

**TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS APLICADAS AOS ESTUDOS
DE CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS DOS VALES DOS RIOS
GURGUÉIA E FIDALGO, PIAUÍ**

A. PLATA BEDMAR - W. SANCHEZ - C. SZULAK

PUBLICAÇÃO IEA N.º 313
Outubro — 1973

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

**TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS APLICADAS AOS ESTUDOS
DE CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS DOS VALES DOS RIOS
GURGUÉIA E FIDALGO, PIAUÍ.**

*** A. Plata Bedmar - W. Sanchez - C. Szulak**

**Divisão de Aplicação de Radioisótopos
na Engenharia e na Indústria
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 313
Outubro - 1973**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng.º Roberto N. Jafet – Presidente
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng.º Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS APLICADAS AOS ESTUDOS DE CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS DOS VALES DOS RIOS GURGUÉIA E FIDALGO, PIAUÍ.

A. Plata Bedmar - W. Sanchez - C. Szulak

RESUMO

Nos Estudos de Reconhecimento para Irrigações, nos Vales dos Rios Gurguéia e Fidalgo, Piauí, realizados pelo consórcio OESA, TECNOSOLO, OTI, EPTISA, por solicitação do DNOCS, utilizaram-se técnicas radioisotópicas na determinação das características dos aquíferos, não somente por serem de baixo custo e proporcionarem resultados fidedignos e rápidos, mas também por servirem de complemento e apoio às medições realizadas com técnicas convencionais.

Utilizando-se diferentes técnicas injetou-se iodo radioativo (131) na forma de ion iodeto) nos poços e detetando-se a radioatividade das águas determinaram-se: a) os fluxos verticais nos poços artesianos surgentes; b) a localização e medida de fluxos verticais em poços não surgentes; c) a localização e medida de fluxos horizontais; d) a porosidade eficaz em conexão com ensaios de bombeamento.

Ao longo da bacia do Rio Gurgueia, estudaram-se três (3) poços surgentes (Cristino Castro, Canto do Buriti e Brejo) e sete (7) poços não surgentes, com fluxos verticais ascendentes e descendentes (Jerumenha, Bertolinas, Canto do Buriti, Eliseu Martins, Laranjeiras e Curimatal). Na bacia do Rio Fidalgo estudaram-se cinco (5) poços jorrantes (Malhadinha, Lagoa Comprida, Alto Novo, Malhada de Dentro e Carro Quebrado), e dois (2) poços não surgentes mas com fluxos verticais (Morro dos Cavalos e Babeco). Mediram-se fluxos horizontais em três (3) poços (dois (2) em Conceição do Canindé e um (1) em Simplicio Mendes) e a partir do conhecimento da velocidade de deslocamento da água, no aquífero Serra Grande, calculou-se o coeficiente de permeabilidade.

Neste trabalho discutem-se também os aspectos teóricos das técnicas radioisotópicas utilizadas, e os resultados das medições.

I - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Neste estudo de reconhecimento das características dos aquíferos dos vales dos rios Gurguéia e Fidalgo, (Figura M-1) com propósitos de irrigação, realizados pelo consórcio OESA, TECNOSOLO, OTI, EPTISA, por solicitação do DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA A SECA - DNOCS - utilizaram-se técnicas radioisotópicas, não só por serem de baixo custo e proporcionarem resultados fidedignos e rápidos, mas também por servirem de complemento e apoio às medições realizadas com técnicas convencionais.

O INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA, IEA por meio de sua DIVISÃO DE APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NA ENGENHARIA E NA INDÚSTRIA, DAREI além de colocar à disposição do DNOCS, uma equipe técnica, coordenada pelo DR. ANTONIO PLATA BEDMAR, perito em hidrologia e pertencente ao quadro de colaboradores da AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA - IAEA, forneceu equipamentos e material radioativo (131) para o bom desenvolvimento dos trabalhos.

As técnicas desenvolvidas, além de proporcionarem a obtenção de dados para os estudos solicitados, poderão ser aplicadas em outros projetos similares. Determinaram-se parâmetros de aquíferos, tais como medida de fluxos verticais em poços artesianos surgentes, localização e

medida de fluxos verticais e horizontais em poços não surgentes.

Quando as águas provenientes de uma precipitação atmosférica atingem o solo, uma fração evapora-se outra escoia superficialmente e uma terceira infiltra-se. A fração infiltrada atravessa a zona de aeração e chega a de saturação, passando a pertencer ao domínio das águas subterrâneas, ou aquíferos. Pode-se considerar a seguinte representação matemática.

$$I = P - E_v - E_s \quad (1)$$

- I - fração de água infiltrada que alimenta o aquífero
- P - intensidade da precipitação atmosférica
- E_v - quantidade que sofre evapotranspiração
- E_s - quantidade que se escoia superficialmente.

A quantidade de água superficial que chega ao aquífero, denominada recarga, está diretamente vinculada a intensidade e distribuição no tempo das precipitações atmosféricas, as características topográficas do terreno, a permeabilidade do solo, a vegetação etc. Esta recarga chega ao aquífero por processos de infiltração direta ou percolação, a partir das correntes superficiais, lagos, pântanos etc.

Nos casos em que o solo é muito permeável e o aquífero ou lençol freático está próximo da superfície, a infiltração direta da água pode adquirir significado para a recarga. É o que ocorre em regiões basálticas ou de alta permeabilidade, do tipo aluvional.

Quando o aquífero é confinado ou artesiano, a maior parte da recarga é proveniente de cursos d'água, localizados nos afloramentos da camada confinada e de precipitações atmosféricas.

A época de maior infiltração e percolação está diretamente vinculada ao regime anual de precipitações atmosféricas e ao clima que determina as condições da evapotranspiração.

Obtem-se as avaliações dos tempos de trânsito medindo-se as concentrações de um traçador radioativo durante a carga e a descarga. As amostras superficiais da carga definem a função de entrada e devem ser tomadas seguindo indicações que dependem das características hidrometeorológicas da bacia.

Distintos modelos matemáticos de circulação (1,2) têm sido propostos para interpretar os resultados das medições das concentrações do traçador radioativo, nas descargas. O "Piston Flow" admite que a água de uma recarga segue a da anterior sem misturar-se. Tudo se passa como se o tempo de residência de todas as moléculas marcadas (n) fosse sempre o mesmo. Nestas condições, a concentração média na descarga C_n , estaria vinculada a concentração na recarga, $C_{(t-T)}$, por uma relação do tipo.

$$C_n = C_{(t-T)} e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$C_{(t-T)}$ - é a função de entrada

t - instante em que é medida a concentração

T - tempo de residência

λ - constante

No caso de uma recarga constante, o cálculo do tempo de trânsito médio T , é bastante simples.

Este modelo não se aplica com sucesso no caso de aquíferos confinados ou livres, pois com grandes distâncias e longos tempos de trânsito, ocorre uma dispersão longitudinal que mistura as distintas recargas.

O segundo modelo, de "fluxo disperso" aplica-se nos casos de aquíferos confinados, supondo-se que as distintas recargas anuais se misturam. Baseando-se em resultados de estudos em modelos reduzidos, o modelo ressalta, que a dispersão longitudinal do traçador radioativo introduzido no sistema durante determinado tempo segue uma lei normal. Pode-se afirmar que as n moléculas marcadas de uma amostra, recolhidas na descarga, permaneceram durante distintos tempos agrupadas, segundo uma lei normal, em torno do tempo médio T . Resolve-se este modelo de maneira análoga ao anterior, desde que as concentrações e volumes de recarga sejam constantes. Em condições normais, nos aquíferos confinados, o erro só é significativo quando as velocidades são muito baixas e os coeficientes de dispersão muito elevados. Sendo C_n , as concentrações médias, medidas em um ponto dado da descarga ao tempo t , e T o tempo médio de permanência das n moléculas marcadas que ingressaram e saíram do aquífero, tem-se,

$$C_n = \int_0^t C_{(t-T)} e^{-\lambda T} F_{R(T)} \cdot T \quad (3)$$

$C_{(t-T)}$ é a resposta impulsional do sistema a um tempo t , em decorrência de uma injeção instantânea de traçador radioativo, realizada no instante T . É também a distribuição do tempo de residência resultante de uma injeção instantânea efetuada no instante T .

$F_{R(T)}$ é uma função de distribuição para um determinado volume de dispersão.

II - TEORIA SOBRE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE AQUÍFEROS

Existem várias técnicas que permitem determinar as características físicas dos aquíferos : direção, velocidade, permeabilidade, porosidade, transmissibilidade e capacidade de retenção. Algumas dessas técnicas exigem apenas uma perfuração (single well) enquanto outras necessitam de duas ou mais perfurações.

II.1 - MÉTODO DA DILUIÇÃO PUNTIFORME

O princípio da técnica de poço único para se medir velocidade e direção de fluxo de águas subterrâneas, consiste em injetar, em determinado nível do aquífero, uma atividade ou concentração conhecida de determinado traçador radioativo e medir sua variação em função da diluição produzida pela água de recarga de poço.

Quando durante as medições o regime se mantém estacionário, não existem componentes verticais de velocidade e a concentração no instante inicial é homogênea. Neste caso tem-se,

$$Q = v_f S \quad (4)$$

$$C_t = \frac{A(t)}{V} \quad (5)$$

- Q** - vazão do poço onde se injetou o traçador radioativo (m^3/s);
 v_f - velocidade de filtração devida a componente horizontal (m/s);
S - seção vertical do poço onde se encontra o traçador radioativo (m^2);
 C_t - concentração do traçador radioativo ($\mu Ci/m^3$) no instante t;
V - volume livre do poço (m^3)
A(t) - atividade injetada (μCi) ou residual, no instante t.

