,58	11,36	9,55
	BROMO	-	-	7,17	7,90	8,59	9,73
PARKER	AMIDO.	-	-	10,21	10,43	10,48	10,52
	URANI.	-	-	10,47	10,87	10,93	11,15
	BROMO	-	-	10,40	9,72	10,59	12,44
LEVENSPIEL	AMIDO.	-	-	10,03	10,31	10,33	10,44
	URANI.	-	-	10,27	10,74	10,92	11,06
	BROMO	-	-	10,52	9,30	10,50	12,33
AJUSTES	AMIDO.	-	-	9,39	13,00	17,24	17,91
	URANI.	-	-	9,86	11,45	14,77	16,65
	BROMO	-	-	-	-	-	-
FISCHER	AMIDO.	-	-	10,84	10,30	8,35	
	URANI.	-	-	11,48	10,46	9,03	
	BROMO	-	-	8,00	13,77	12,02	
KRENKEL	AMIDO.	-	-	7,31	11,27	9,35	
	URANI.	-	-	7,71	9,67	10,32	
	BROMO	-	-	-	-	-	

TABELA (IV.10.4) - Valores dos coeficientes de dispersão calculados por métodos experimentais (m^2/s).

- 4º Experimento.

CAPITULO VANALISE DOS RESULTADOS

A confirmação do atingimento da DBM pode ser obtida com o auxílio do cálculo da vazão, por meio da expressão:

$$Q = \frac{M}{\int c(t) dt} \quad 5.01$$

Para uma dada massa (ou atividade) injetada, a partir da DBM, as áreas sob as curvas de concentração versus tempo em diferentes pontos de uma mesma seção transversal, devem ser iguais. Assim, as vazões calculadas com a expressão (5.01), também serão iguais.

Observando a Tabela V.1, onde estão apresentados os valores das vazões, calculadas a partir da expressão (5.01), nos sub-postos Pl.1 e Pl.2, para o 2º e 3º experimentos, pode-se notar que os valores são bem próximos. As variações, entre os sub-postos citados é em torno de 5% variações estas decorrentes da precisão dos resultados e da metodologia de cálculo. Isto parece indicar que a DBM foi atingida antes do posto Pl.

VAZOES				
EXP.	POSTO	AMIDO.	URANI.	BROMO
2	1.1	4,96	4,09	-
	1.2	4,09	3,85	-
3	1.1	3,42	2,93	2,95
	1.2	3,51	3,10	3,12

TABELA (V.1) - Dados de vazões nos sub-postos Pl.1 e Pl.2.

De acordo com os resultados obtidos para a estimativa da DBM, apresentados na Tabela IV.4, observa-se que utilizando-se as equações (3.01), (3.02) e (3.04), o valor da DBM é superestimado. Já com relação à equação (3.03), o valor estimado para a DBM, parece ser muito pequeno, mas não se pode afirmar com precisão, pois não foram feitas coletas à montante do posto P1 (localizado a 2200 m em relação ao ponto de injeção).

As análises das amostras dos traçadores fluorescentes através do método de "Varredura Síncrona" foram simples e rápidas, permitindo a medição dos dois traçadores simultaneamente e fornecendo leituras líquidas, isto é, sem o valor do "BKG".

A utilização da Uranina para marcar águas superficiais, está sujeita a restrições devido à possibilidade do seu fotodecaimento. Entretanto, as condições de alta turbidez no Rio Piabanha, forneceram uma oportunidade de tentar avaliar o seu comportamento nestas condições, e observar suas consequências sob as medidas efetuadas.

Com relação aos parâmetros de transporte (velocidade média e tempo médio de trânsito da nuvem traçadora), observou-se que, como era esperado, estes parâmetros não sofreram variações, quando calculados com os diferentes traçadores. Na Tabela V.2.1 podem ser vistos os valores das velocidades médias de trânsito e na Tabela V.2.2 os valores das vazões calculadas a partir da expressão (5.01), para todos os experimentos e para cada traçador separadamente.

Analisando as Tabelas IV.10.1, IV.10.2, IV.10.3, IV.10.4 e V.2.2, observa-se que, apesar da literatura indicar a Uranina como sendo um traçador não conservativo (não

VELOCIDADES MÉDIAS DE TRANSITO				
EXP.	POSTO	AMIDO.	URANI.	BROMO
2	1	0,35	0,35	-
	2	0,34	0,34	-
	3	0,28	0,28	-
	4	0,28	0,28	-
	5	0,29	0,29	-
	6	0,28	0,28	-
3	1	0,30	0,30	0,30
	2	0,30	0,30	0,30
	3	0,23	0,23	0,23
	4	0,24	0,24	0,24
	5	0,25	0,25	0,25
	6	0,23	0,23	0,23
4	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	0,30	0,30	0,30
	4	0,30	0,30	0,30
	5	0,30	0,30	0,30
	6	0,29	0,29	0,28

TABELA (V.2.1) - Dados de velocidades média de trânsito (m/s).

VAZÕES				
EXP.	POSTO	AMIDO.	URANI.	BROMO
2	1	4,96	4,09	-
	2	4,98	4,97	-
	3	5,20	5,11	-
	4	5,64	5,36	-
	5	6,14	6,18	-
	6	6,61	7,08	-
3	1	3,42	2,93	2,95
	2	3,56	3,99	3,81
	3	3,90	4,65	3,86
	4	4,54	5,69	5,08
	5	5,74	6,93	5,65
	6	5,93	7,33	6,23
4	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	4,87	4,69	4,45
	4	5,66	5,45	4,60
	5	5,74	5,49	4,79
	6	5,81	5,51	5,65

TABELA (V.2.2) - Dados de vazões obtidas pelas curvas de concentração versus tempo (m^3/s).

recomendável para trabalhos em águas superficiais), sua perda foi relativamente pequena para o cálculo das vazões (em torno de 11%, em relação aos outros dois traçadores), mas tal perda não afetou significativamente no cálculo do coeficiente de dispersão. As pequenas variações ocorridas nos valores de D_1 , entre os traçadores, podem ser devidas a erros experimentais.

Estas observações podem ser justificadas pelo fato do Rio Piabanha ser um rio bastante poluído, com águas bastante turvas, que poderiam ter agido como uma espécie de "filtro" contra raios solares sobre a Uranina, diminuindo seu fotodecaimento.

Os valores dos coeficientes de dispersão estimados a partir das fórmulas empíricas, apresentados nas Tabelas IV.7.1, IV.7.2, IV.7.3 e IV.7.4, forneceram resultados bem divergentes entre si e em relação aos valores obtidos experimentalmente. Estas variações podem ser devidas a vários fatores a saber :

- . estas fórmulas foram derivadas a partir da Teoria de TAYLOR (desenvolvida para tubulações) e posteriormente adaptadas para canais abertos e escoamentos naturais;
- . entre as fórmulas mais simples para as estimativas de D_1 , os diferentes valores das constantes foram obtidos para condições específicas com características de escoamento diferentes;
- . com exceção da fórmula de FISCHER, o número de parâmetros considerados é muito pequeno (raio hidráulico, profundidade, velocidade média da seção e velocidade de fricção), não fornecendo uma definição exata das características hidrodinâmicas do escoamento;
- . mesmo no caso da fórmula de FISCHER (julgada a mais

adequada pela literatura pois considera a variação lateral da velocidade, entre outros parâmetros), as variações ocorridas podem ser causadas pelo fato desta fórmula calcular o valor de Dl numa determinada seção transversal do rio. Como o Rio Piabanha apresenta trechos com características bem variáveis, medições localizadas podem diferir significativamente do valor médio calculado no trecho.

Com relação aos valores dos coeficientes de dispersão determinados experimentalmente a partir das curvas de concentração versus tempo, pode-se observar que:

- . as variações apresentadas nos métodos de TAYLOR e KRENKEL podem ser devidas ao pequeno número de pontos utilizados em suas aplicações. Taylor utiliza somente dois pontos (instantes em que as concentrações são maiores do que a metade da concentração máxima). KRENKEL, apesar de utilizar duas curvas consecutivas, leva em consideração somente a concentração máxima de cada curva;
- . dos métodos experimentais utilizados, que levam em consideração todos os pontos da curva de concentração versus tempo, os métodos de PARKER e LEVENSPIEL determinam o valor médio do coeficiente de dispersão entre o ponto de injeção e um dado posto de amostragem, enquanto que o método de FISCHER determina o valor médio do coeficiente de dispersão entre dois postos de amostragem consecutivos;
- . todos os métodos apresentaram resultados coerentes levando em consideração as próprias características hidrodinâmicas do Rio Piabanha que apresenta trechos

mistos, com seções encachoeiradas e seções de escoamento tranquilos;

. com relação ao método dos ajustes das curvas experimentais, as variações são devidas ao fato de que, além dos possíveis erros experimentais, o modelo teórico, que segue a teoria de TAYLOR, equação (2.09), descreve a curva como sendo uma curva normal (simétrica) mas na realidade as curvas são assimétricas (como pode ser visto em todas as curvas de concentração versus tempo). Observando as Figuras (V.1), (V.2), (V.3), (V.4), (V.5) e (V.6) as maiores discrepâncias ocorrem a partir dos postos P4, P5 e P6, quando a assimetria é maior.

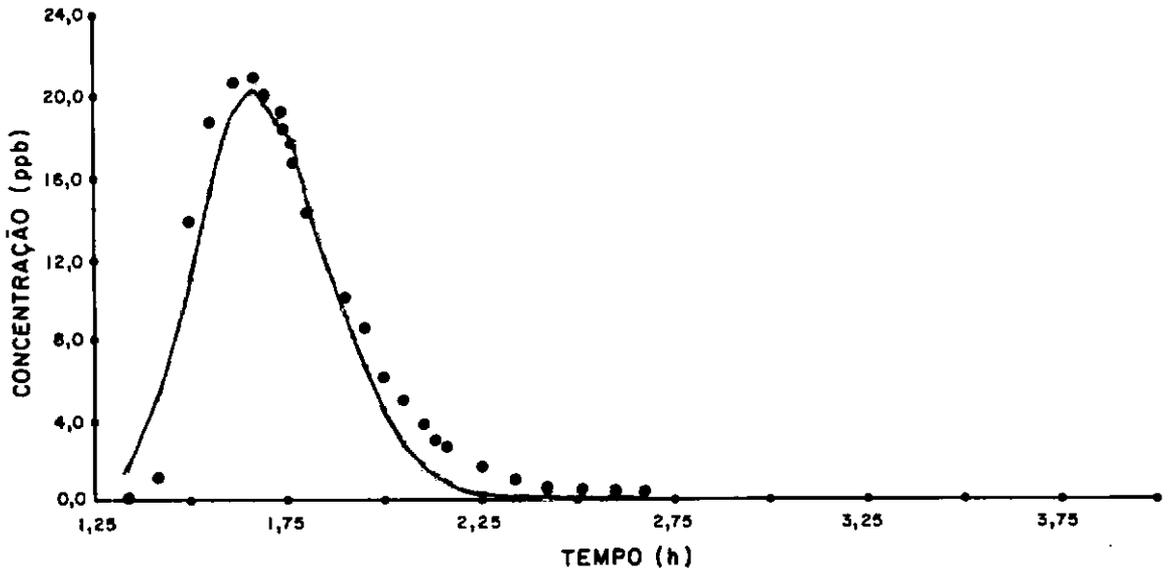


FIG. (V.1.1) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
2º EXPERIMENTO - POSTO 1.1

● - Valores experimentais
— - Valores ajustados

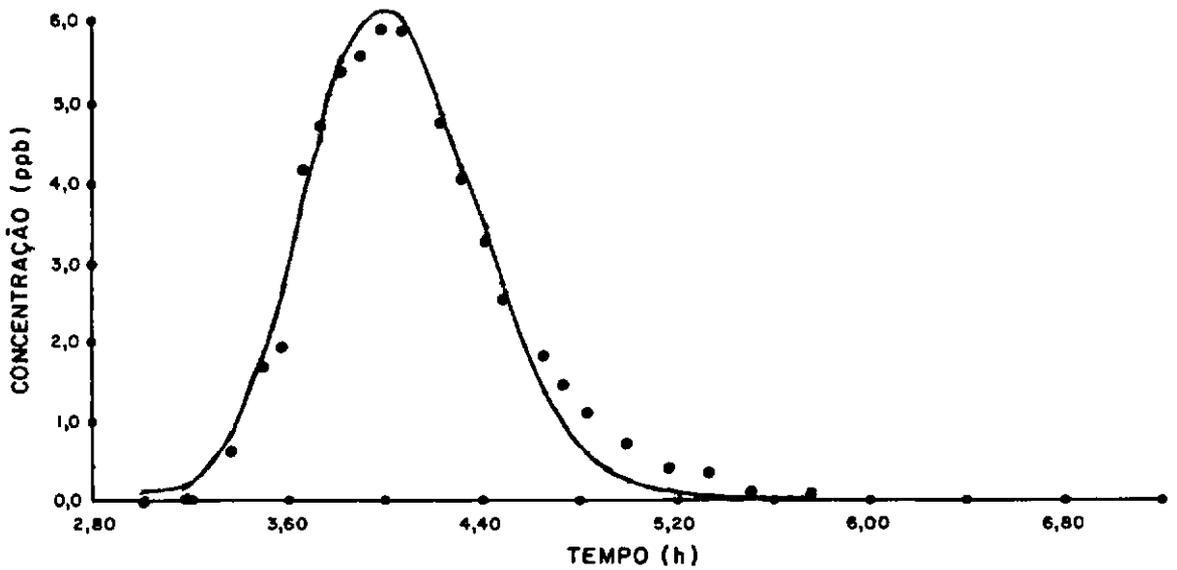


FIG. (V.1.2) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
2º EXPERIMENTO - POSTO 2.1

● - Valores experimentais
— - Valores ajustados

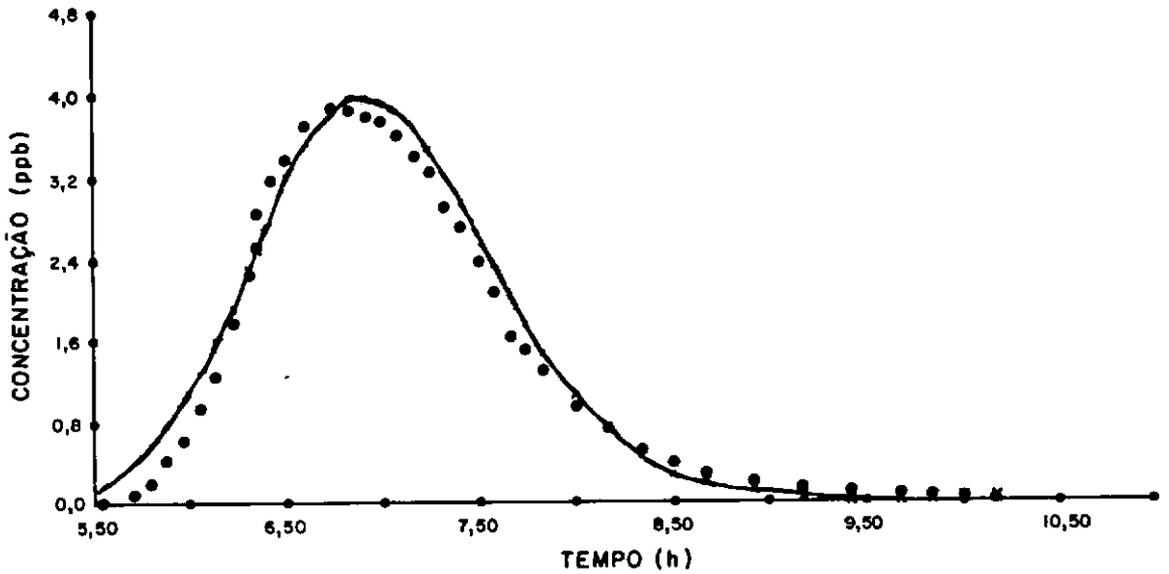


FIG. (V.1.3) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
4º EXPERIMENTO - POSTO 3.1