Em regime permanente, a quantidade de água que entra no poço por unidade de tempo é igual a que sai e durante o intervalo de tempo dt, haverá uma variação dA da atividade injetada, tal que

$$dA = Q \cdot 0 \cdot dt - Q \cdot C_t \cdot dt = - Q \cdot C_t \cdot dt \quad (6)$$

$Q \cdot 0 \cdot dt$ - atividade que entra

$Q \cdot C_t \cdot dt$ - atividade que sai

Substituindo os valores de Q (eq.4) e C_t (eq.5) na (eq.6) e integrando entre 0 e t, tem-se,

$$dA = v_f S \cdot \frac{A(t)}{V} \cdot dt \quad (7)$$

$$\int_0^t \frac{dA}{A} = - v_f \cdot \frac{S}{V} \int_0^t dt$$

$$v_f = - \frac{V}{S \cdot t} \ln \frac{A}{A_0} \quad (8)$$

Como a maioria dos poços são cilíndricos, a relação entre o volume V e a seção S é calculada como segue,

$$\frac{V}{S} = \frac{\pi d^2 h}{4 h d} = \frac{\pi}{4} \cdot d \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8), vem,

$$v_f = - \frac{\pi d}{4 t} \ln \frac{A}{A_0} \quad (10)$$

$$\frac{A}{A_0} = e^{- \frac{4 v_f t}{\pi d}} \quad (11)$$

A velocidade v_f é a velocidade das partículas de água que atravessam a perfuração e a seção S de referência é a real, distinta da efetiva. A perfuração introduz dois tipos de perturbação: uma provocada pela própria perfuração que ao penetrar no solo desvia filetes líquidos e outra, pelo revestimento do poço que possui permeabilidade diferente do solo.

Para compensar esta perturbação introduz-se na equação (10) um fator de correção f , obtido a partir de dados experimentais.

$$f = f_1 \cdot f_2$$

$$v_f = - \frac{\pi d}{4f_1 f_2} \cdot \frac{1}{t} \ln \frac{A}{A_0} \quad (12)$$

f_1 - fator de correção devido a distorção hidrodinâmica produzida pela perfuração;

f_2 - fator de correção que leva em conta a relação superfície perfurada/superfície total.

11.2 - MÉTODO DA DILUIÇÃO AO LONGO DA COLUNA PIEZOMÉTRICA

Uma variante da técnica anterior consiste em injetar a solução radioativa em toda a coluna piezométrica obtendo-se a uniformidade da marcação pelo deslocamento vertical do injetor. Introduzindo-se na perfuração uma sonda detetora, consegue-se determinar a concentração do radioisótopo em distintos níveis.

11.3 - MÉTODO DA INJEÇÃO E BOMBEAMENTO (SINGLE-WELL TECHNIQUE)

O traçador é introduzido na perfuração com o objetivo de se conseguir uma homogeneização completa dele com água, ao longo de toda a coluna piezométrica. A seguir injeta-se, com a vazão constante certo volume d'água, para que o traçador se afaste das imediações da perfuração. Espera-se determinado tempo, compatível com a velocidade de trânsito estimada para água que é função do gradiente hidráulico natural e da permeabilidade do aquífero. A velocidade de deslocamento da nuvem radioativa será representada pela relação.

$$v = \frac{r}{\Delta t} \quad (13)$$

v = velocidade da água (m/dia)

r = distância entre a perfuração e um ponto desconhecido, isto é, o baricentro da nuvem radioativa que se afasta das imediações da perfuração.

Δt = intervalo de tempo transcorrido entre o fim da injeção e o início do bombeamento para recuperação da solução radioativa injetada.

Para recuperar-se o traçador injetado bombea-se a água do poço com vazão constante Q (m^3/s). O volume V recuperado depois de certo tempo t , será calculado pela relação:

$$V = \pi r^2 \cdot h \cdot p = Q \cdot t \quad (14)$$

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi h p}} \quad (15)$$

r = distância percorrida pelo traçador no aquífero (m);
 h = altura do aquífero (m);
 p = porosidade (%)

Substituindo-se o valor de r expresso pela equação (15) na equação (13), tem-se,

$$v = \frac{\sqrt{Q \cdot t}}{\Delta t \cdot \sqrt{\pi \cdot h \cdot p}} \quad (16)$$

Realizando-se várias experiências em condições análogas, mas com distintos tempos de espera, pode-se obter uma velocidade média.

O volume de água não marcada que se injeta na perfuração, atrás da solução radioativa, tem somente a função de afastar o traçador das imediações da perfuração para eliminar os erros aleatórios introduzidos pela perturbação hidrodinâmica intrínsecamente associada a todo furo de sondagem (revestimento, filtros, canos, etc).

III - SELEÇÃO DO TRAÇADOR RADIOATIVO

Um traçador deve seguir fielmente o movimento da água, sem que haja troca iônica, absorção, adsorção e precipitação química ou coloidal. Logo, o traçador ideal é aquele que se identifica com o meio e obedece as mesmas leis hidrodinâmicas.

A perda de traçador por absorção, troca iônica, etc. é proporcional ao tempo e superfície de contato traçador-sedimentos. Fixando-se a distância que o traçador deve percorrer, sua velocidade no aquífero será o fator que determina o tempo de contato com os sedimentos. A velocidade é proporcional ao gradiente hidráulico, permeabilidade e porosidade.

As soluções, sólidos ou colóides que conformam os aquíferos ou estratos permeáveis têm capacidade para fixar ou intercambiar os íons presentes na água. Na maioria das vezes ocorrem, simultaneamente, dois tipos de troca iônica; a absorção física e absorção química.

A primeira, regida pelas leis de Van der Waals, estabelece uma união entre o absorvedor e absorvido que em muitos casos fixa transitóriamente o traçador radioativo retardando seu caminhamento e introduzindo erros no cálculo da velocidade. A absorção química é uma união de valência, mais forte, que ocorre na superfície ou no interior do absorvedor.

A absorção física ou química verifica-se mais intensamente em estratos que contêm argilas, colóides, substâncias orgânicas (humus por exemplo), minerais de ferro, etc.

As argilas e materiais orgânicos dão origem a colóides eletro negativos, que fixam preferencialmente os cátions. Assim, em uma primeira seleção de traçadores excluem-se os cátions nos casos de percursos longos em águas subterrâneas ou permanência prolongada em aquíferos.

Alguns aluminatos podem formar coloides eletropositivos e outros minerais dão origem a coloides anfóteros. Em regiões onde estes minerais existem com abundância o uso de traçadores aniônicos não é aconselhável, ficando a escolha para os traçadores naturais, como o trítio (^3H). De acordo com o tipo de argila (caolinita, vermiculita, ilita) a capacidade de intercâmbio dos cátions varia.

O grau de fixação dos cátions depende também da sua valência. De modo geral pode-se dizer que os bivalentes são mais fixados que os monovalentes. Em locais onde existem materiais orgânicos em abundância, tais como estratos que contêm humus, turfa etc. a capacidade de troca é grande. Os coloides eletronegativos que existem nas argilas e compostos húmicos superficiais ou pouco profundos tem uma capacidade de retenção muito elevada.

A fixação dos ions marcados com os estratos, depende particularmente da natureza desses últimos e das condições físico-químicas reinantes no meio (temperatura, pressão, precipitação, etc). Outro fator importante é a concentração do traçador na água.

Nos casos em que determinado elemento existe em abundância na água e já foi estabelecido um equilíbrio geoquímico entre esta última e o solo, pode se usar como traçador um radioisótopo daquele elemento (por exemplo, o ^{24}Na em água saturada de sódio e cálcio).

Outro fator que pode influir consideravelmente na retenção do traçador é a porosidade. Fixando-se a distância a ser percorrida pelo traçador, quanto maior for a porosidade menor será o tempo de contato ou possibilidade de intercâmbio. Independentemente do tempo de contato comprovou-se que em argila de igual composição química mas de distintas granulometrias, a retenção do traçador praticamente não varia.

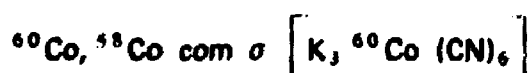
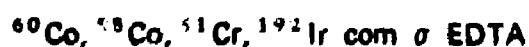
A troca iônica depende também da concentração dos ions na água. A absorção relativa é maior quando a solução se apresenta muito diluída. Por esta razão é conveniente adicionar a solução marcada considerável quantidade de carregador.

Em alguns casos a escolha do traçador radioativo é complexa e necessita-se um estudo prévio de laboratório e/ou de campo para comprovar o comportamento do soluto (traçador em determinada forma química) em relação ao absorvedor e solvente (água).

Pode se afirmar, entretanto, que o trítio (^3H) é o único traçador que dispensa comprovação prévia por ser parte constituinte da água.

De modo geral, pode-se dizer o ^3H é utilizável em qualquer aquífero e com qualquer tipo de águas (dismineralizada, subterrânea, superficial e marítima).

Os radioisótopos,



tem em geral elevado rendimento e se fixam pouco em qualquer tipo de estrato e com

qualquer tipo de água.

III.1 - TRAÇADOR RADIOATIVO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES

Baseando-se nas considerações anteriores, escolheu-se o ^{131}I para ser injetado nos poços dos vales dos rios Gurguéia e Fidalgo. A preparação deste traçador foi realizada a partir do telúrio metálico irradiado em reator nuclear. O telúrio irradiado foi colocado em blindagem de chumbo e transportado por via aérea de São Paulo para Floriano (Piauí). No campo dissolvia-se o telúrio em uma solução de hidróxido de sódio 6 N para obter-se a solução traçadora. Juntava-se a seguir uma solução de NaCl para servir de carregador e introduzia-se o volume em um recipiente de plástico dotado de um sistema apropriado para a retirada de amostras que seriam injetadas nos poços.

IV - EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas com uma sonda detetora de radiação gama, conectada a um escalímetro portátil (Fig. 2, fotografia).

A sonda foi projetada e construída para operar embaixo d'água, a profundidades até 300 m, e ou 30 Hg/cm² de pressão.

Com detetor utilizou-se um tubo G.M sensível a radiação gama. A figura 2(a) mostra o desenho esquemático da sonda.

Os pulsos do G.M eram registrados e acumulados em um escalímetro portátil, para contagem rápida, da Nuclear Chicago Corp.

A alimentação da sonda e a transmissão dos pulsos do G.M. faziam-se através de 300 m de cabo coaxial

Para a recarga das baterias do escalímetro empregou-se um gerador portátil de eletricidade marca HONDA.