● - Valores experimentais
— - Valores ajustados

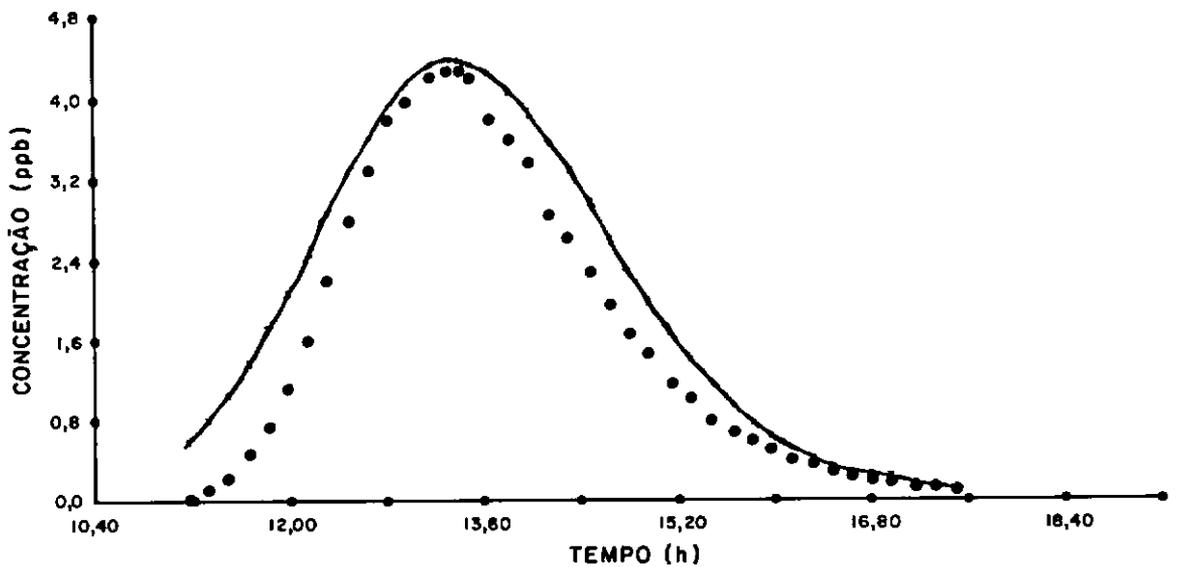


FIG. (V.1.4) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO - POSTO 4

● - Valores experimentais
— - Valores ajustados

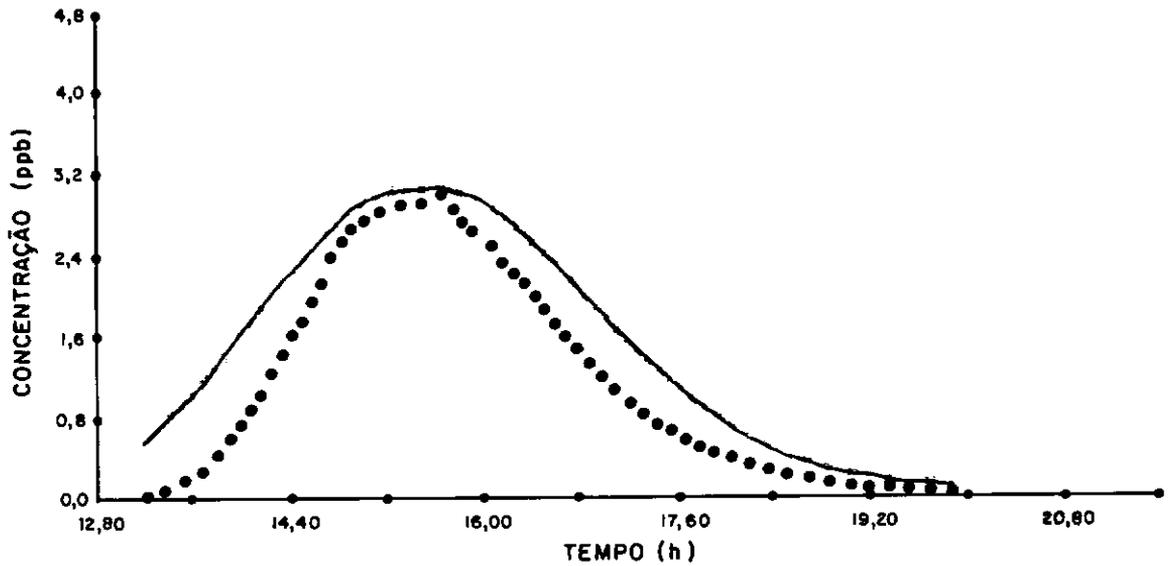


FIG. (V.1.5) - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
2º EXPERIMENTO - POSTO 5

● - Valores experimentais
— - Valores ajustados

CAPITULO VICONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A determinação experimental do coeficiente de dispersão, D_l , em rios, utilizando a técnica de traçadores fluorescentes, com a aplicação do "Método de Varredura Síncrona", foi testada pela primeira vez no Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ, apresentando grande facilidade nas análises das amostras, principalmente quando é utilizado mais de um traçador, como foi o caso deste trabalho.

A utilização do traçador radioativo Bromo-82 e do traçador fluorescente Amidorodamina G extra, traçadores bem conhecidos e considerados conservativos, foi uma vez mais testada e apresentando excelentes resultados.

A possibilidade da utilização do traçador fluorescente Uranina, como um traçador apto a ser na determinação experimental do coeficiente de dispersão, em substituição aos traçador radioativo Bromo-82 ou ao fluorescente Amidorodamina G extra, foi testada e apresentou resultados excelentes. A realização de um maior número de experiências permitirá melhor quantificar a influência do fotodecaimento da Uranina em águas superficiais, para a determinação de D_l .

Os traçadores fluorescentes mostraram-se mais adequados para emprego neste tipo de experiência devido às menores dificuldades logísticas, organizacionais, de segurança e custo.

A aplicação de diversas fórmulas empíricas existentes na literatura que permitem estimar o valor de D_1 , em função de parâmetros hidráulicos, de fácil obtenção, forneceram resultados pouco confiáveis em relação aos métodos experimentais. Um estudo mais detalhado levando em consideração os parâmetros hidráulicos médios do Rio Piabanha poderá fornecer um valor para a constante que melhor se adapte às suas características.

Entre os métodos experimentais o método de FISCHER parece ser o mais adequado pois determina o valor do coeficiente de dispersão médio entre duas seções, utilizando nos cálculos maior número de dados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) OLIVEIRA, W.E., Técnica de Abastecimento e Tratamento de Agua, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, vol. 1, 2 Edição, São Paulo, (1976).
- (2) RAUDKIVI, A. J., Advanced Fluid Mechanics : An Introduction, London, Ed. Arnold, (1975).
- (3) FISCHER, H.B., "Dispersion Predictions in Natural Streams", J. of the Sanitary Engineering Division, nº SA5, pp. 927-943, (1968).
- (4) TAYLOR, G., "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe", Proc. Roy. Soc. of London, Serie A223, pp. 446-468, (1954).
- (5) PARKER, F.L., "Eddy Diffusion of Matter in Reservoirs and Pipelines", J. of the Hydraulics Division, nº HY3, pp. 151-171, (1963).
- (6) GLOVER, R. E., "Dispersion of Dissolved or Suspended Materials in Flowing Streams", U. S. Geolog. Survey Prof. Paper, nº 433 B, (1964).
- (7) ELDER, J. W., "The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow", J. of the Fluid Mechanics, Vol. 5, pp. 544-560, (1959).
- (8) YOTSUKURA, N. B., "Numerical Solution in Natural Streams", J. of the Sanitary Engineering Division, Vol. SA5, pp. 83-104, (1968).
- (9) FISCHER, H. B., "Methods for Prediction Dispersion Coefficients in Natural Streams, with Applications to Lower Reaches of Greem and Duwamish Rivers Washington", U. S. Geolog. Survey. Prof. Paper, nº 582 A, (1968).

- (10) FISCHER, H. B., "The Mechanics of Dispersion in Natural Streams", J. of the Hydraulics Division, n° HY6, pp. 187-215, (1967)
- (11) LIU, H., "Predicting Dispersion Coefficient of Streams", J. of the Env. Engineering Division, n° EEL, pp. 59-69, (1977).
- (12) McQUIVER, R. S. and KEEFER, T. N., "Convective Model of Longitudinal Dispersion", J. of the Hydraulics Division, n° HY10, pp. 1410-1423, (1976).
- (13) KRENKEL, P.A. and THACKSTON, E. L., "Longitudinal Mixing in Natural Streams", J. of the Sanitary Engineering Division, n° SA5, pp. 67-90, (1967).
- (14) MORRIS, J. S., KRENKEL, P. A. and THACKSTON, E. L., "Investigations on Turbulent Diffusion in Inland Waterways", Theoretical Report, n° 14, Departmente of Sanitary and Water Resources Engineering, (1967).
- (15) LEVENSPIEL, O. and SMITH, W.K., "Notes on the Diffusion-Type Model for the Longitudinal Mixing of Fluids in Flow", Chemical Engineering Science, Vol. 6, pp. 227-233, (1957).
- (16) THACKSTON, E. L., HAYS, J. R. and KRENKEL, P. A., "Least Squares Estimation of Mixing Coefficients", J. of the Sanitary Engineering Division, Vol. SA3, pp. 47-58, (1967).
- (17) PLATA, A., Isotopes in Hydrologia, Editorial Alhambra S.A. (1972).
- (18) WILSON, J. F., "Fluorimetric Procedures for Dye Tracing", U. S. Dep. Geol. Survey, Book 3, Chapter A12, (1968).
- (19) AUGUSTO, M. C., Determinação da Vazão em Condutos Abertos

e Forçados, Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ, (1976).

- (20) WARD, P. R. B., "Prediction of Mixing Lengths for Rivers Flow Gaging", J. of the Hydraulics Division, n° HY7, pp. 1069-1081, (1973).
- (21) YOTSUKURA, N. and KILPATRICK, F. A., "Tracers Simulations of Soluble Waste Concentration", J. of the Env. Engineering Division, n° EE4, (1973).
- (22) KILPATRYCK, F. A., MARTENS, L. A. and WILSON, J. F., "Measurement of Time of Travel and Dispersion by Dye Tracing", U. S. Dep. Int. Geol. Survey, Book 3, Chapter A9, (1975).
- (23) CNEN - Normas Básicas de Proteção Radiológica, D.O., n° 180 Seção I, Parte II, (1973).
- (24) VENDRAME, I. F., Determinação Experimental do Coeficiente de Reaeração, em Rios e Canais Abertos, com o Emprego de Traçadores, Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ, (1982).
- (25) HULL, D. E., "Dispersion and Persistence of Tracer in River Flow Measurement", Int. J. of Appl. Rad. and Isotopes, Vol. 13, pp. 63-73, (1962).
- (26) DNAEE - Inventário das Estações Fluviométricas, Ministério das Minas e Energia, (1983).
- (27) ROLDÃO, J. S. F., Uso de traçadores Fluorescentes Associados a Estudos em Fundações e Maciços de Terra de Barragens : Uma Nova Visão, XVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte, (1985).
- (28) GARDNER, R. P. and DUNN III, W. J., Rádioisotope Measurement, Applications in Engineering, New York, Reinhold, (1967).
- (29) CARVALHO, M. A. G., Estudo dos Métodos de Determinação do

Coeficiente de Dispersão em Rios, Tese de Mestrado,
CDTN - UFMG., (1982).

- (30) BEHRENS, H., "Eine Verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fließwegen im Grundwasser", Z. Deutsch.Geol.Ges., Vol. 124, pp. 535-544, (1973).

A P E N D I C E I



Rio de Janeiro, 24 de maio de 1985

Ilmo. Sr.

Dr. José de Julio Rozental

Diretor do DIN/CNEN

Rua General Severiano, 90

22290 - Rio de Janeiro - RJ.

Senhor Diretor,

Através desta solicitamos ao DIN/CNEN a devida permissão para que possamos realizar no rio Piabanha (RJ), uma série de 3 (três) experiências com o emprego do isótopo Br-82 ($T_{1/2} = 36h$) como traçador.

Estas experiências fazem parte de um projeto de pesquisa, desenvolvido pelo Laboratório de Traçadores do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, FEEMA e a CNEN e tem por objetivo determinar o coeficiente de dispersão do rio Piabanha no trecho entre Pedro do Rio e Areal, em diversas condições de escoamento.

A fim de se utilizar a melhor capacidade de diluição, de reaeração e autodepuração natural dos corpos receptores, as características hidrodinâmicas de diluição e de misturamento de determinados trechos de rios são de fundamental importância. Para tal, se faz necessária a determinação experimental do coeficiente de dispersão.

Um pré-dimensionamento partindo de resultados obtidos em um teste prévio (12/84), em que utilizamos somente traçadores fluorescentes (Amido Rodamina G extra e Uranina) mostrou que a atividade a ser injetada será igual a 500 m Ci. Este valor foi obtido a partir da determinação de um "volume virtual de diluição" ($V_5^* = 59,760m^3$) calculado na seção de medição mais a fusante ($L_5 = 16.400$) através da relação entre a massa de traçador fluorescente injetada ($M = 164g$) e a concentração aí medida ($C_5 = 2.74 mg/m^3$).

Fixando-se a taxa de contagem nesta seção como sendo 10 vezes a taxa de contagem do "background" local ($R_5 = 10 R_{BKG} = 300 cps$) e tendo em conta

a sensibilidade da sonda de cintilação SPP-3 com cristal de Iha I (T_c) de $1" \times 1^{1/2}"$ ($S = 2000 \text{ cpm m}^3 / \mu\text{Ci}$), obtivemos a concentração de traçador radioativo na referida seção como sendo $C_5 = 9 \mu\text{Ci/m}^3$.

Extendendo o mesmo critério às outras seções onde foram anteriormente medidas as concentrações, $C_1 = 16,24 \text{ mg/m}^3$, $C_2 = 8,13 \text{ mg/m}^3$, $C_3 = 5,37 \text{ mg/m}^3$ e $C_4 = 3,67 \text{ mg/m}^3$; foi possível prever as concentrações radioativas: $C_1 = 53,3 \mu\text{Ci/m}^3$, $C_2 = 26,7 \mu\text{Ci/m}^3$, $C_3 = 17,6 \mu\text{Ci/m}^3$ e $C_4 = 12 \mu\text{Ci/m}^3$.

Plotando estas concentrações em relação às distâncias respectivas, a saber: $L_1 = 2.200\text{m}$, $L_2 = 5.000\text{m}$, $L_3 = 7.500\text{m}$ e $L_4 = 11.600\text{m}$, obtivemos o gráfico apresentado em anexo.

Extrapolando a reta obtida e considerando-se o valor $C = 300 \mu\text{Ci/m}^3$ como sendo a CMO = concentração máxima permissível em água potável, verificamos que este valor é atingido a 300 m do local de injeção. Observa-se, também, que a 100m, o pico instantâneo de concentração tem o valor de 2 vezes do valor da CMP.

Estes valores que já seriam plenamente aceitáveis em condições normais, tornam-se ainda mais seguros em se tratando do Rio Piabanha cujas águas encontram-se bastante poluídas não prestando ao consumo.

O planejamento dos trabalhos de campo foi realizado de modo a evitar eventuais superposições de efeitos e as 3 (tres) experiências estão planejadas para o ano de 1985 com intervalo mínimo de 3 (tres) semanas.

Os trabalhos relacionados com o manuseio, diluição e injeção do traçador radioativo estarão sob minha responsabilidade.

Declaro ter mais de 10 anos de experiências no manuseio de radiações ionizantes, tendo trabalhado durante longo tempo em aplicações hidrológicas de traçadores na COPPE/UFRJ, no IEN/CNEN e no Institut für Radiohydrometrie - GSF (Munique - RFA) tendo durante este tempo tomado parte em diversos cursos relacionados com proteção radiológica individual e ambiental.

Tenho autorização da CNEN para exercer este tipo de atividade (nº registro 103 497/70) e tenho publicado vários trabalhos concernentes com aplicações de traçadores radioativos em hidrologia de superfície e subterrânea.

Com o objetivo de garantir a observância estrita das normas de segurança, um equipamento especial de injeção instantânea foi projetado, construído e testado com sucesso pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ.

Atenciosamente,

CNEN/DIN-2/ 940 /85

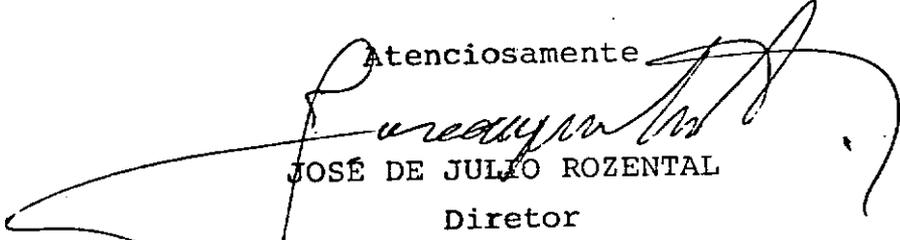
Em 13.6.85

À Direção da
COPPE/UFRJ
Coordenação dos Programas de
Pós-Graduação de Engenharia
Caixa Postal, 68501
Rio de Janeiro
20000

Prezados Senhores,

Em atenção a carta de ref. EC/RH-42/85, informamos estar autorizada a realização da série de 3 (três) experiências no rio Piabanha (trecho entre Pedro do Rio e Areal, no Estado do Rio de Janeiro), com o emprego do radioisótopo Br-82 como traçador, tendo por objetivo a determinação do coeficiente de dispersão do rio no trecho citado, em diversas condições de escoamento, sendo o responsável o Prof. JOÃO SÉRGIO F. ROLDÃO.

Atenciosamente



JOSE DE JULIO ROZENTAL

Diretor

Deptº de Instalações e Materiais Nucleares

OJSB/mac

1892

CONCENTRAÇÃO Br-82

($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$)

CMP

CONCENTRAÇÃO $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ de traçador radioativo
Br-82 com a distancia m - (injeção instan-
tânea)
- Rio Piabanha
- $Q = 10\text{m}^3/\text{s}$

CMP = concentração máxima
permissível em água
potável

100

2

4

5

7

10

1000

3

4

5

6

10⁴ DISTÂNCIA (m)

A P E N D I C E I I

Conc. = 1.0ppb Ampl x100 VERDE
 Conc. = 5.0ppb Ampl x 30 AZUL
 Conc. = 1.0ppb Ampl x 10 VERMELHO

URANINA
 AMIDORODAMINA
 G EXTRA

→ 5,0 ppb
 30
 → 1,0 ppb
 100
 → 1,0 ppb
 10



COPPE/UF RJ
 LAB. TRAÇADORES
 Medição de Amostra
 Através de Varredura
 Síncrona

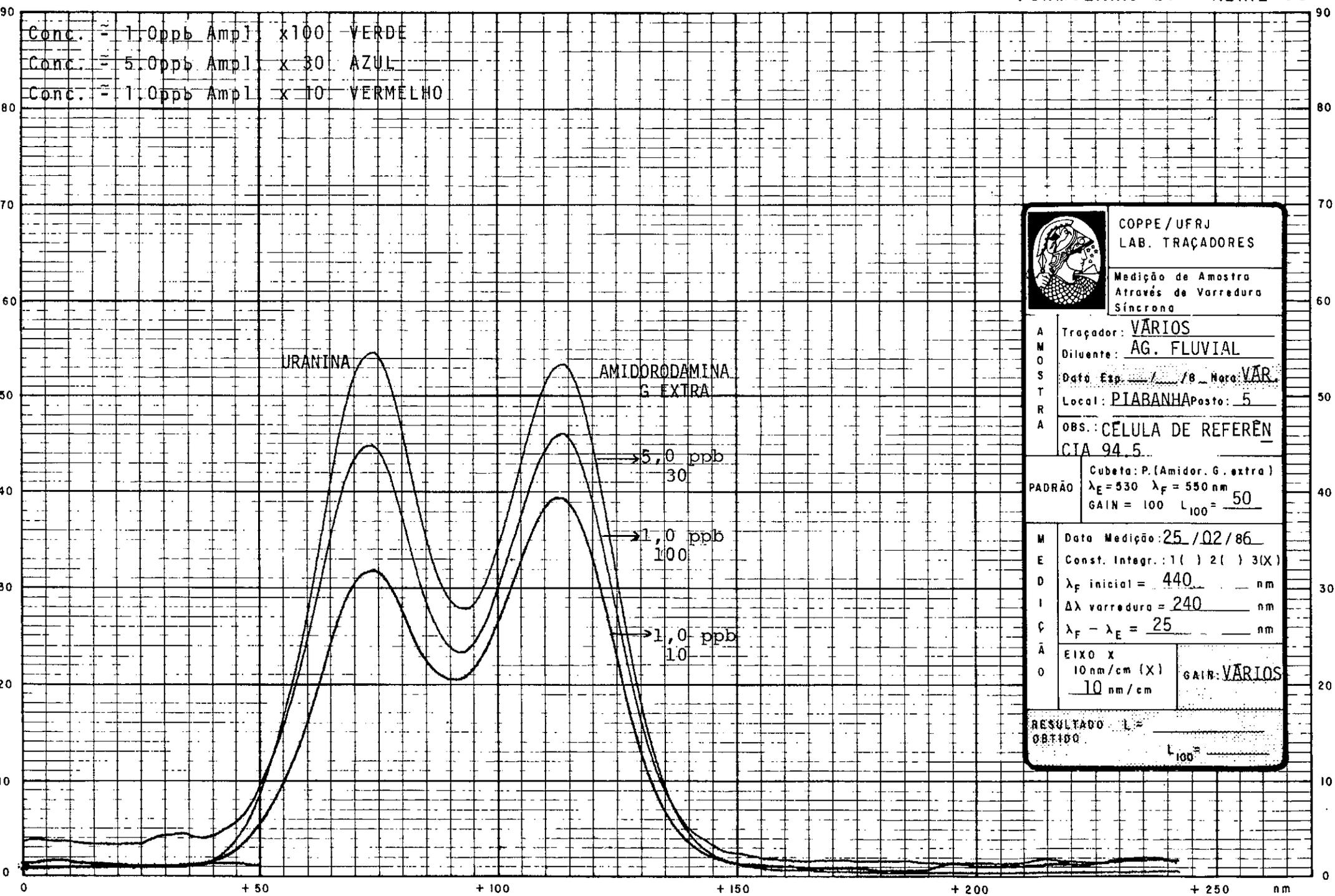
A
M
O
S
T
R
A
 Traçador: VÁRIOS
 Diluente: AG. FLUVIAL
 Data Esp. / / 86 Hora: VAR.
 Local: PIABANHA Posto: 5
 OBS.: CÉLULA DE REFERÊN
CIA 94.5

PADRÃO
 Cubeta: P. (Amidor. G. extra)
 $\lambda_E = 530$ $\lambda_F = 550$ nm
 GAIN = 100 $L_{100} =$ 50

M Data Medição: 25 / 02 / 86
 E Const. Integr.: 1 () 2 () 3 (X)
 D λ_F inicial = 440 nm
 I $\Delta\lambda$ varredura = 240 nm
 C $\lambda_F - \lambda_E =$ 25 nm

Ã
O
EIXO X
 10 nm/cm (X) GAIN: VÁRIOS
 10 nm/cm

RESULTADO $L =$
0,8150
 $L_{100} =$



A P E N D I C E I I I

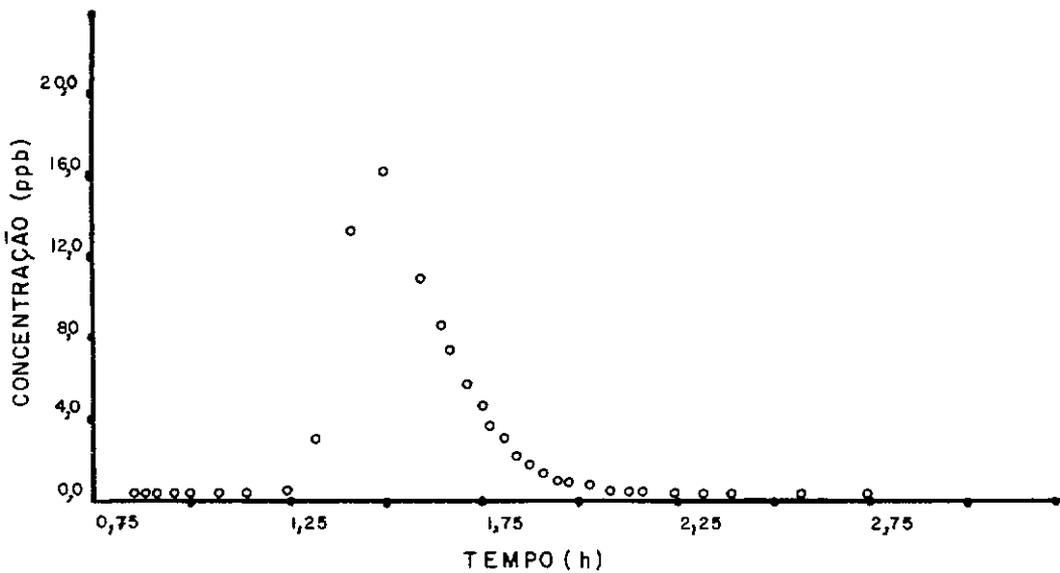


FIG.(C.1.1) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
1º EXPERIMENTO POSTO 1

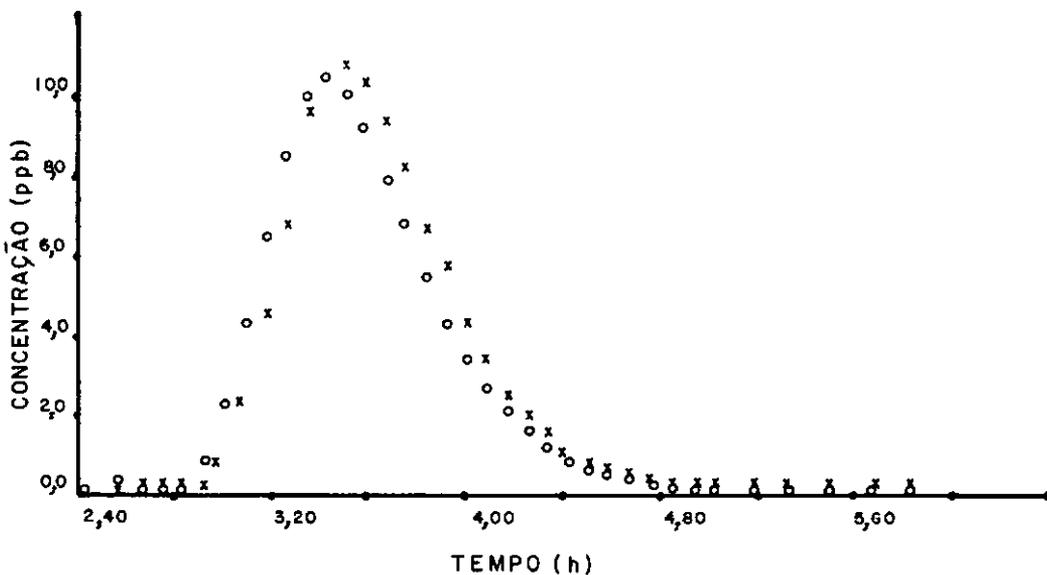


FIG.(C.1.2) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
1º EXPERIMENTO POSTO 2
o SUB-POSTO 2.1
x SUB-POSTO 2.2

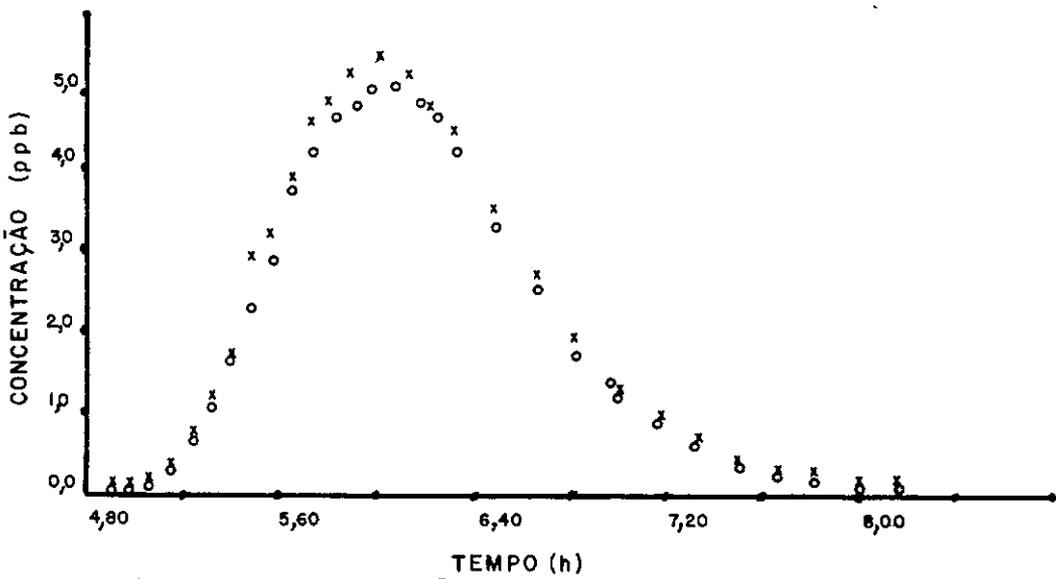


FIG.(C.1.3) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G μ x TEMPO
 1º EXPERIMENTO POSTO 3
 o SUB - POSTO 3.1
 x SUB - POSTO 3.2

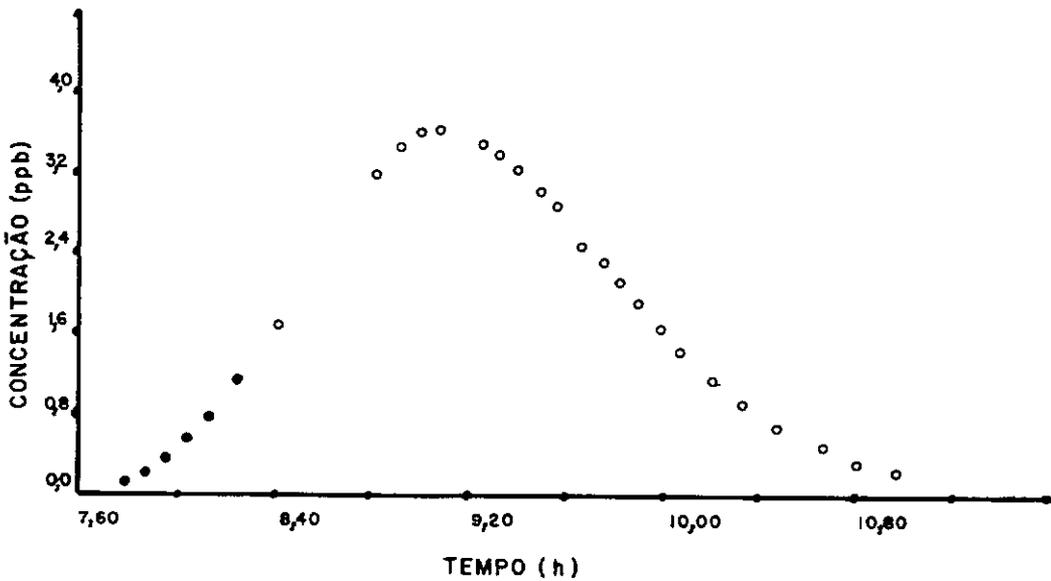


FIG.(C.1.4) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G μ x TEMPO
 1º EXPERIMENTO POSTO 4
 • PONTOS EXTRAPOLADOS