V - MEDIÇÕES REALIZADAS EM POÇOS DO VALE DO RIO GURGUÉIA

V.1 - FLUXOS VERTICAIS EM POÇOS ARTESIANOS SURGENTES

Na Bacia do Rio Gurguéia estudaram-se os poços números 13-24 (Canto do Buriti-Brejo), 17-18 (Cristino Castro), 13-16 (Canto do Buriti) que estão localizados na Figura M-1.

Por meio de uma perfilagem procurou-se conhecer, de um lado, a localização da camada ou camadas que abasteciam o poço de água e por outro lado determinar quantitativamente a possível existência de perdas por meio de fluxos horizontais.

Realizou-se a perfilagem utilizando-se a seguinte técnica:

Introduzia-se no interior do poço um tubo plástico, por meio de um lastro pendurado na

sua extremidade inferior, até chegar ao fundo. Pela extremidade oposta que ficava na superfície do solo, injetava-se um volume de solução radioativa, ligeiramente superior a capacidade volumétrica do comprimento total do tubo plástico introduzido no poço. Assim o tubo ficava completamente cheio de solução radioativa. A radioatividade da água que aflorava do poço era controlada permanentemente com o auxílio de um detetor de cintilação, ligado a um escalímetro com saída para um registrador gráfico.

Para se medir a velocidade do fluxo ascendente retirava-se do poço, de forma rápida, determinado comprimento de tubo plástico (por exemplo, 3 metros). A outra extremidade do tubo, situada a uma profundidade h_1 , liberava uma coluna de solução radioativa de igual comprimento, produzindo uma marcação na água do poço.

Considera-se o momento de retirada do tubo plástico como o instante da injeção t_0 , e marcava-se este valor no papel do registrador gráfico. Decorrido certo tempo t_1 o detetor de cintilação indicava a chegada a superfície, da nuvem radioativa. Calculava-se a velocidade média do fluxo pela relação,

$$v_1 = \frac{h_1}{t_1 - t_0} = \frac{h_1}{\Delta t_1} \quad (17)$$

Em seguida retirava-se novamente igual comprimento de tubo plástico e procedendo-se de modo análogo determinava-se a velocidade v_2 , tal que,

$$v_2 = \frac{h_2}{t_2 - t_0} = \frac{h_2}{\Delta t_2}$$

Com retiradas e medidas sucessivas atinge-se a superfície do poço. Mediram-se os intervalos de tempo $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ tomando-se por origem do intervalo de tempo, o instante de cada injeção e por término o baricentro da curva concentração x tempo, que indicava a passagem da nuvem radioativa pelo detetor de cintilação.

Para se obter o perfil da velocidade do fluxo ascendente ao longo do poço, calcularam-se os intervalos $\Delta t_1 - \Delta t_2, \Delta t_2 - \Delta t_3, \Delta t_3 - \Delta t_4, \dots, \Delta t_{n-1} - \Delta t_n$ que representam os tempos gastos pelo traçador; para percorrer as distâncias $h_1 - h_2, h_2 - h_3, h_3 - h_4, \dots, h_{n-1} - h_n$. Obtiveram-se as velocidades

$$V_{1-2} = \frac{h_1 - h_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2}$$

$$V_{2-3} = \frac{h_2 - h_3}{\Delta t_2 - \Delta t_3}$$

$$V_{(n-1) - n} = \frac{h_{(n-1)} - h_n}{\Delta t_{(n-1)} - \Delta t_n}$$

Sendo muito pequenas as diferenças $\Delta t_1 - \Delta t_2, \Delta t_2 - \Delta t_3, \dots, \Delta t_{(n-1)} - \Delta t_n$, quando comparadas com os valores $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$, em alguns casos obtivemos para os valores de V uma dispersão demasiadamente elevada. Atribui-se este fato ao erro cometido quando se fixa o instante da injeção, em cada retirada de tubo. Geralmente, durante a retirada do tubo plástico, o traçador pode não sair instantaneamente ou de forma bem reproduzível. Para diminuir a

dispersão dos valores de V calcularam-se os valores médios para trechos maiores, por exemplo V_{1-5} , V_{5-10} , V_{10-15} , etc.

O poço 13-24 (Canto do Buriti - Brejo) tem uma vazão de 3,5 l/s. Seu diâmetro é de 15,24 cm e encontra-se revestido até 70 metros de profundidade, com filtro localizado entre 35 à 45 metros. A coluna litológica atravessada está representada na figura G-1, junto aos resultados obtidos. Apesar do poço ser construído originalmente com 110 metros, o injetor de solução radioativa só pode ser introduzido até 90 metros. Os resultados mostraram que a entrada d'água no poço se encontrava abaixo dos 90 metros. No trecho superior parece existir pequena perda d'água, da ordem de 0,2 l/s. Como o poço não penetra até a um substrato impermeável, é possível que seu rendimento fosse incrementado pelo aumento de profundidade.

O poço 17-18 (Cristino Castro) tem vazão de 22 l/s sendo o perfil litológico e suas características mostrados na figura G-2, junto com os resultados obtidos. Como se esperava, de acordo com o perfil litológico, a entrada d'água localiza-se abaixo dos 95 metros de profundidade. As perdas d'água no trecho superior são desprezíveis (inferiores a 1 l/s). Este resultado merece atenção, pois entre 42 e 90 metros de profundidade existe uma camada de arenitos e o poço não se encontra revestido nesse trecho. Se o nível piezométrico da água existente nesta camada estivesse abaixo da superfície do solo, logicamente deveriam haver perdas. Tudo indica, portanto, que a água desta camada, se encontra em regime de confinamento, com um nível piezométrico vários metros acima da superfície do solo. Esta hipótese é confirmada pelo fato dos fluxos verticais aumentarem dentro dessa camada à medida que diminui a profundidade, o que indica que esta camada fornece água (aproximadamente 1,2 l/s). As duas camadas de arenito podem ter a mesma superfície piezométrica. O maior conteúdo d'água da camada inferior poderia ser justificado por uma maior permeabilidade da mesma.

O poço 13-16 (Canto do Buriti), fornece uma vazão aproximada de 2 l/s, sendo desconhecidos seu perfil litológico e suas características. Realizou-se uma injeção puntiforme (a 150 metros de profundidade) e a partir deste momento, obtiveram-se sucessivos perfis de concentração do traçador, que estão representados nas figuras G-3. Por dificuldade de representação gráfica, as concentrações dos perfis 1, 2 e 3, para o trecho compreendido entre 150 e 155 metros são indicados em tabela.

A interpretação destes perfis é um tanto complexa, pois o traçador foi injetado em um trecho onde existem fluxos verticais e horizontais. O fluxo vertical começa a uma profundidade compreendida entre 135 e 140 metros. Entre 141 e 155 metros, existe somente fluxo horizontal: a nuvem do traçador não se desloca em sua totalidade para cima e, além do mais, observa-se um mínimo de concentração, que se mantém fixo a uma profundidade de 145 metros.

O fluxo vertical, que se inicia entre a profundidade de 135 a 140 metros, vai aumentando progressivamente (entrada de água), até alcançar um valor máximo situado no trecho 50-97,5 metros. A partir daí, começa a diminuir (perdas d'água por saída horizontal) até alcançar na boca da sondagem um valor aproximado de 1 l/s, que concorda satisfatoriamente com a vazão da água que aflora no poço. Os dados disponíveis não são suficientes para situar com precisão a camada de confinamento, a qual deve chegar até 100 metros de profundidade aproximadamente. As perdas d'água no trecho superior do poço são da ordem de 0,8 l/s, o que

representa uma elevada percentagem da vazão que aflora do poço

V.2 - FLUXOS VERTICAIS EM POÇOS NÃO SURGENTES

Estudaram-se os seguintes poços com estas características: poço 06-27 (Jerumenha), 07-05 (Bertolinia), 13-25 (Canto do Buriti), 13-35 (Canto do Buriti), 13-32 (Canto do Buriti), 13-42 (Canto do Buriti) e 14-19 (Eliseu Martins)

A técnica experimental utilizada para a medida dos fluxos verticais foi a seguinte:

Em um ponto, bem próximo de onde se originavam os fluxos, realizou-se uma injeção puntiforme de material radioativo por meio do tubo plástico introduzido no poço.

Retirou-se do poço o tubo de plástico e introduziu-se uma sonda detetora para localizar a posição da nuvem radioativa. Movimentando-se a sonda detetora ao longo da coluna de água, consegue-se localizar a nuvem radioativa que se desloca de acordo com o fluxo vertical existente. Registrando-se sua posição em função do tempo, pode-se calcular sua velocidade. Este procedimento vai até o instante em que todo o traçador radioativo sai do poço.

Representa-se a posição da nuvem por uma curva que indica a variação da concentração em função da profundidade do poço. A distância em metros existente entre os baricentros de duas destas curvas, dividida pelo intervalo de tempo transcorrido entre os momentos que elas foram obtidas, permite calcular a velocidade média do fluxo vertical no trecho correspondente. Quando o fluxo é suficientemente lento, o tempo usado na medida de uma curva pode ser considerado desprezível em comparação com o intervalo de tempo transcorrido entre duas curvas consecutivas. Em caso contrário, é preciso efetuar correções de tempo para calcular os fluxos. Com fluxos muito rápidos, não se pode utilizar esta técnica.

Os resultados obtidos por esta técnica em poços com fluxos verticais estão representados nas figuras G-4 a G-10.

V.3 - FLUXOS HORIZONTAIS

A técnica utilizada para medir a velocidade dos fluxos horizontais, consistiu em marcar uniformemente com radioatividade, toda a coluna d'água do poço, e estudar a diluição do traçador em função do tempo.

A técnica de marcação consistiu em introduzir o tubo plástico de seção conhecida até o fundo do poço e preenchê-lo com a solução radioativa. Retirando-se lentamente o tubo, a solução fica distribuída uniformemente ao longo do poço.