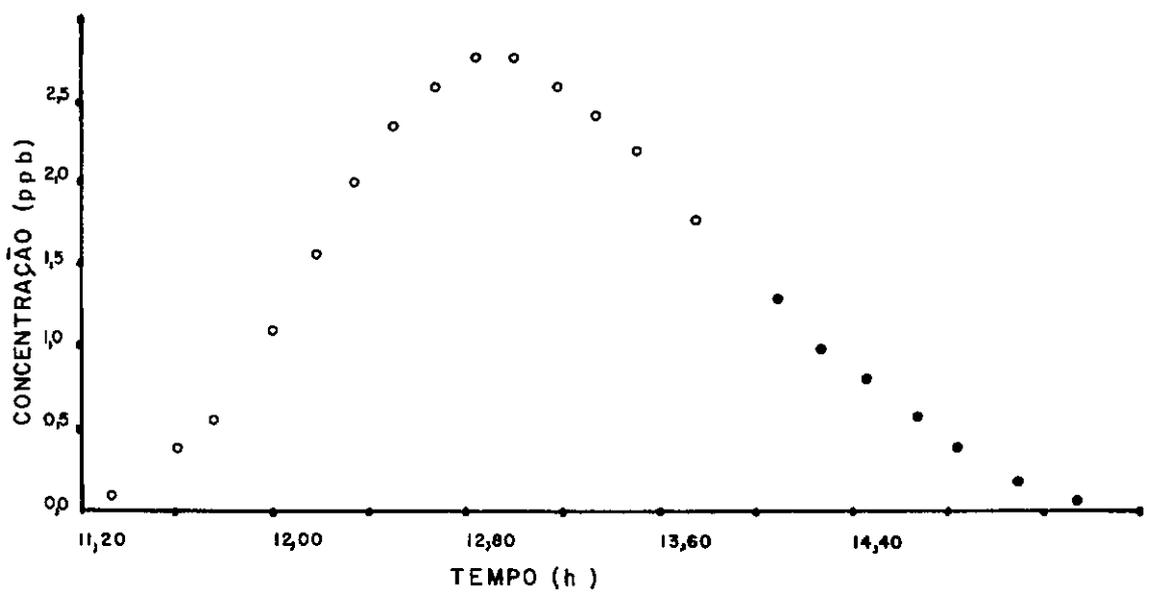


FIG.(C.1.5) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G x TEMPO
1º EXPERIMENTO POSTO 5
● PONTOS EXTRAPOLADOS

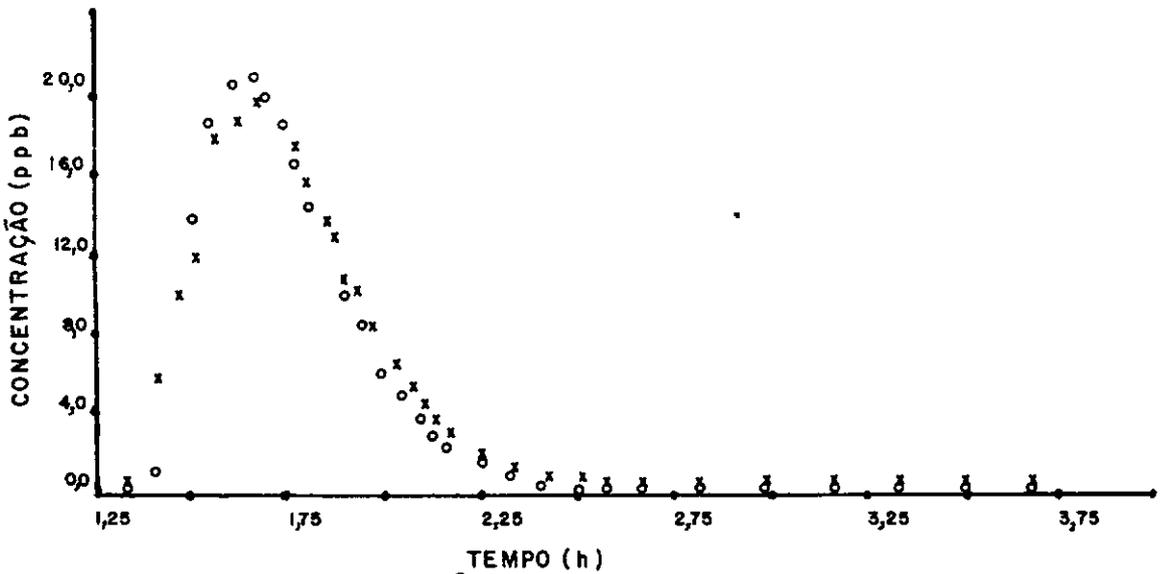


FIG. (C.2.1) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G • x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 1
 o SUB-POSTO 1.1
 x SUB-POSTO 1.2

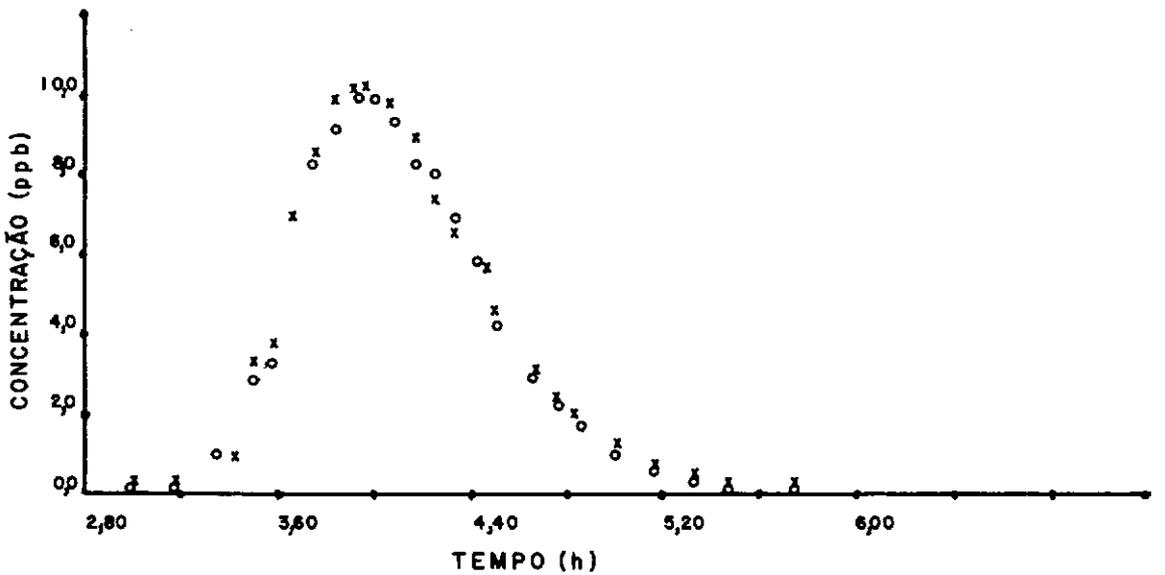


FIG. (C.2.2) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G • x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 2
 o SUB-POSTO 2.1
 x SUB-POSTO 2.2

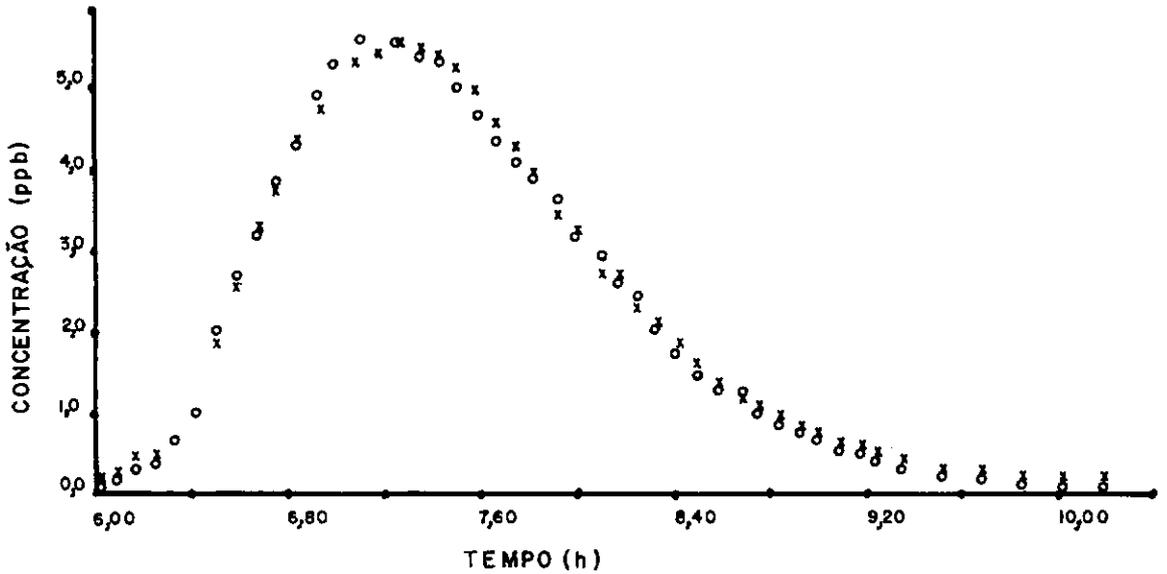


FIG.(C.2.3) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 3
 ○ SUB - POSTO 3.1
 x SUB - POSTO 3.2

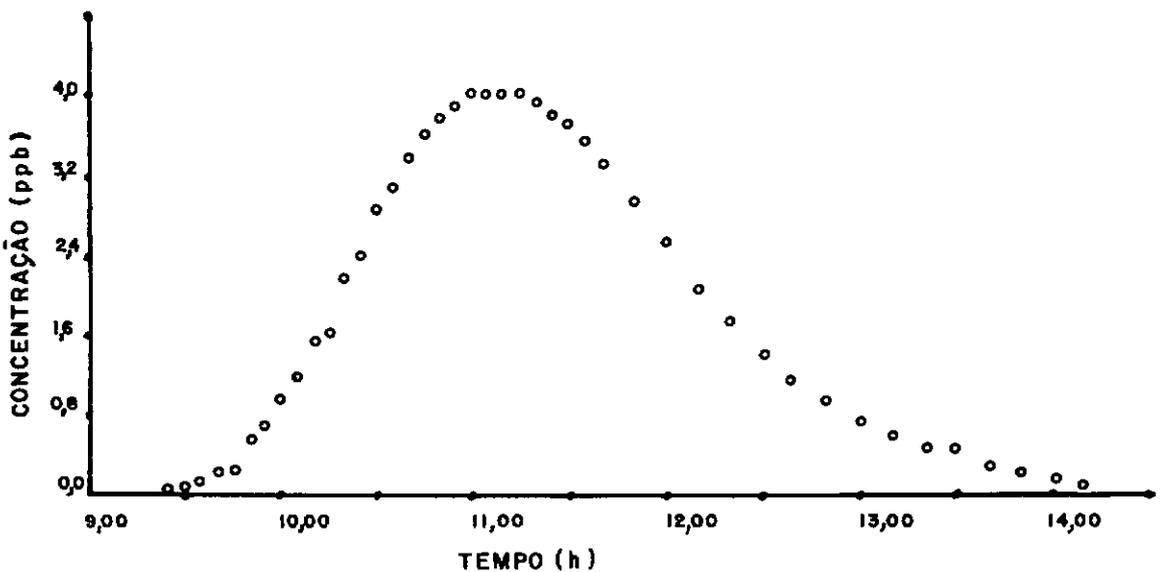


FIG.(C.2.4) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 4

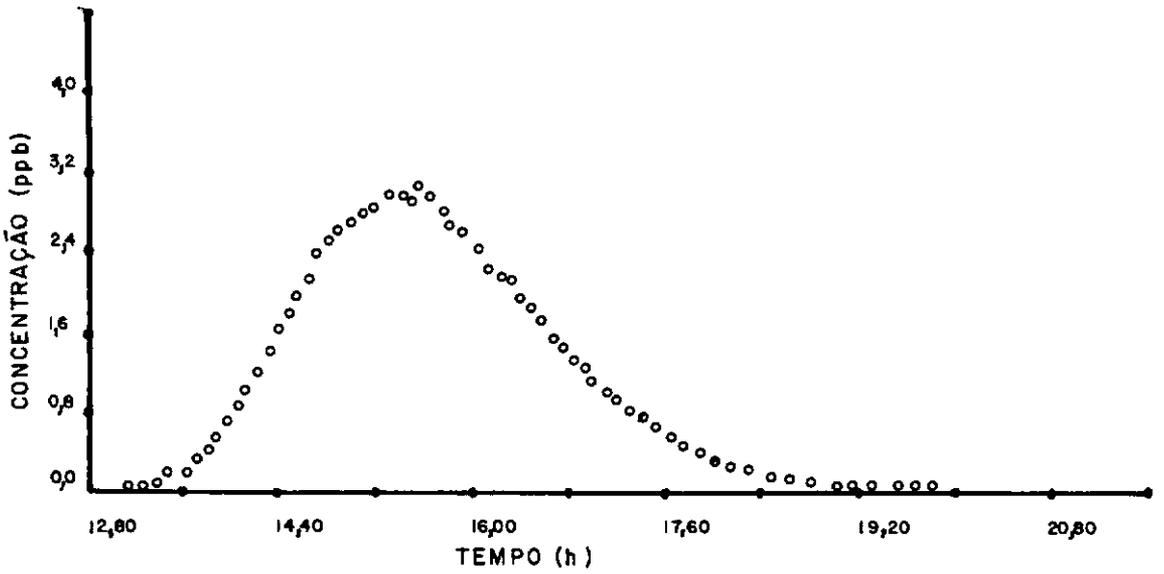


FIG.(C.2.5) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
2º EXPERIMENTO POSTO 5

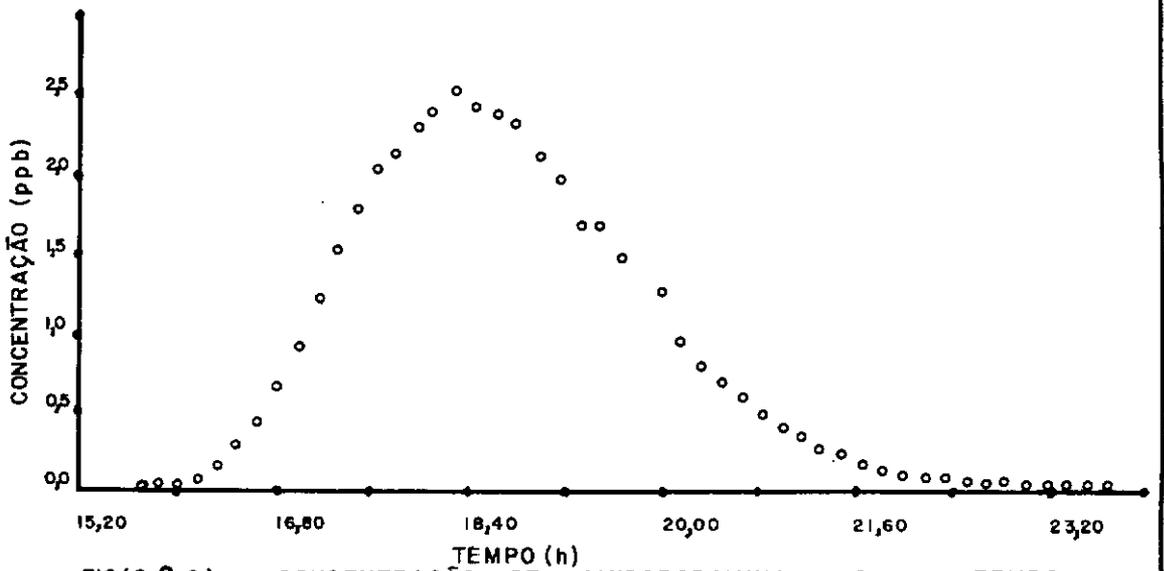


FIG.(C.2.6) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G.e. x TEMPO
2º EXPERIMENTO POSTO 6