Depois da marcação da coluna de água, obtém-se os perfis verticais de concentração por meio de uma sonda detetora que se desloca através da coluna em intervalos de 1,2 ou 5 metros, conforme o caso. A frequência dos perfis é dependente da magnitude dos fluxos horizontais. Quando os fluxos são rápidos, a frequência com que são realizados os perfis deve ser maior.

Em alguns casos utilizou-se esta técnica de marcação para estudar fluxos verticais (antes de conhecer sua existência), porém, não é a mais adequada.

Para se obter dados referentes aos parâmetros, admitiram-se as seguintes considerações, tendo por base os aspectos teóricos discutidos no capítulo II.

Supôs-se um fluxo horizontal, estacionário e uniforme, circulando através de toda a extensão do poço ou de um trecho determinado do mesmo. Definiu-se os seguintes parâmetros:

- d = diâmetro do poço;
- h = altura da coluna de água afetada pelo fluxo uniforme e estacionário;
- $V_0 = \frac{d^2}{4} \cdot h$ = volume da coluna d'água;
- $S = d \cdot h$ = seção do poço em um plano vertical;
- V_s = velocidade de circulação da água dentro do poço, através da seção S ;
- $Q = V_s \cdot h \cdot d$ = vazão circulante através de S .

Em tais condições, a concentração C do traçador em V_0 diminui em função do tempo, segundo a equação diferencial:

$$dC/dt = -C/V_0 \cdot dV/dt \quad (18)$$

onde $dV/dt = Q$

Substituindo-se este valor na equação (18) tem-se,

$$-dC/C = \frac{V_s \cdot h \cdot d}{V_0} dt$$

cuja integração permite obter,

$$\begin{aligned}
 -\ln C_t &= \frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0} + \ln C_0 \\
 \ln C_t/C_0 &= -\frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0} \\
 C_t/C_0 &= \exp \left(-\frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0} \right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

sendo C_0 a concentração inicial, e C_t a existente após certo tempo t .

A velocidade V_s d'água através do poço, se relaciona com a velocidade V_a do aquífero, pela expressão (4):

$$V_s = \alpha \cdot V_a \quad (20)$$

sendo α um coeficiente introduzido para levar em conta a perturbação hidrodinâmica ocasionada no poço pela sua construção. Este coeficiente equivale a relação Q/Q_s , sendo Q_s a vazão que circula através de uma seção do aquífero igual a S .

Substituído em (19) os valores de V_O e V_S obtém-se.

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp - \frac{4 \alpha V_a}{\pi d} \quad (21)$$

Desta expressão, é fácil deduzir o tempo $T_{1/100}$ necessário para que a concentração inicial do traçador se reduza a $1/100$, isto é, para que se cumpra a relação $C_t/C_0 = 0,01$. Tem-se:

$$T_{1/100} = \frac{3,62 d}{\alpha V_a} \quad (22)$$

Na prática utilizou-se esta fórmula para calcular V_a . Determina-se experimentalmente o valor de $T_{1/100}$

O valor de α depende da permeabilidade do revestimento do poço, permeabilidade dos filtros, da permeabilidade do aquífero e da permeabilidade e dimensões de uma possível camada de cascalho, utilizada como pré-filtro, e disposta em torno da tubulação de revestimento. Na ausência de uma tubulação de revestimento e da camada de pré-filtro, considera-se α igual a 2. O mesmo sucede quando não existe pré-filtro e a permeabilidade do filtro é de 5 a 10 vezes maior que a do aquífero. Se esta última condição não é válida, pode ocorrer que α seja menor que 2. Com um pré-filtro de elevada permeabilidade α pode atingir valores de 4 a 5. De qualquer maneira é possível determinar α em laboratório, por meio de um permeâmetro, se todos os dados relativos à construção do poço forem conhecidos.

Na falta de outras informações, utilizou-se para os cálculos de V_a , um valor de $\alpha = 2$. Supôs-se que o filtro do poço (no caso de existir) era mais permeável que o aquífero, e não existia uma camada de pré-filtro ou que caso existisse, tivesse uma espessura muito pequena.

Estudaram-se dois poços com fluxos horizontais. O primeiro foi o Poço Laranjeira (Canto do Buriti) que situa-se a 3,2 km de Canto do Buriti na estrada PI-5, que vai à Raimundo Nonato. Tem um diâmetro de 25,4 centímetros, profundidade de 42 metros e o nível freático encontra-se a 10 metros.

Marcou-se toda a coluna de água e obtiveram-se quatro perfis de concentração que estão representadas na figura G-11A, em percentagem, referindo-se à concentração do perfil 1. No trecho compreendido entre 17,5 e 37,5 metros, existe fluxo-horizantal de 6,7 cm/dia, aproximadamente. Na figura G-11B representou-se a concentração média de cada perfil em função do tempo. O coeficiente angular da reta corresponde à velocidade, sendo tomado para α um valor igual a 2 (equação 20).

O outro poço foi o n.º 30-05 (Curimatá) com profundidade de 130 metros e nível piezométrico de 10 metros. Marcou-se toda a coluna de água e obtiveram-se 3 perfis de concentração ao cabo de 1,5, 40 e 83 horas, respectivamente (figura G-12).

Neste poço não se mediu fluxos de nenhum tipo. As concentrações iniciais de traçador permaneceram praticamente inalteradas ao cabo de 83 horas de medição.

VI - MEDIÇÕES REALIZADAS EM POÇOS DO VALE DO RIO FIDALGO

VI.1 - FLUXOS VERTICAIS EM POÇOS ARTESIANOS SURGENTES

Ao longo da bacia do Rio Fidalgo, entre Campo Alegre e São Miguel, existe uma série de poços artesianos surgentes, perfurados em diferentes formações geológicas. Dêstes poços, interessava por um lado, conhecer a localização exata das camadas das quais procede a água, e por outro, determinar quantitativamente a possível existência de perdas de água por fluxos horizontais, através das camadas superiores atravessadas por cada poço. Enfim, interessava a obtenção de um perfil vertical com as entradas e saídas de água.

Utilizando-se da mesma técnica empregada nos poços do Rio Gurguéia, foram estudadas os seguintes poços:

- a) Malhadinha (102) - Figura F-1
- b) - Lagôa Comprida (125) - Figura F-2
- c) - Alto Novo (128) - Figura F-3
- d) - Malhada de Dentro (129) - Figura F-4.
- e) - Carro Quebrado (131) - Figura F-5

A secção interna destes poços é constante e igual para todos (6 polegadas de diâmetro). Portanto, qualquer variação produzida na velocidade do fluxo ascendente significa uma variação, no mesmo sentido, da vazão circulante; as diferenças de vazão, para diferentes profundidades de um mesmo poço, são motivadas por entradas e saídas de água.

VI.2 - FLUXOS VERTICAIS EM POÇOS NÃO SURGENTES

O programa de estudo do movimento da água no interior dos poços, com aquífero não perturbado, utilizando traçadores radioativos teve como finalidade principal a determinação da velocidade horizontal da água. A partir daí, calculou-se a permeabilidade do sistema, por aplicação da lei de Darcy. A técnica experimental exige a introdução, dentro do poço, de um equipamento para injeção do traçador e, posteriormente, de um detetor capaz de registrar as mudanças de concentração em função do tempo. Isto, limitou o programa ao estudo dos poços que não possuíam equipamento de bombeamento instalado. Não se dispunha de meios nem de tempo para desmontar os sistemas de extração de água existentes na maioria dos poços.

Estudaram-se um total de cinco poços sendo que em dois deles foram encontrados fluxos verticais. Este tipo de fluxo se origina quando a perfuração coloca em comunicação dois aquíferos de diferentes níveis piezométricos, quando ocorrem na sondagem lençóis superpostos, ou seja, águas procedentes de cotas superiores às do nível piezométrico (fluxo vertical descendente), ou, então, quando se trata de um aquífero confinado cuja água pode drenar através de uma camada superior permeável. Em presença de tais fluxos, não é possível obter uma informação exata sobre o coeficiente de permeabilidade; entretanto, é de interesse obter um perfil da variação da permeabilidade ao longo do poço, determinando-se assim, a localização das entradas e saídas da água.

Os poços que apresentaram este tipo de fluxo foram o do Morro dos Cavalos (120), figura F-6 e o da Fazenda Babeco (142), Figura F-7

VI.3 - FLUXOS HORIZONTAIS

A técnica experimental e as considerações teóricas dos resultados obtidos é a mesma já

citada nos poços do vale do Rio Gurguéia

Os poços estudados foram:

- a) - Conceição do Canindé (216) - Figuras F-8 e F-9
- b) - Simplício Mendes (233) - Figuras F-10 e F-11.
- c) - Conceição do Canindé (246) - Figuras F-12 e F-13

todos localizados na Formação Serra Grande.

VII - CONCLUSÕES

Devido ao caráter local e disperso destes ensaios, não foi possível obter conclusões representativas da totalidade dos aquíferos atravessados por estes poços.

A informação obtida é de grande utilidade para os hidrogeólogos. Podemos, entretanto, fazer algumas observações sobre os resultados obtidos.

Dos doze poços do vale do Rio Gurguéia estudados, sete deles se encontram no município de Canto do Buriti. Destes, há dois poços jorrantes, quatro com fluxo vertical descendente e um com fluxo horizontal. Ainda, sem termos dados topográficos exatos, parece que os poços jorrantes penetram a cotas mais profundas que os poços com fluxo vertical e estas cotas mais profundas que os de fluxo horizontal. Supondo que esta zona seja influenciada pela mesma coluna estratigráfica, estes resultados parecem indicar a presença de três aquíferos superpostos, separados entre si por camadas de baixa permeabilidade. Portanto, o poço com fluxo horizontal só penetra o aquífero superficial enquanto que os poços com fluxo vertical penetram até o aquífero intermediário e os dois poços jorrantes chegam ao aquífero profundo confinado. Esta hipótese explicaria satisfatoriamente os fluxos encontrados em todos os poços.

A baixa permeabilidade encontrada no poço 30-05 (Curimatá), pode ser explicada porque, segundo a geologia local, a maior parte do poço deve se encontrar dentro da formação cristalina.