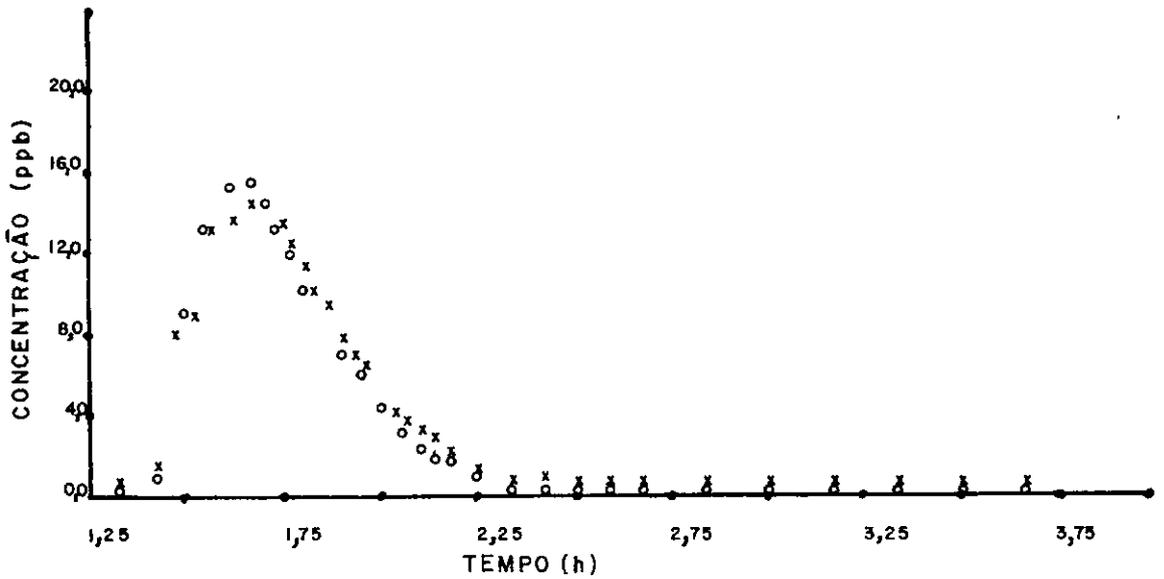


FIG.(C.3.1) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 1
 o SUB - POSTO 1.1
 x SUB - POSTO 1.2

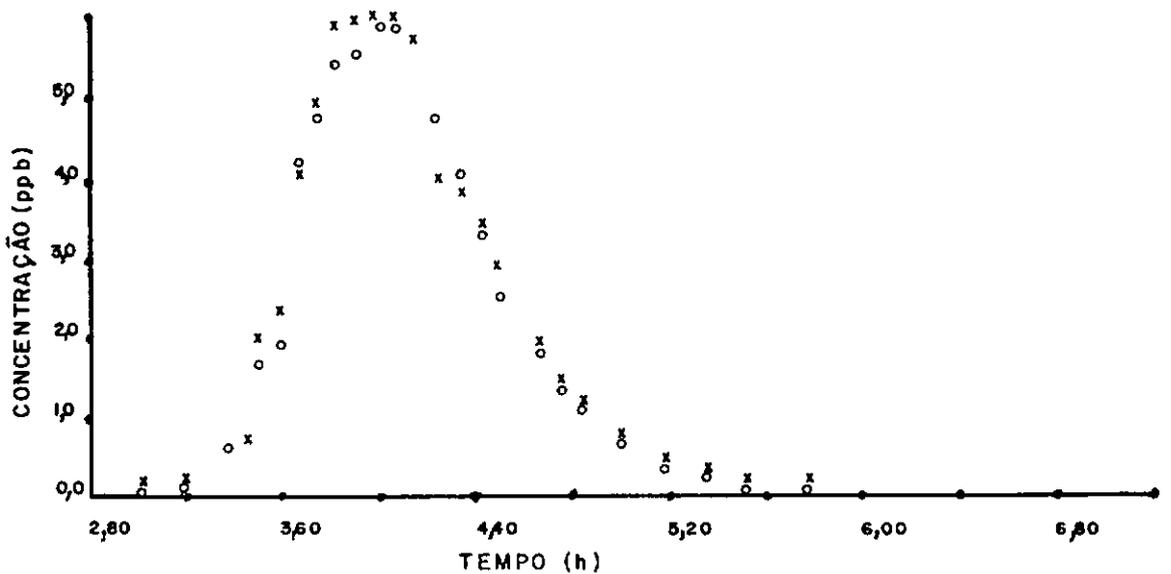


FIG.(C.3.2) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 2
 o SUB-POSTO 2.1
 x SUB-POSTO 2.2

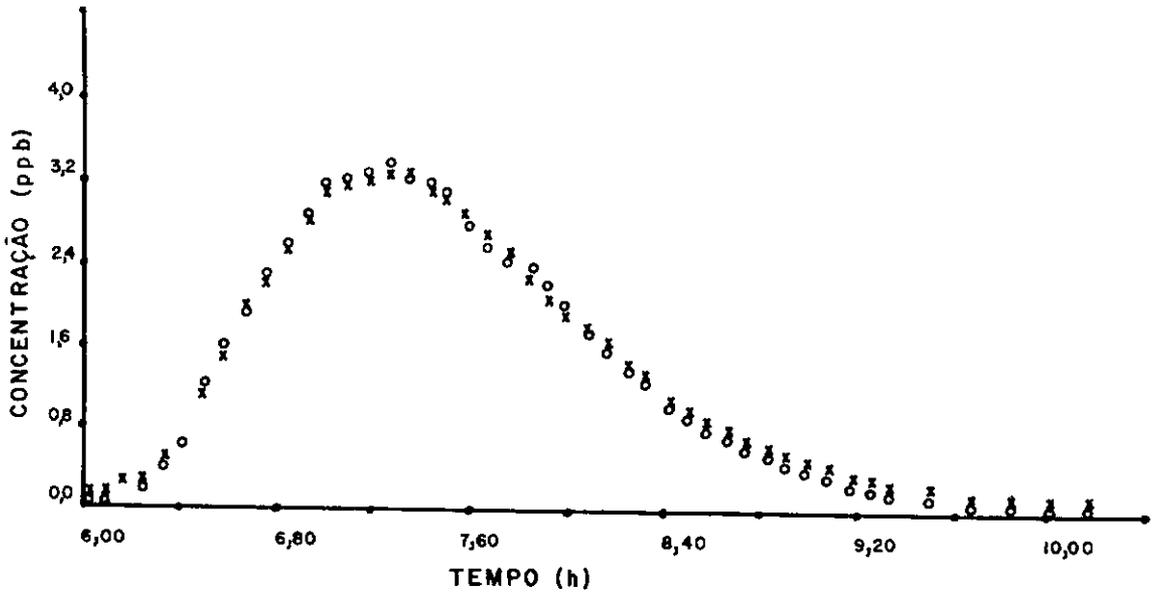


FIG.(C.3.3) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 3
 o SUB - POSTO 3.1
 x SUB - POSTO 3.2

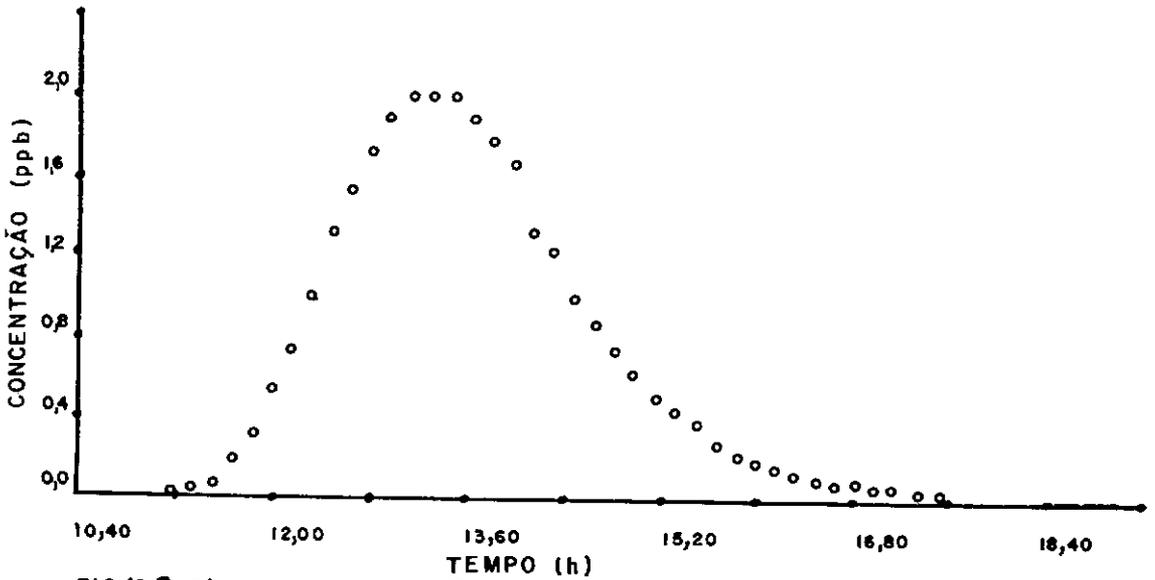


FIG.(C.3.4) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
 2º EXPERIMENTO POSTO 4

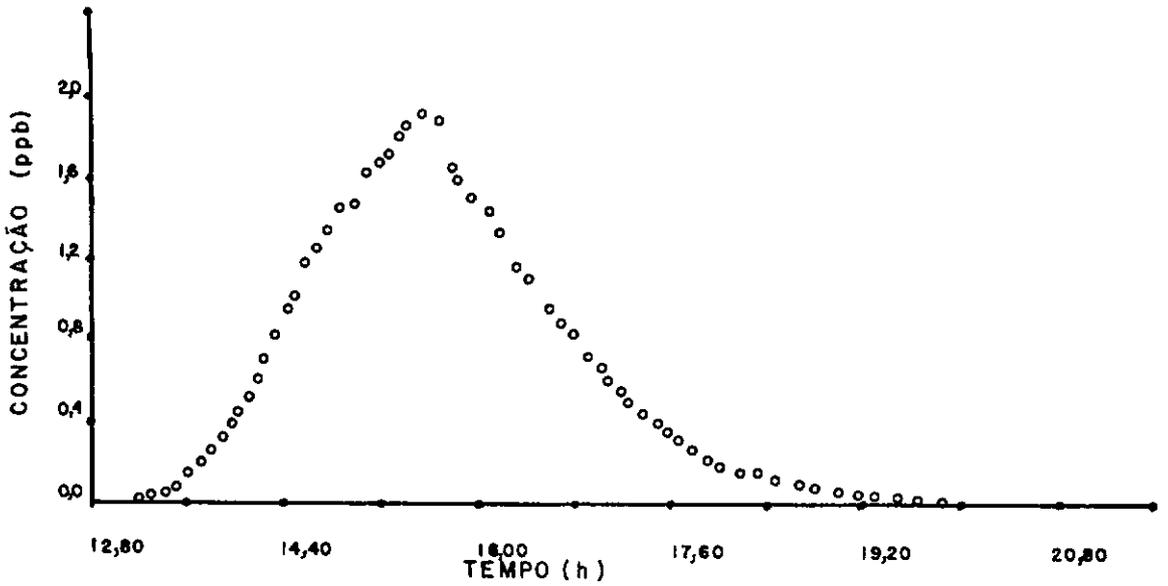


FIG.(C.3.5) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
2º EXPERIMENTO POSTO 5

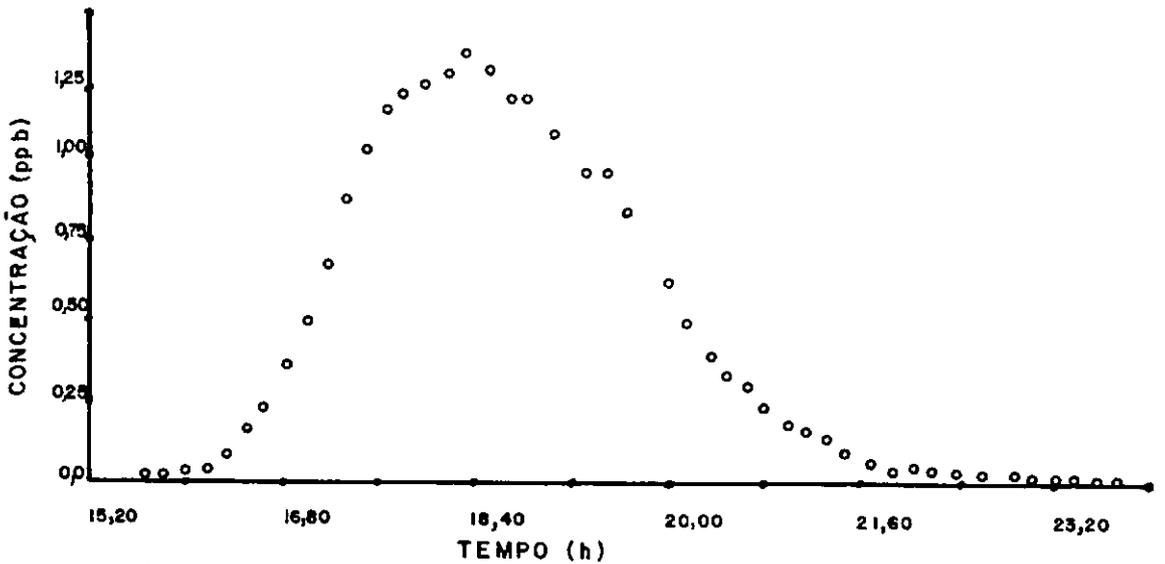


FIG.(C.3.6) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
2º EXPERIMENTO POSTO 6