Dos poços surgentes situados no vale do Rio Fidalgo, pode-se dizer que as perdas de água nas camadas superiores dos poços investigados são pequenas ou inexistentes (menores que 10%). A coluna de água que aflora nestes poços produz uma carga muito considerável naquelas camadas. Por conseguinte, os resultados parecem indicar que a permeabilidade destas camadas deve ser extremamente baixa. Perdas no valor citado não parecem justificar um gasto adicional pressuposto pela colocação de revestimento no interior dos poços.

A localização exata das zonas de entrada de água em cada poço constitui uma informação adicional que pode ser utilizada para obter outras conclusões de caráter hidrológico. Por exemplo, a vazão de água surgente que cada poço proporciona está relacionada, diretamente, com a espessura da camada que fornece esta água, com a permeabilidade desta camada e com a altura piezométrica medida a partir da "boca" do poço. Por esta razão, os resultados podem servir de base para obter informações adicionais sobre a permeabilidade do aquífero.

Quanto à técnica utilizada para medir a velocidade de deslocamento da água no aquífero

Serra Grande proporcionou um valor do coeficiente de permeabilidade da ordem de $2,8.10^{-7}$ m/dia. Entretanto, como se tratam de estudos de caráter local e devido também ao reduzido número de poços estudados, esta informação não oferece uma segurança suficiente para garantir uma avaliação exata dos recursos do aquífero. Para se ter essa segurança, teria sido necessária a realização de ensaios em um elevado número de poços.

Resumindo, poderíamos dizer que os estudos dos parâmetros dos aquíferos, com técnicas radioisotópicas, quando feitas em uma rede sistemática sobre toda a área pesquisada, juntamente com informações geológicas e hidrogeológicas, poderiam proporcionar uma rápida e boa caracterização das formações aquíferas, proporcionando assim um aproveitamento racional e econômico do potencial das águas subterrâneas.

ABSTRACT

The possible use of water from the Gurgueia and Fidalgo basins, at Piauí, for irrigation purposes, was studied by the OESA association, TECNOSOLO, OTI and EPTISA under request of DNOCS.

In this work, radioisotopical techniques were used, not only because they are cheap, but also because they give fast and reliable results. These techniques serve as a complementation of more general studies realized with conventional techniques.

Using different techniques, a radioactive tracer (131 I in iodide form) was injected in the wells. By detecting the water radioactivity, it was possible to determine:

- a) - the appearing vertical fluxes of the artesian wells;
- b) - the localization and measurement of vertical fluxes in non-artesian wells;
- c) - the localization and measurement of the horizontal fluxes;
- d) - the effective porosity in connection with pumping assays.

Along the Rio Gurgueia basin, three (3) artesian wells (Cristino Castro, Canto do Buriti and Brejo) and seven (7) non-artesian wells, with vertical ascending and descending fluxes (Jerumenha, Bertolândia, Canto do Buriti, Eliseu Martins, Laranjeiras and Curimatá) were studied. At the Fidalgo basin, were studied five (5) artesian wells (Malhadinha, Lagoa Comprida, Alto Novo, Malhada de Dentro and Cerro Quebrado) and two (2) non-artesian wells but with vertical fluxes (Morro dos Cavaleiros and Baboso). It was measured horizontal fluxes in three (3) wells (two (2) at Conceição do Canindé and one (1) at Simpliciano Mendes) and by the knowledge of the underwater velocity, at the Serra Grande aquifer, the permeability coefficient was calculated.

The theoretical aspects of the radioisotopical techniques used and the obtained results were also discussed.

RÉSUMÉ

Dans les études de reconnaissance pour irrigation, dans les vallées des Rivières Gurgueia et Fidalgo, Piauí, réalisées par le complexe OESA-TECNOSOLO-OTI-EPTISA à la demande du DNOCS, des techniques radioisotopiques ont été utilisées pour la détermination de caractéristiques des aquíferes, non seulement par soucis d'économie et pour obtenir des résultats rapides et dignes de foi, mais pour servir d'appui complet aux mesures réalisées à l'aide de techniques conventionnelles.

En utilisant des techniques différentes, de l'iode radioactif (131 I sous forme de ion-iodure) a été injecté dans les puits, et en détectant la radioactivité des eaux, on a déterminé: a) les flux verticaux dans les puits artésiens; b) la localisation et la mesure des flux verticaux dans des puits non artésiens; c) la localisation et la mesure des flux horizontaux; d) la porosité efficace en connection avec les essais de pompage.

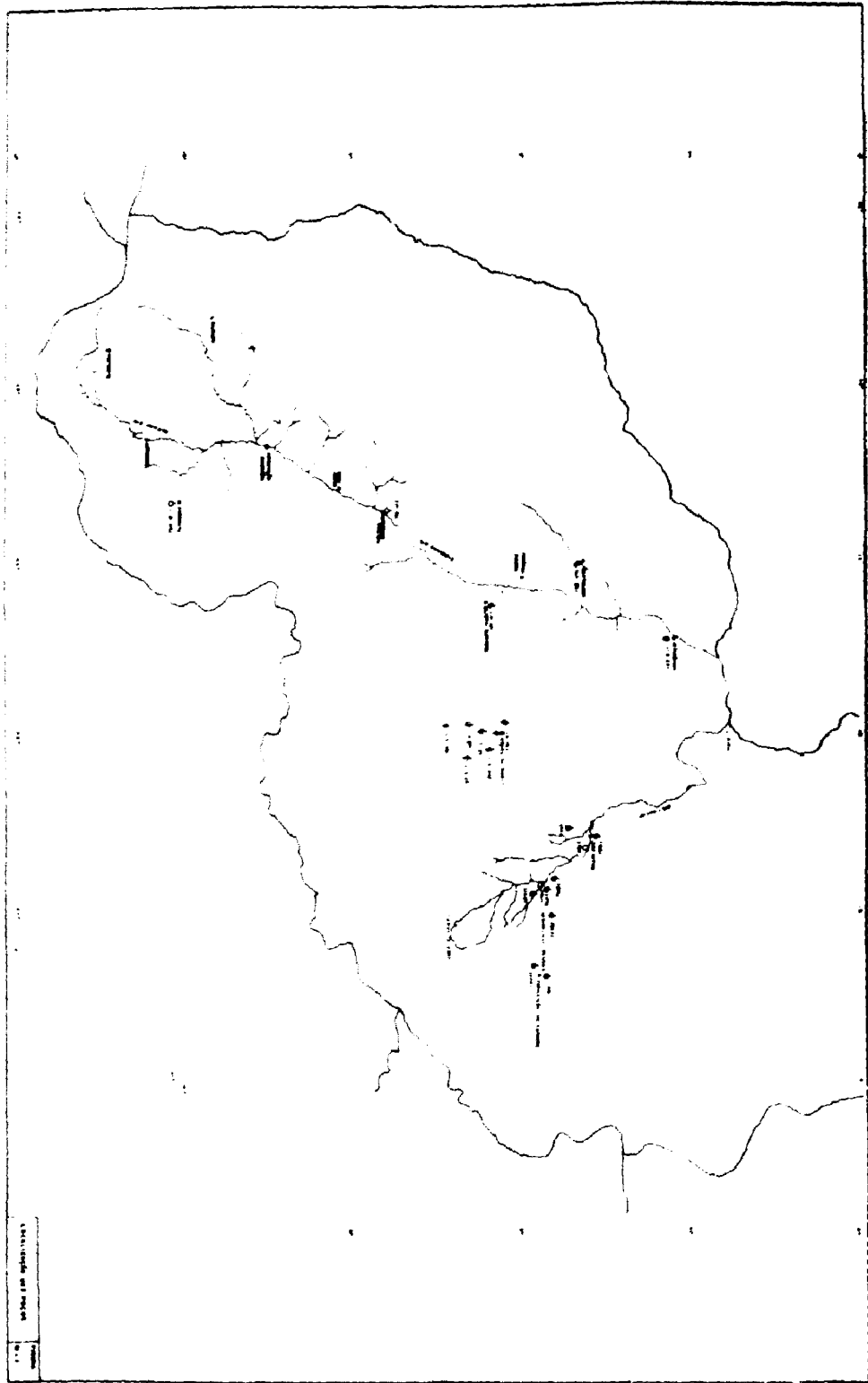
Le long du bassin de la Rivière Gurgueia, on a étudié trois (3) puits artésiens (Cristino Castro, Canto do Buriti et Brejo) et sept (7) puits non artésiens, avec flux verticaux ascendants et descendants (Jerumenha, Bertolândia, Canto do Buriti, Eliseu Martins, Laranjeiras et Curimatá). Dans le bassin de la Rivière Fidalgo on a étudié cinq (5) puits artésiens (Malhadinha, Lagoa Comprida, Alto Novo, Malhada de Dentro et Cerro

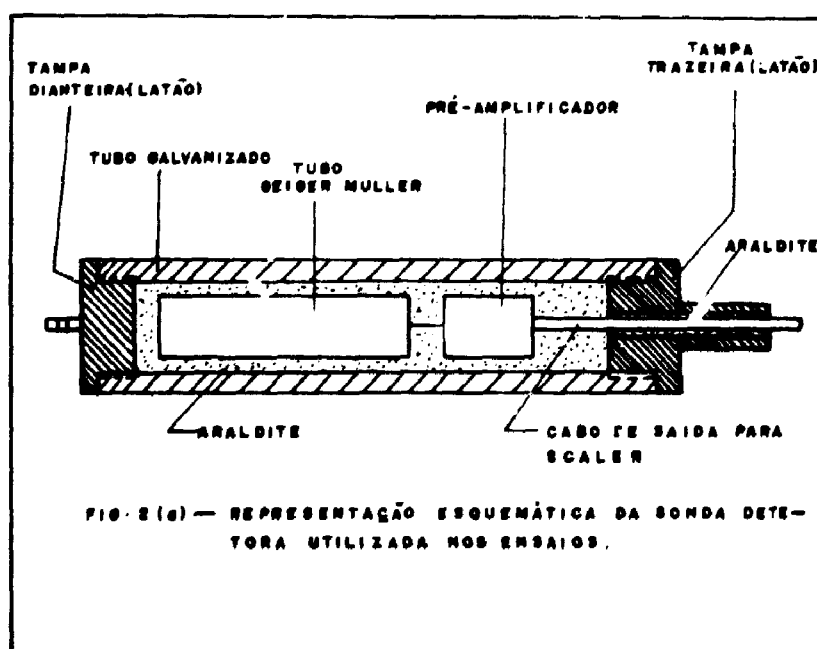
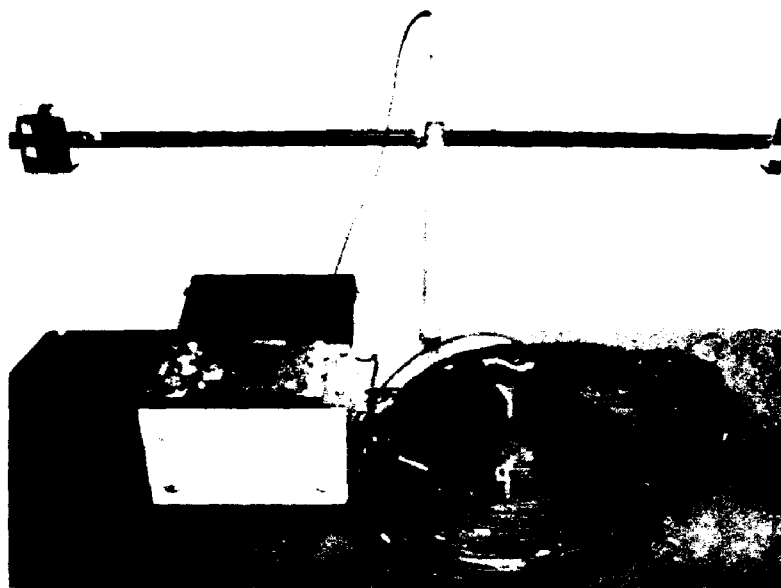
Quebrado), et deux (2) puits non artésiens mais avec des flux verticaux (Morro dos Cavalos et Babeco). On a mesuré les flux horizontaux dans trois (3) puits (deux (2) à Conceição do Canindé et un (1) à Simplicio Mendes) et à partir de la connaissance de la vitesse de déplacement de l'eau, dans l'aquifère Serra Grande, on a calculé le coefficient de perméabilité.

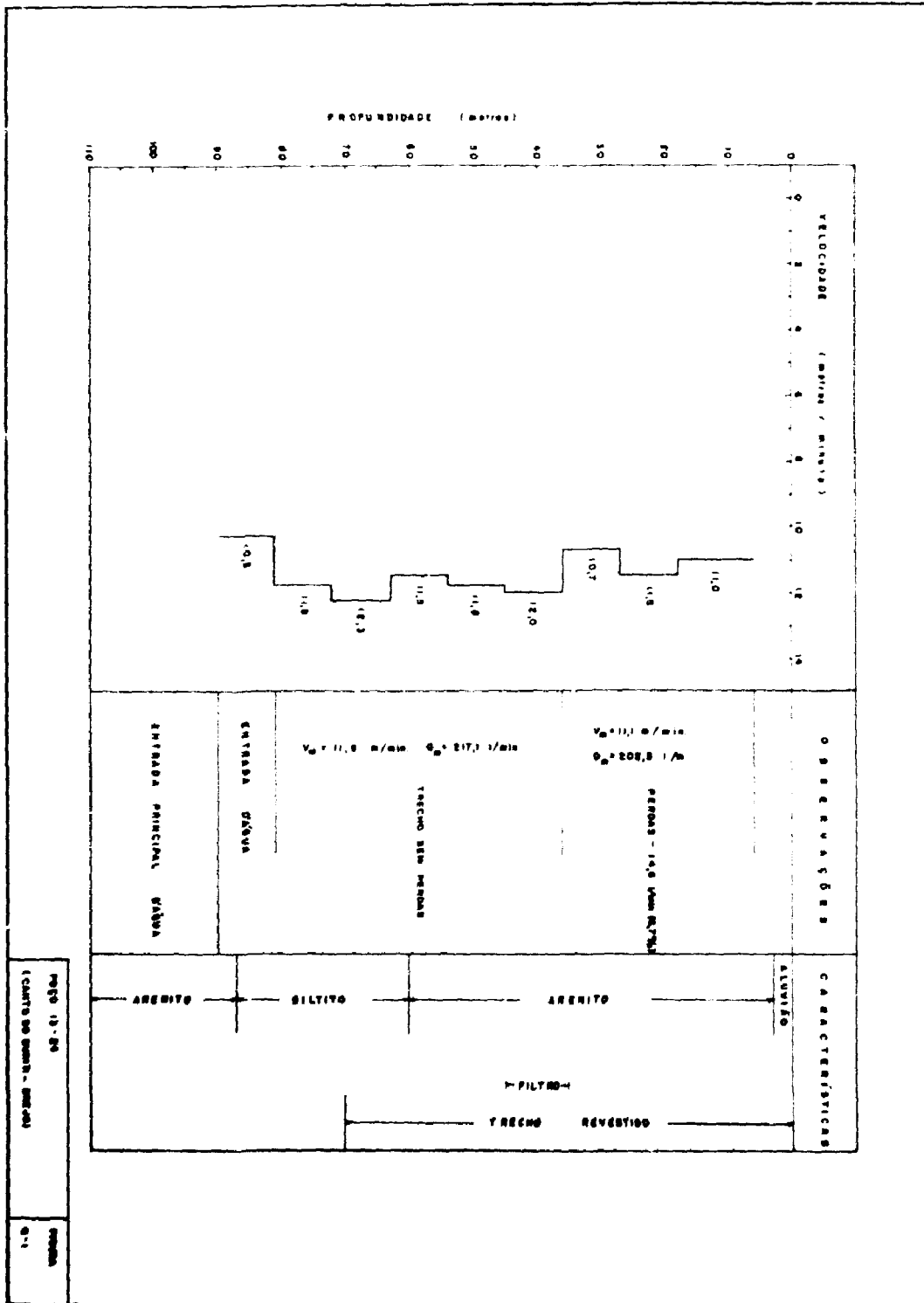
Dans ce travail on discute aussi les aspects théoriques des techniques radioisotopiques utilisées et les résultats des mesures.