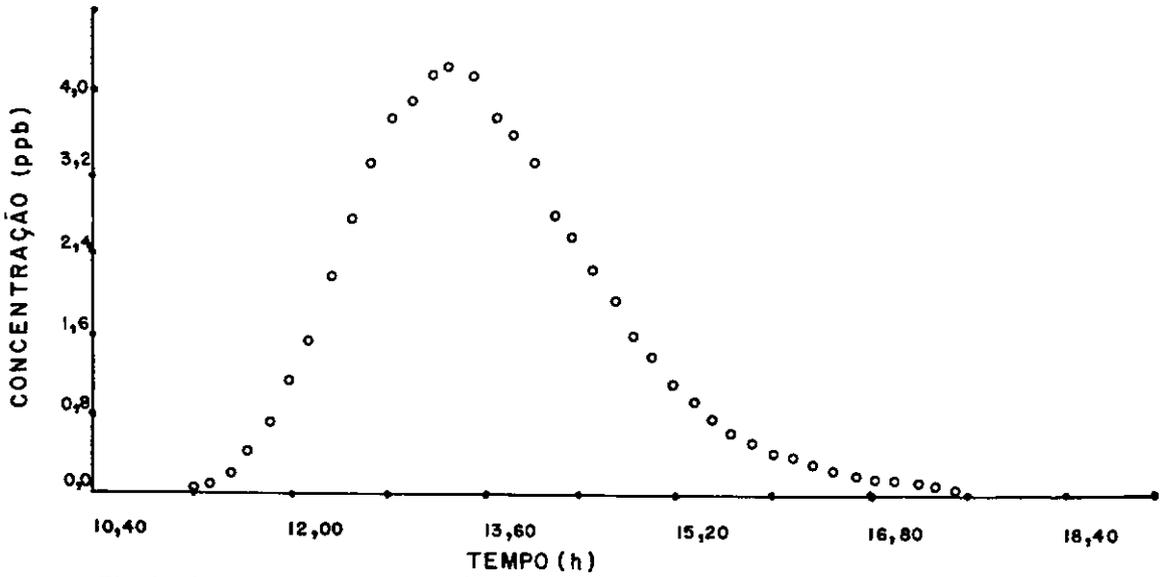


FIG.(C.4.1) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 4

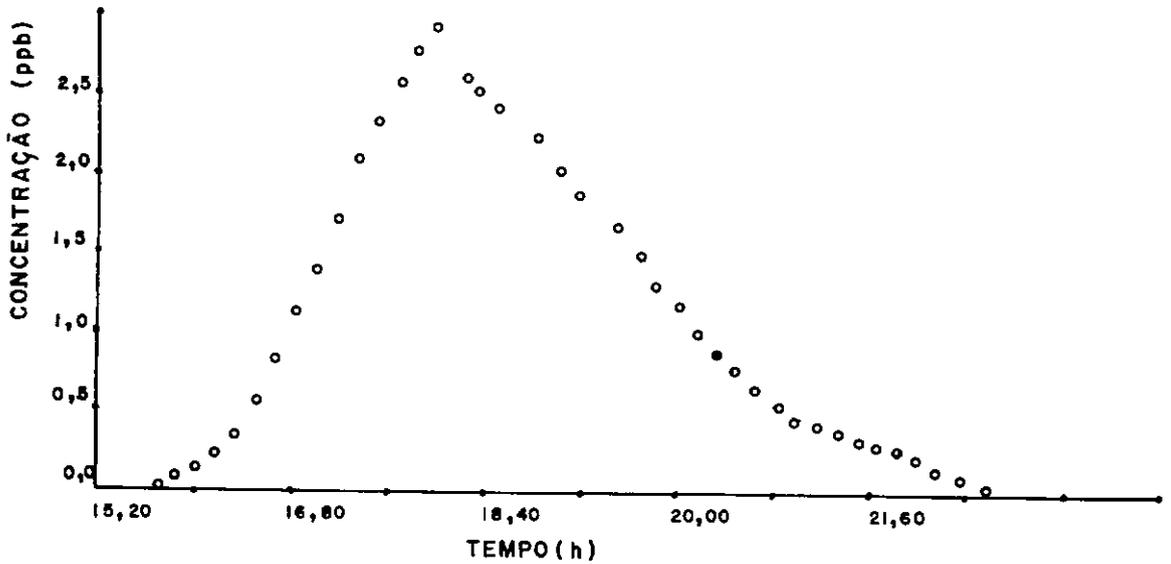


FIG.(C.4.2) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 5

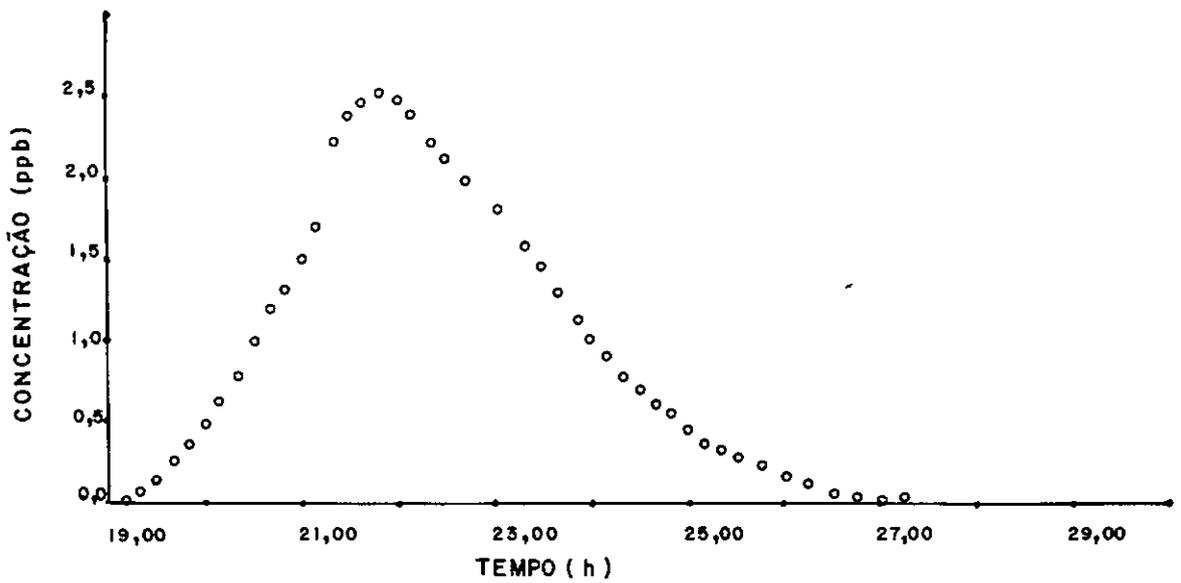


FIG.(C.4.3) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 6

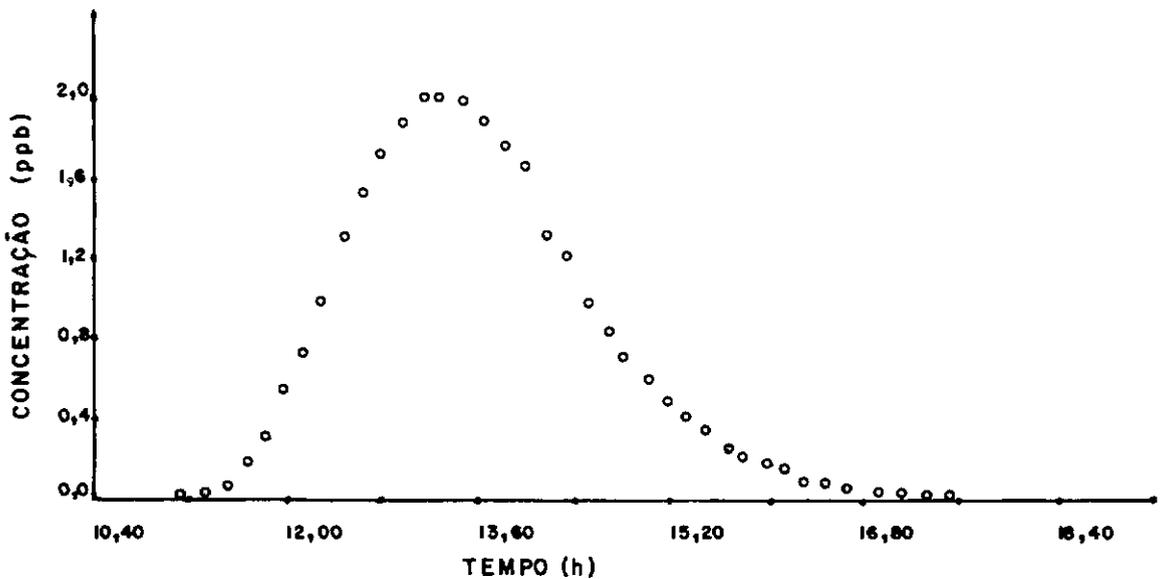


FIG.(C.51) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 4

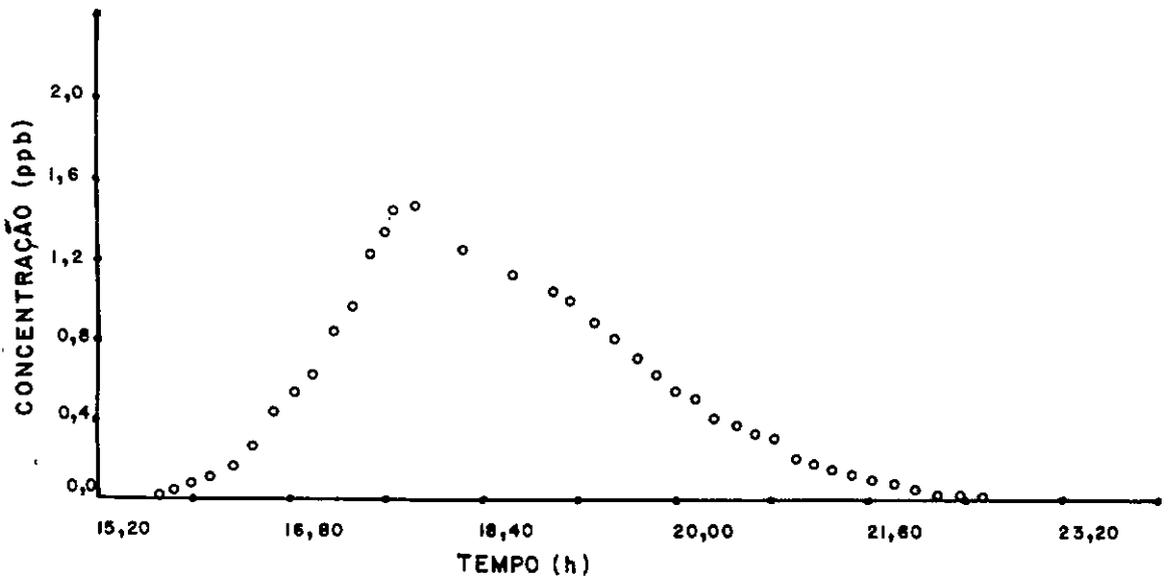


FIG.(C.5.2) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 5

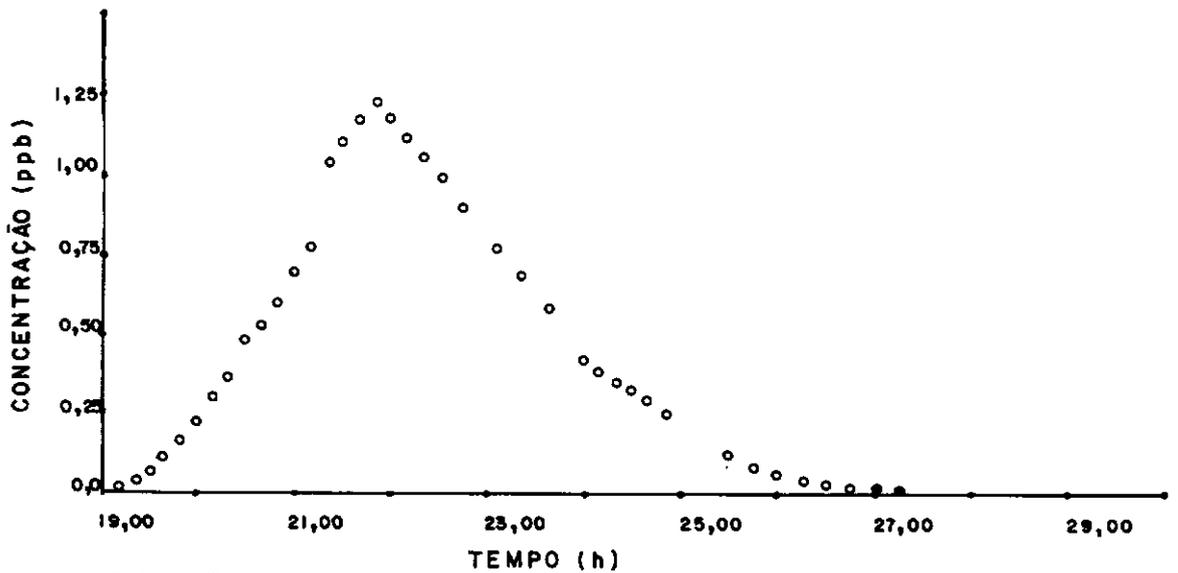


FIG.(C.5.3) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 6

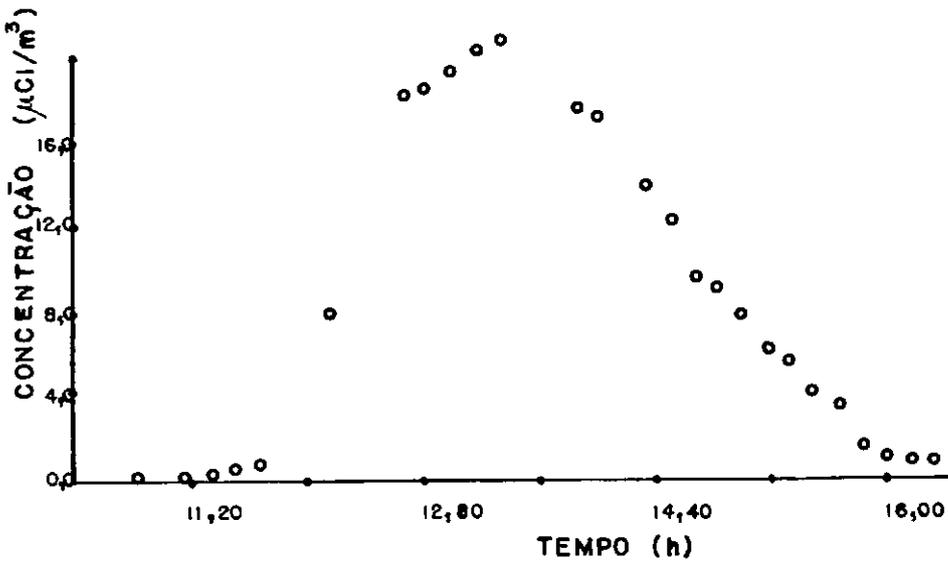


FIG.(C.6.1) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO - 82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 4

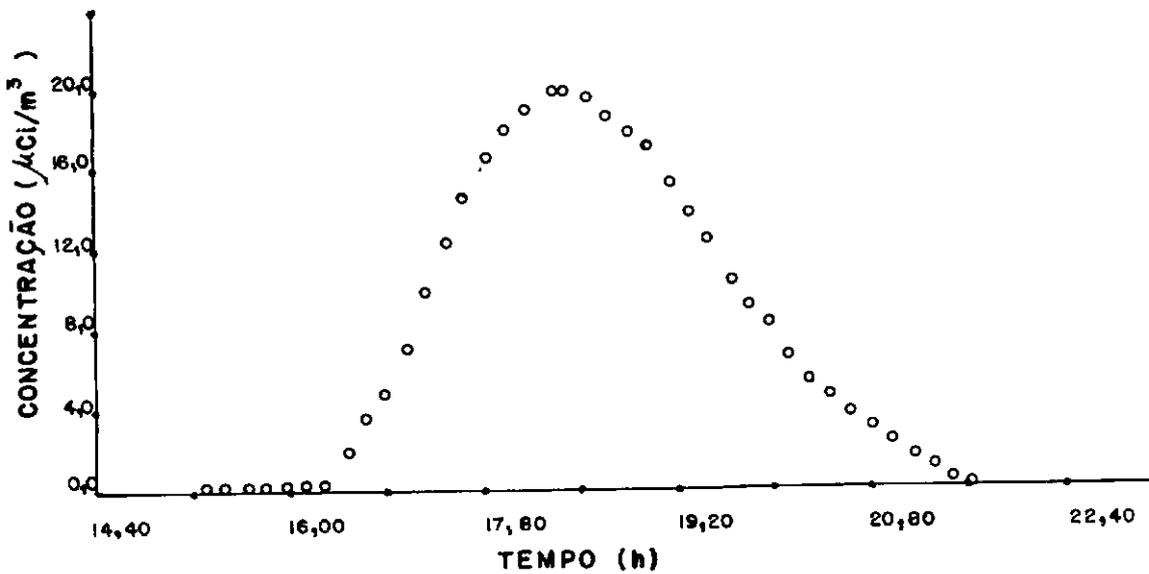


FIG.(C.6.2) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO - 82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 5