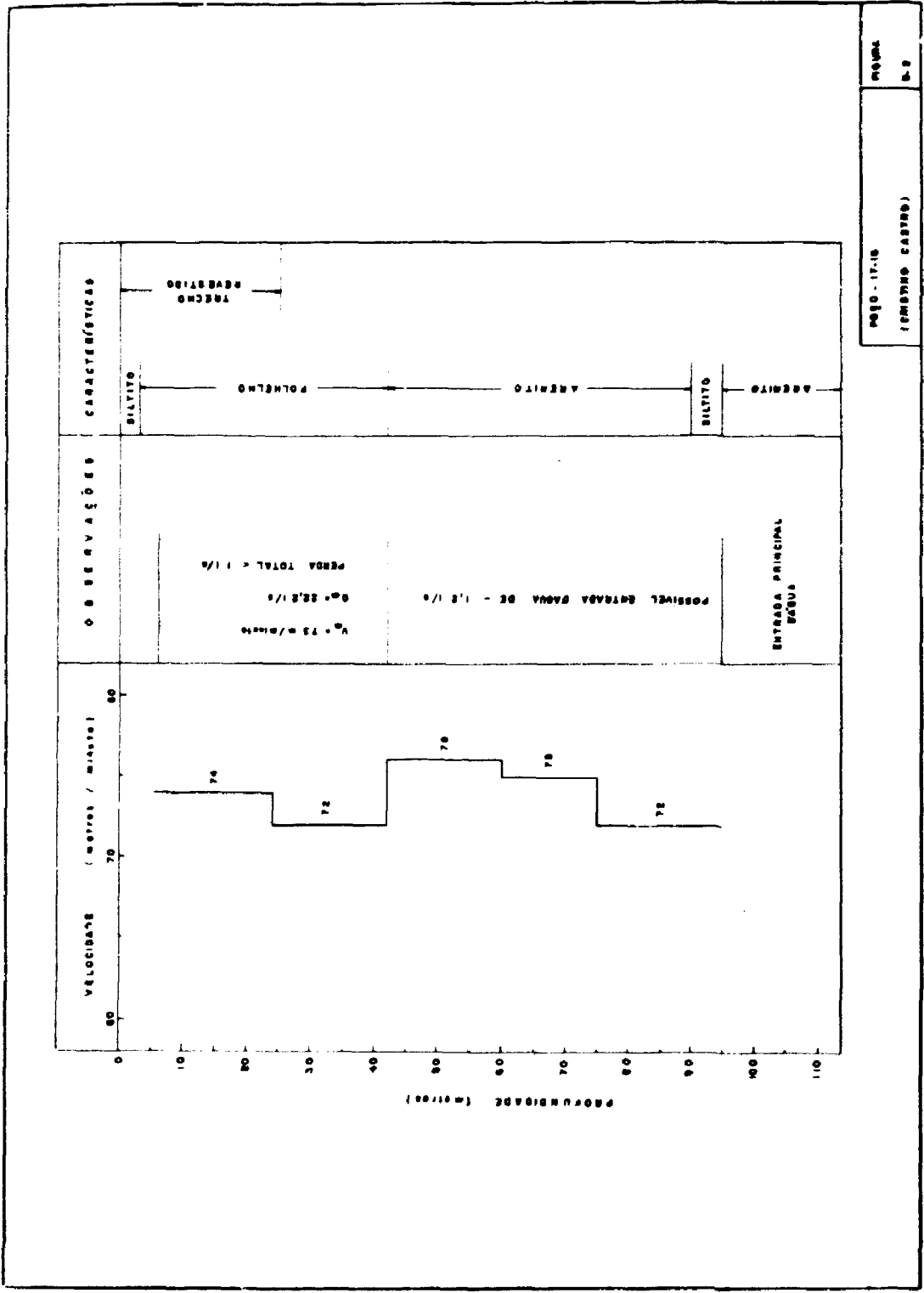
BIBLIOGRAFIA

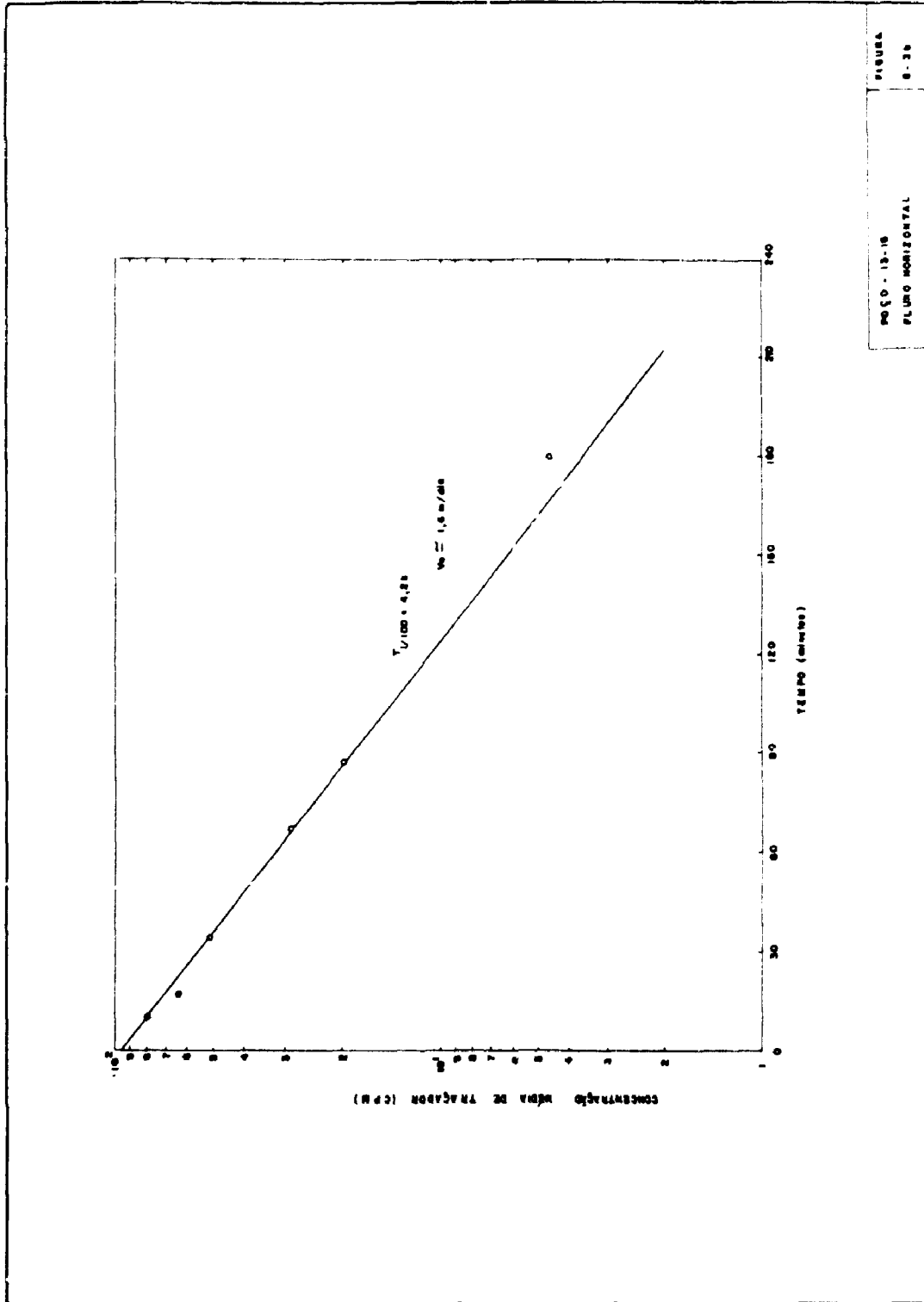
- 1 - Payne, B. "Principles of the use of environmental tritium" Int. Reg. Training Course on the Application of Isotopes Techniques in Hydrology - São Paulo - Brasil 1969.
- 2 - Sauzay, G. "Theoretical and Mathematical Approach or Criticism of Concepts Used in Tracer Techniques" Int. Reg. Train. Cours. on the Applic. of Isot. Techn. in Hidr. "São Paulo, Brasil, 1969.
- 3 - Halevy, E. "Borehole Dilution Techniques: A critical Review Isotopes in Hydrology - Proc. of Symp. Isot. in Hydrol., 1966, Viena, IAEA.
- 4 - Plata Bedmar, A and all "Aplicación de la Técnica del Pozo Unico Mediante El Mercado de Toda la Coluna Piezométrica" - Proc. of Symp. Isot. in Hydrol. ", Viena 1966. IAEA.