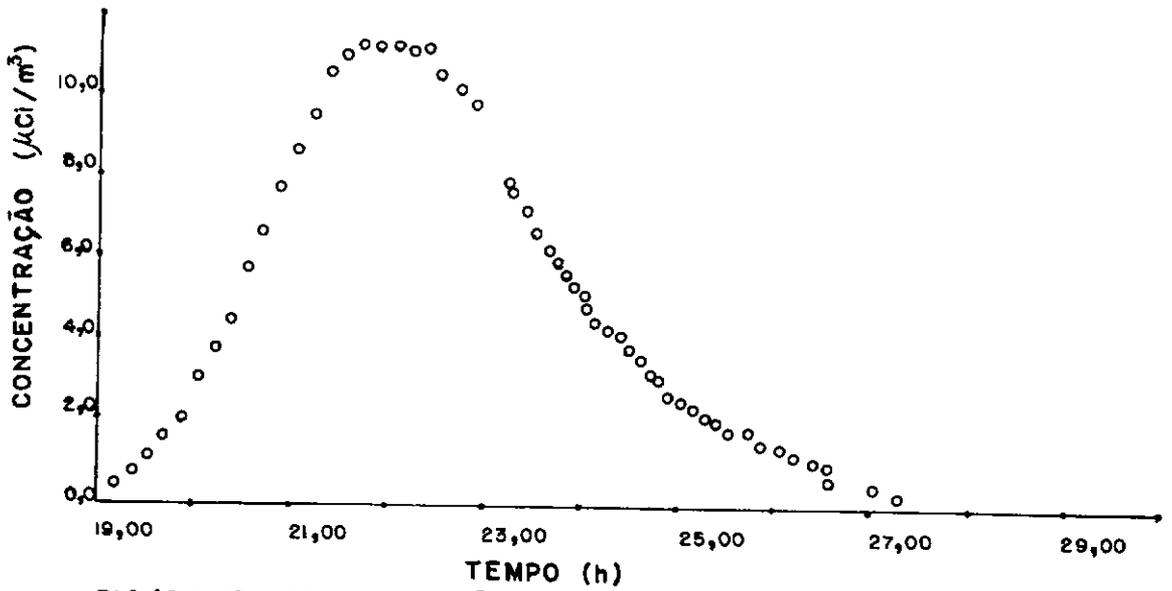


FIG.(C.6.2) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO-82 x TEMPO
3º EXPERIMENTO POSTO 6

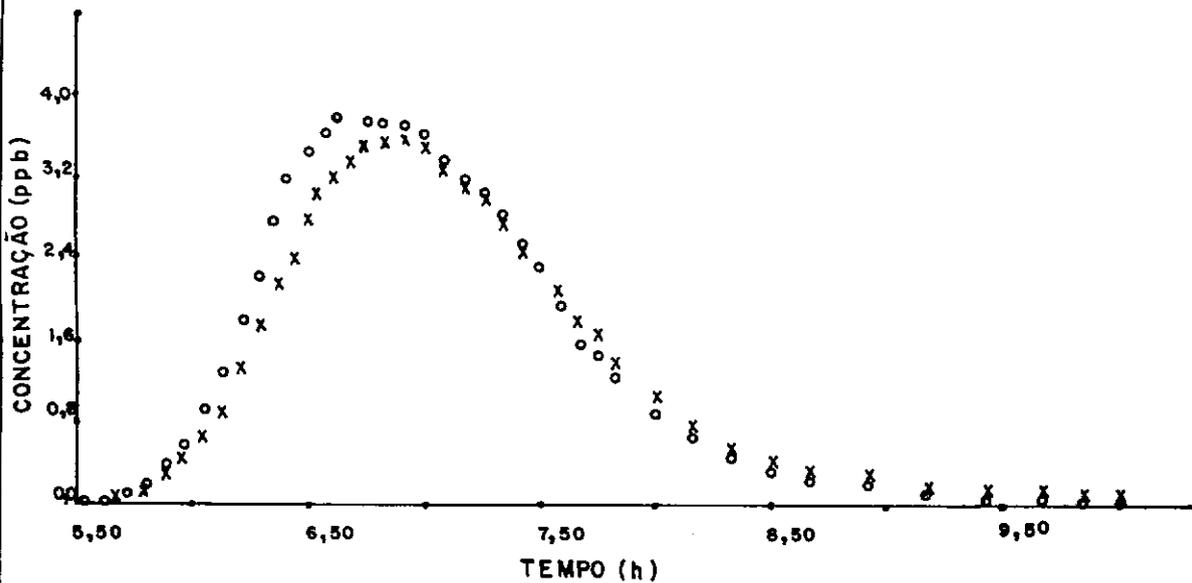


FIG.(C.7.1) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO

4º EXPERIMENTO POSTO 3

o SUB - POSTO 3.1

x SUB - POSTO 3.2

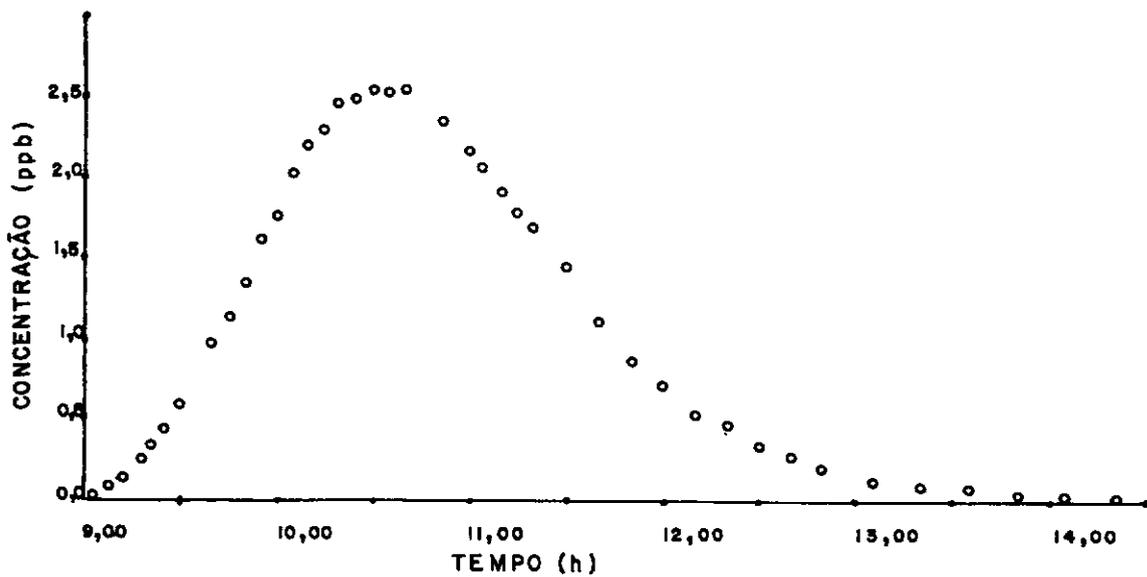


FIG.(C.7.2) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G e x TEMPO

4º EXPERIMENTO POSTO 4

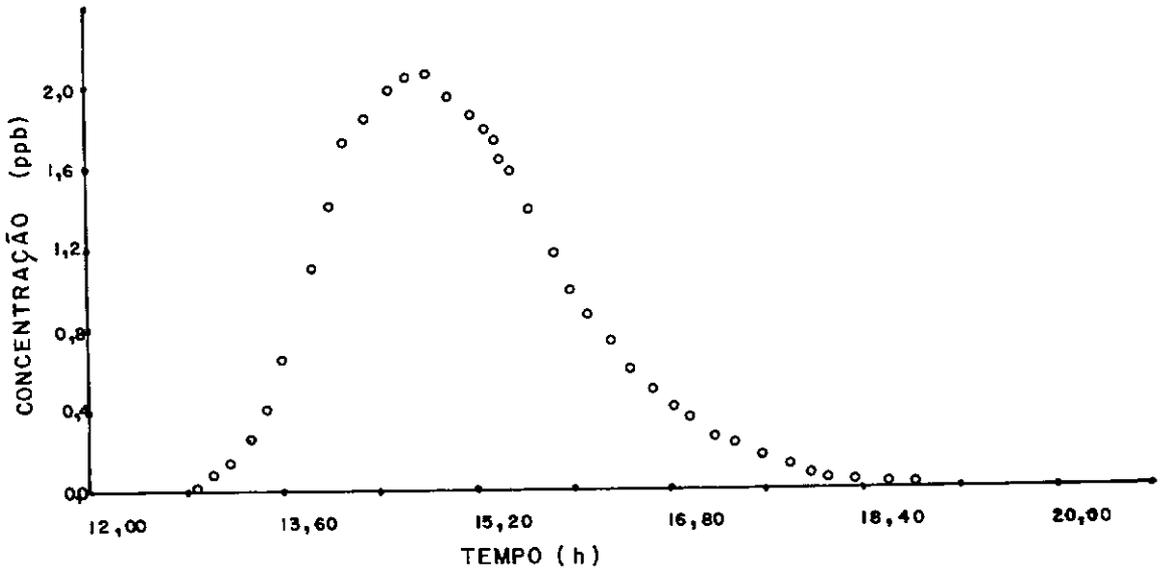


FIG.(C.7.3) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 5

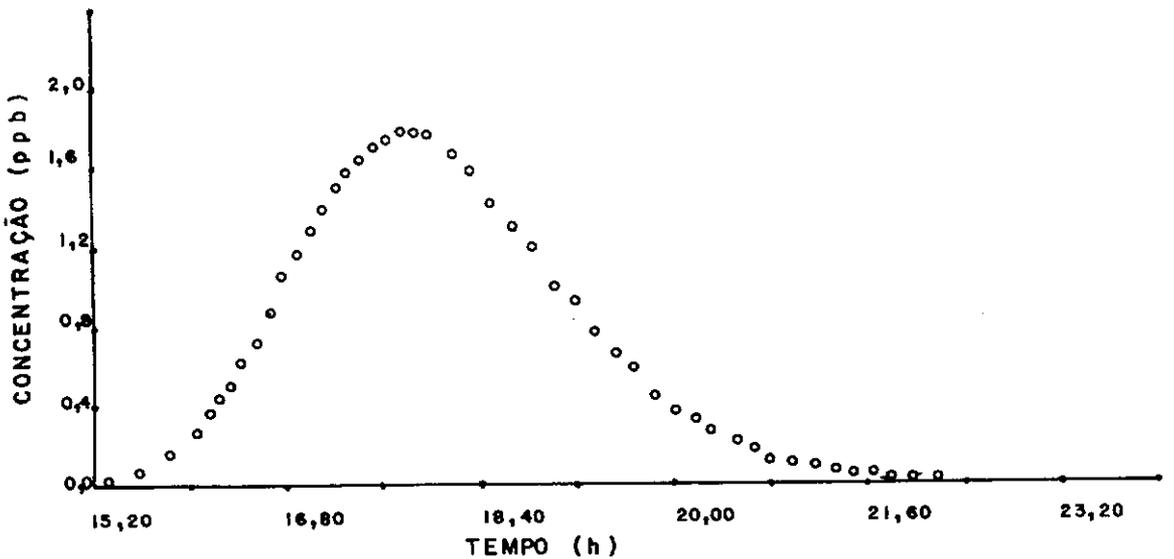


FIG.(C.7.4) - CONCENTRAÇÃO DE AMIDORODAMINA G. e. x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 6

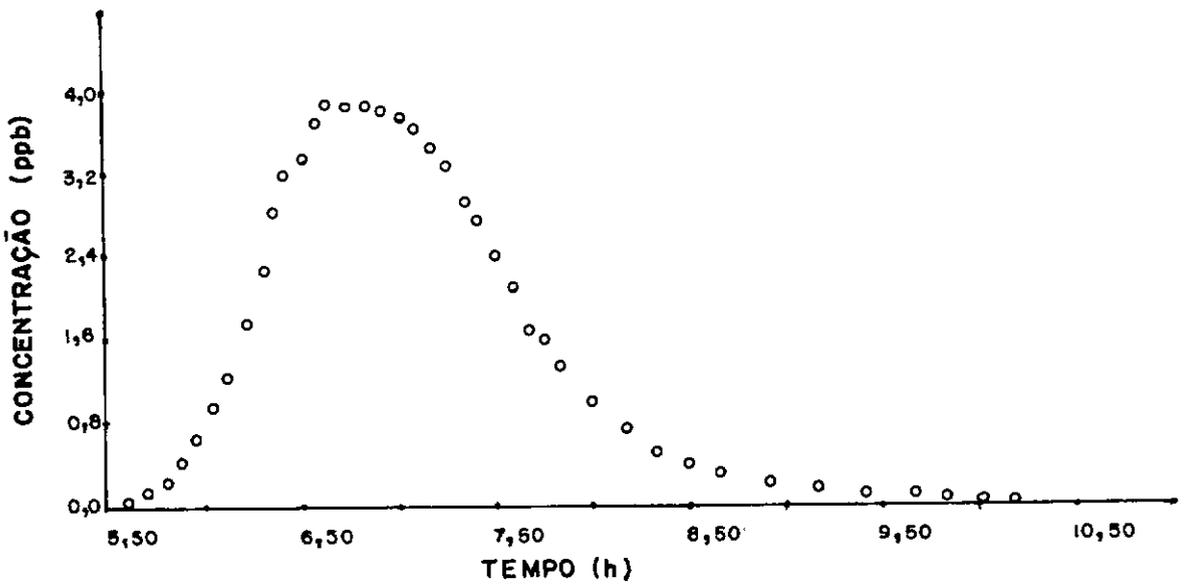


FIG.(C.8.1) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
4º EXPERIMENTO
○ - SUB - POSTO 3.1

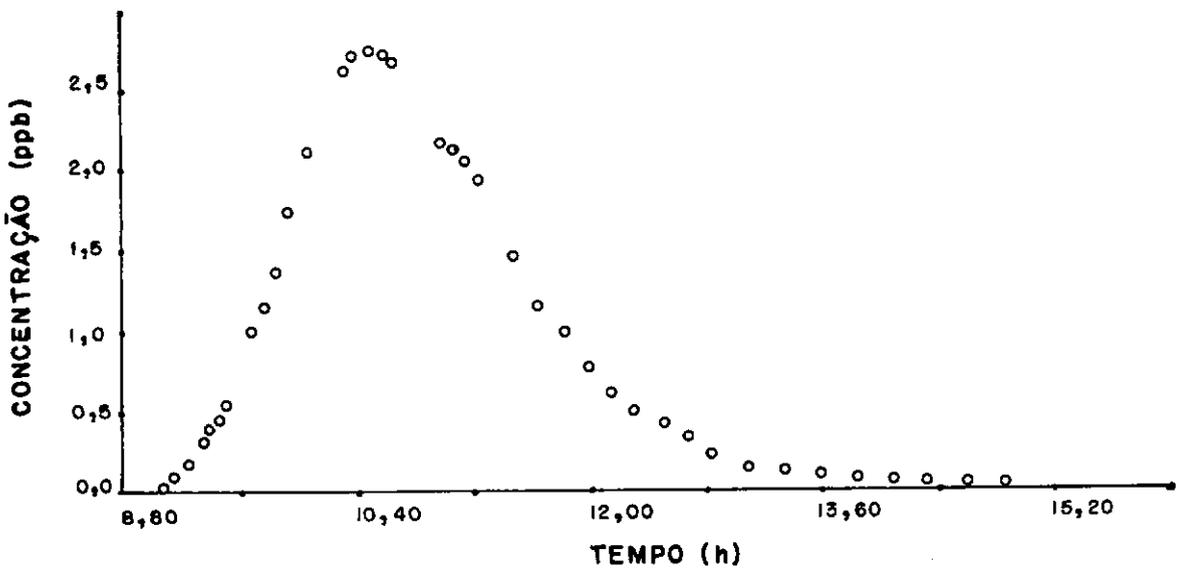


FIG.(C.8.2) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 4

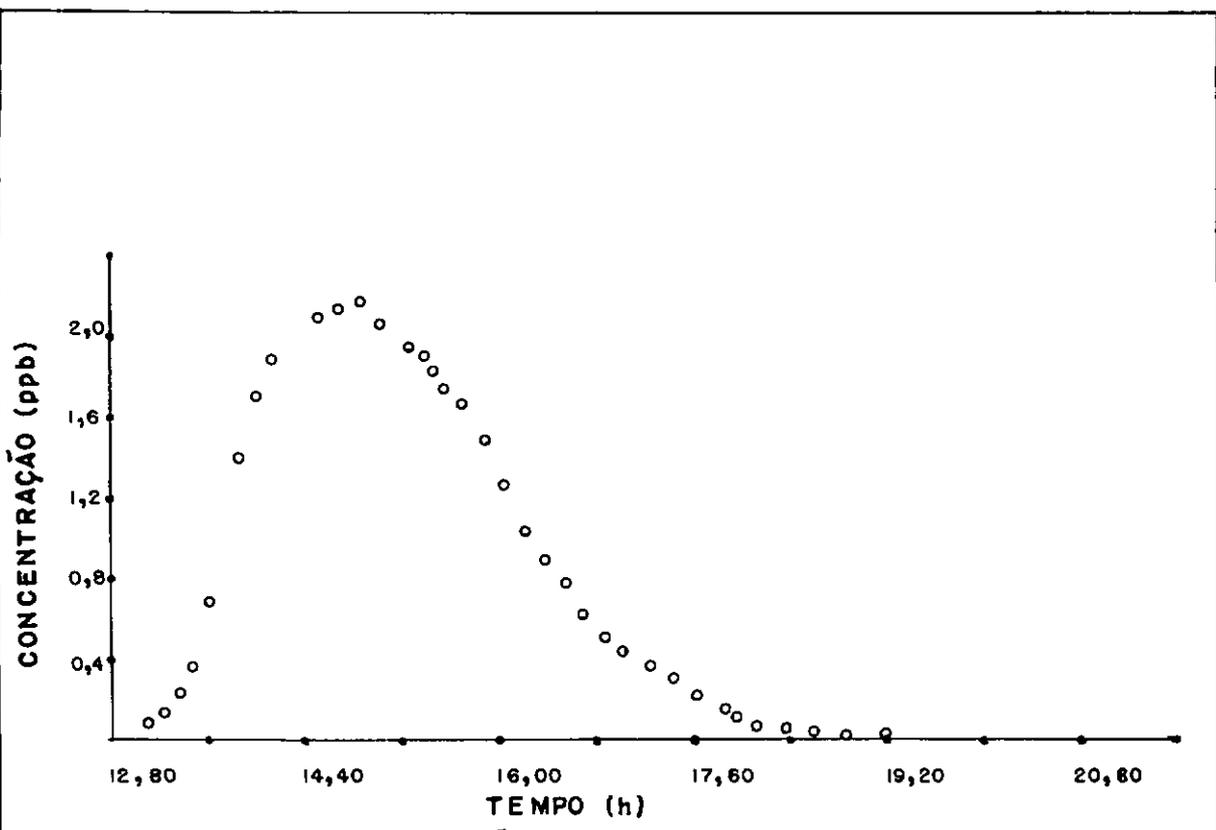


FIG.(C.8.3) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 5

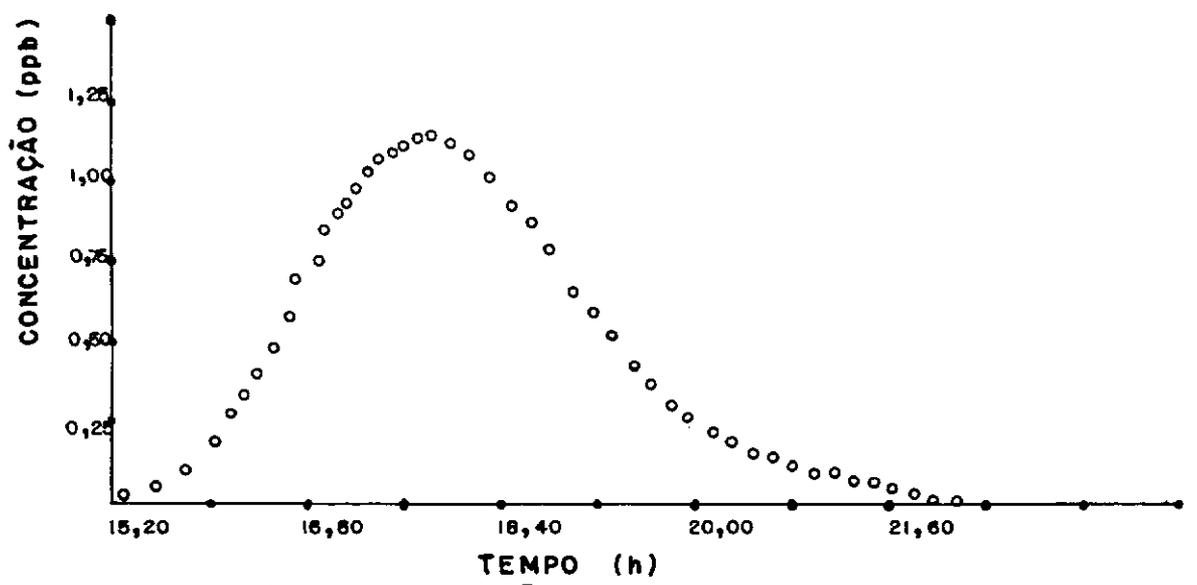


FIG.(C.8.4) - CONCENTRAÇÃO DE URANINA x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 6

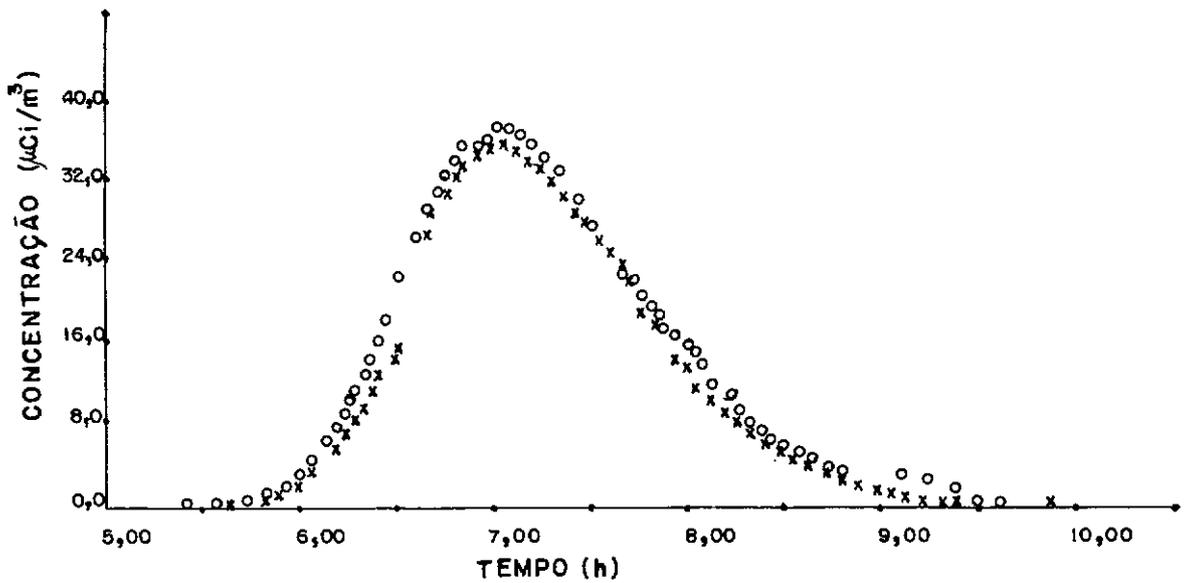


FIG.(C.9.1) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO - 82 x TEMPO
4º EXPERIMENTO
o - SUB-POSTO 3.1
x - SUB-POSTO 3.2

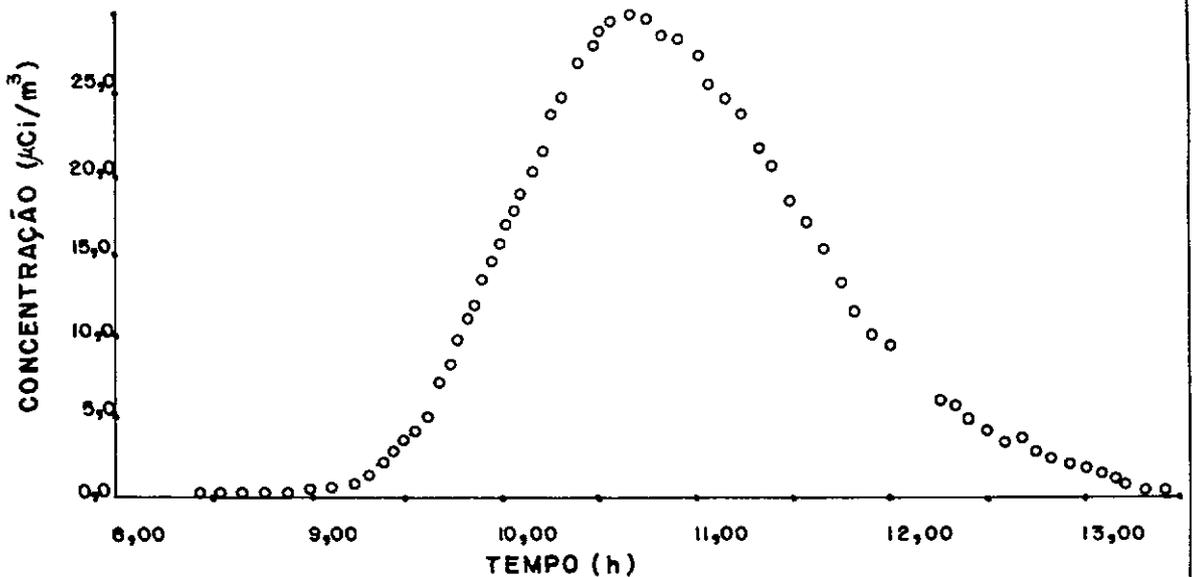


FIG.(C.9.2) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO - 82 x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 4

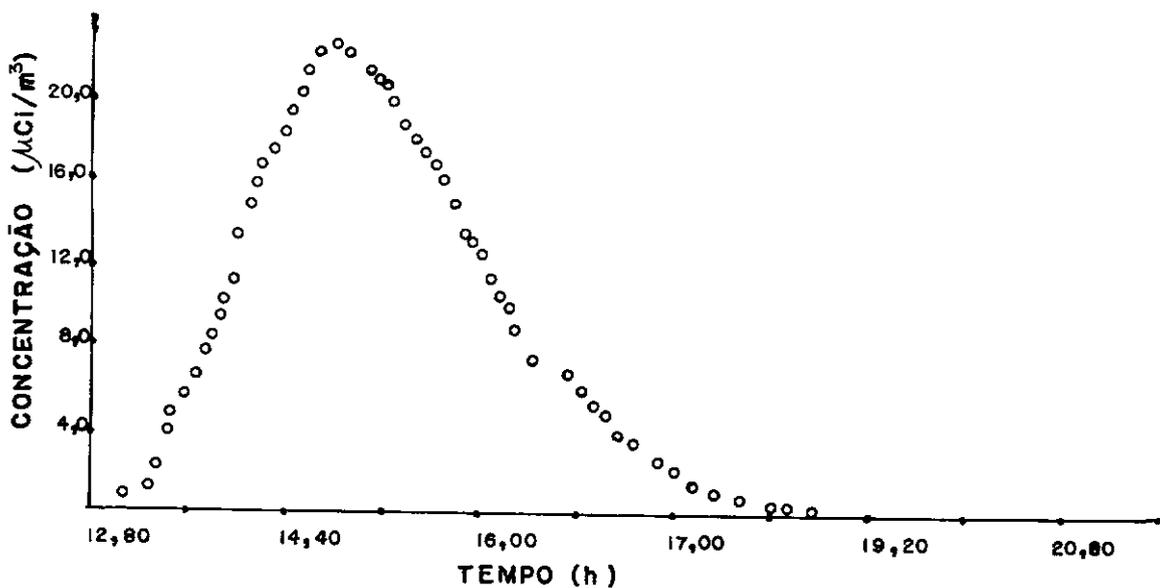


FIG. (C. 9.3) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO82 x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 5

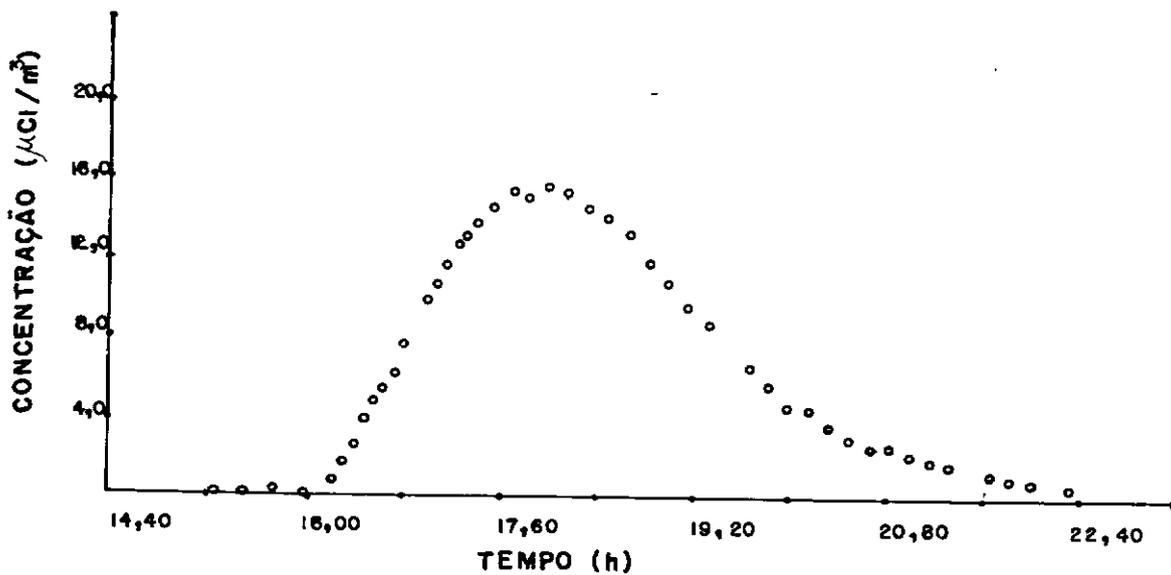


FIG. (C.9.4) - CONCENTRAÇÃO DE BROMO - 82 x TEMPO
4º EXPERIMENTO POSTO 6