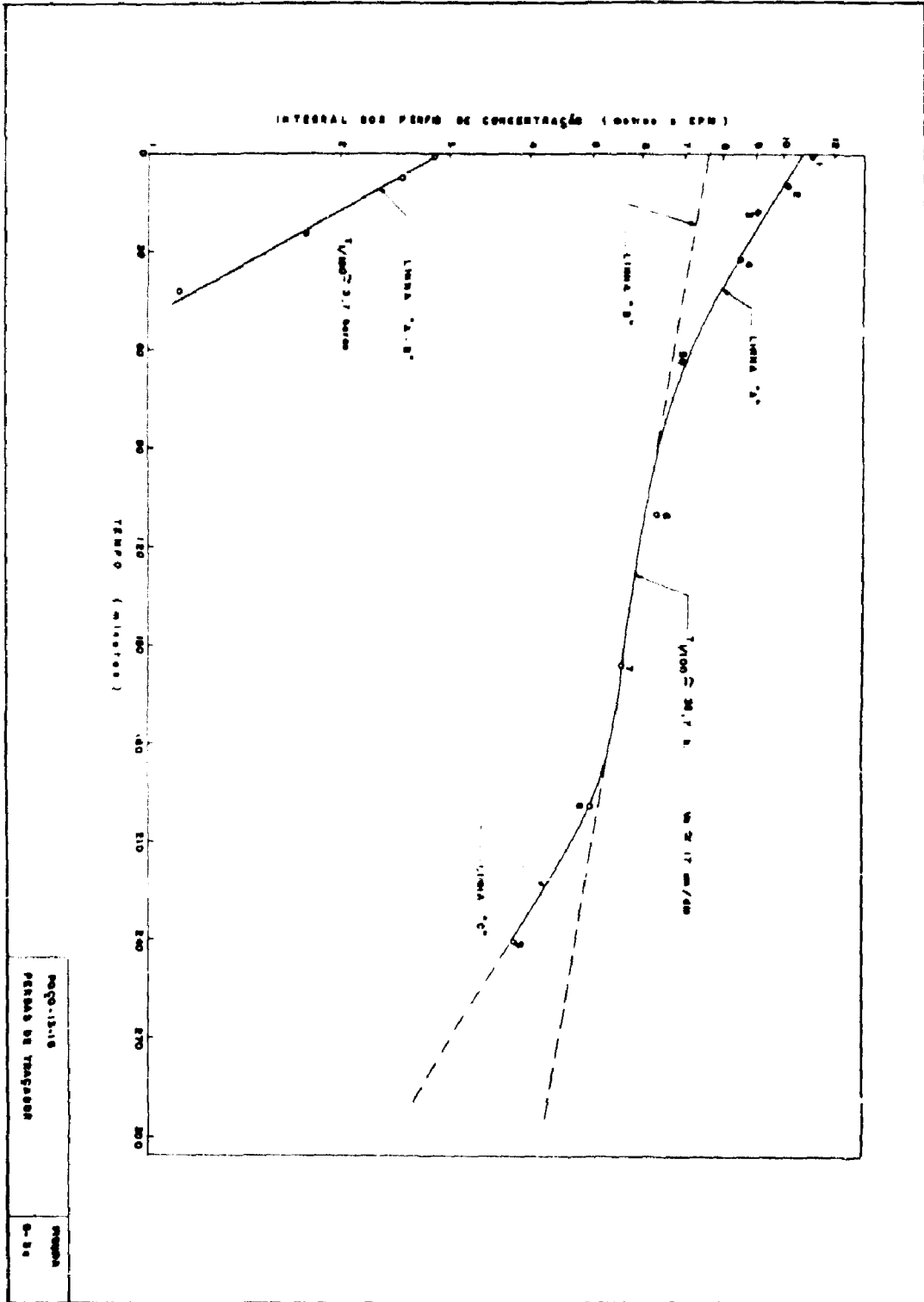


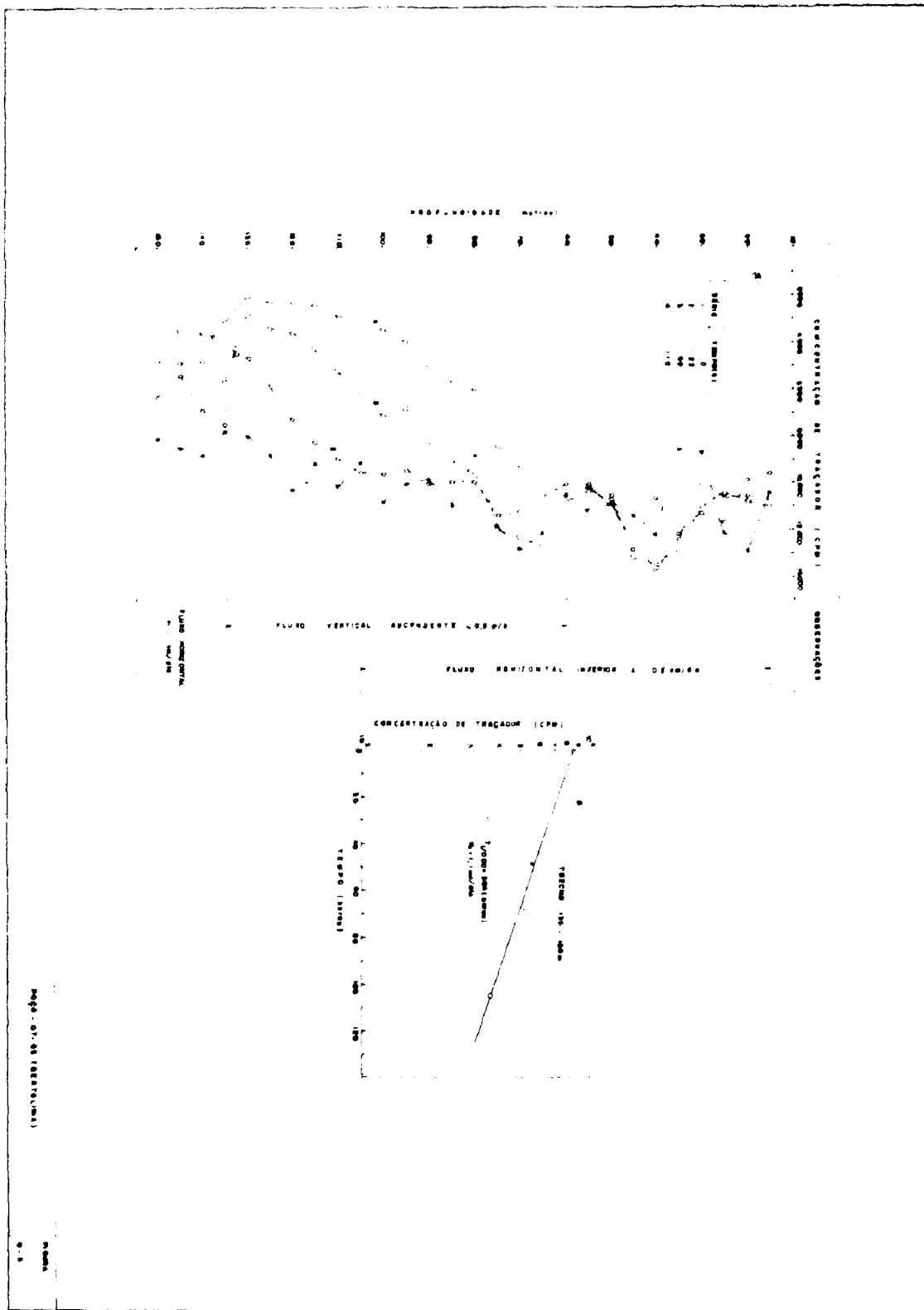


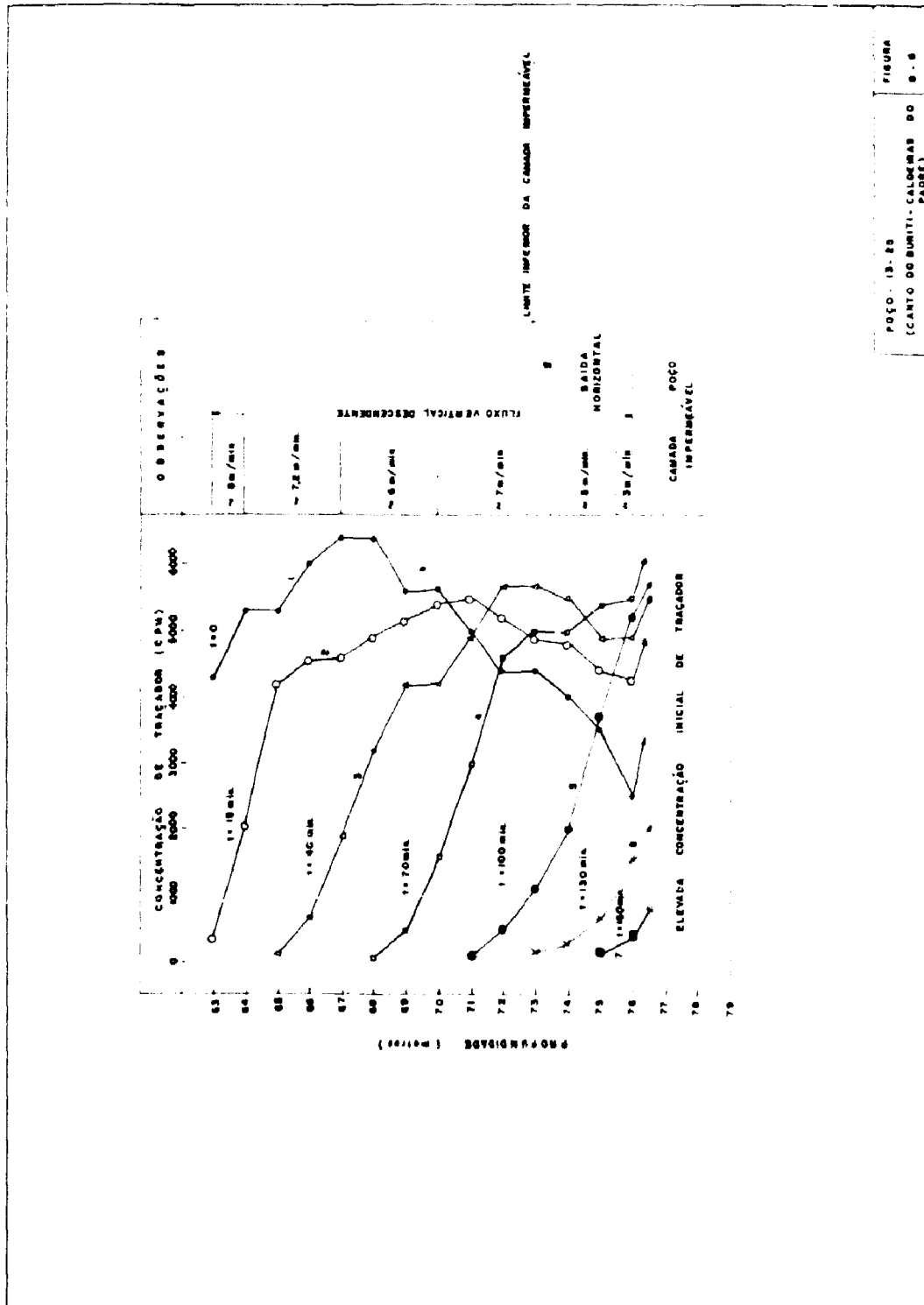


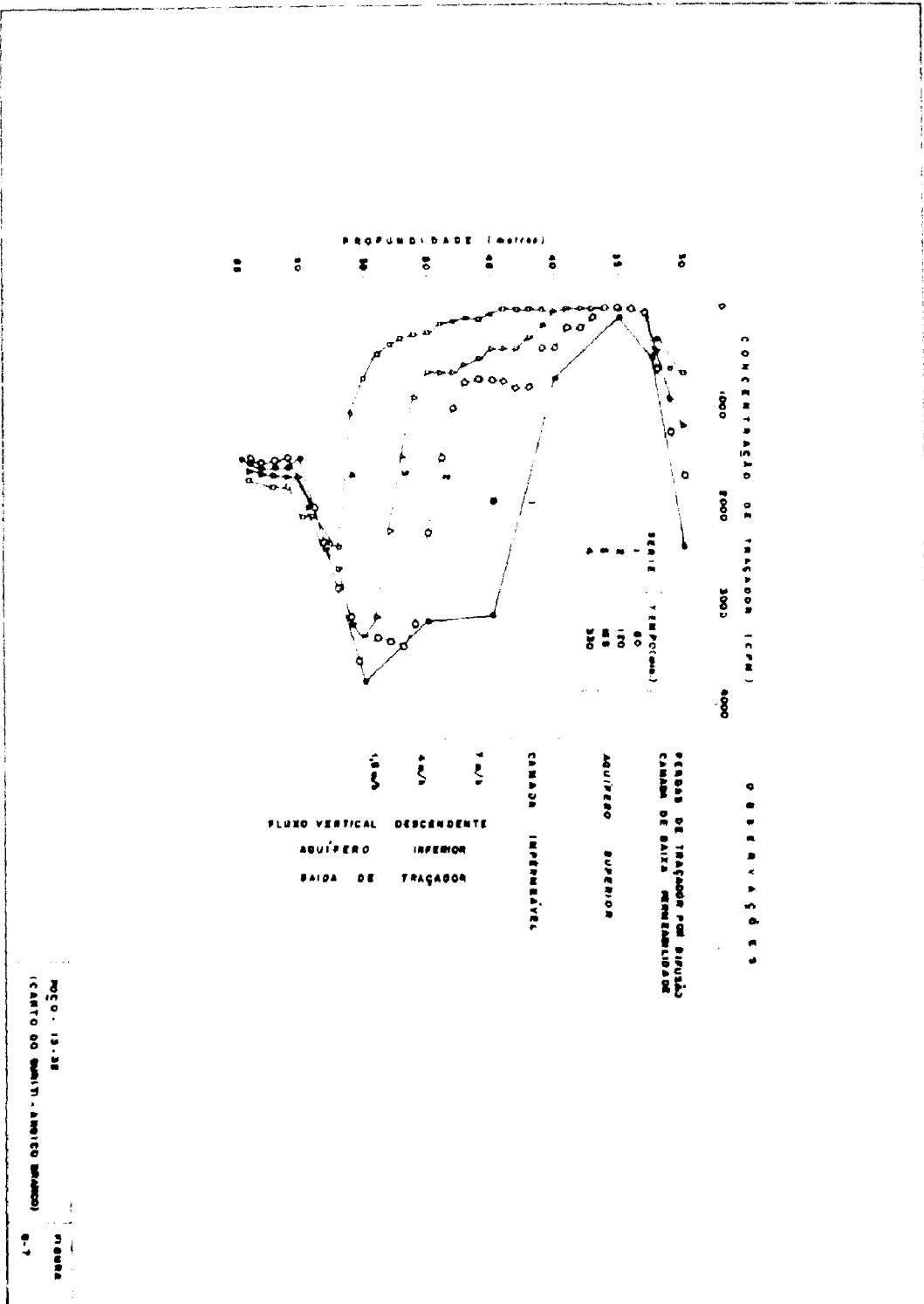


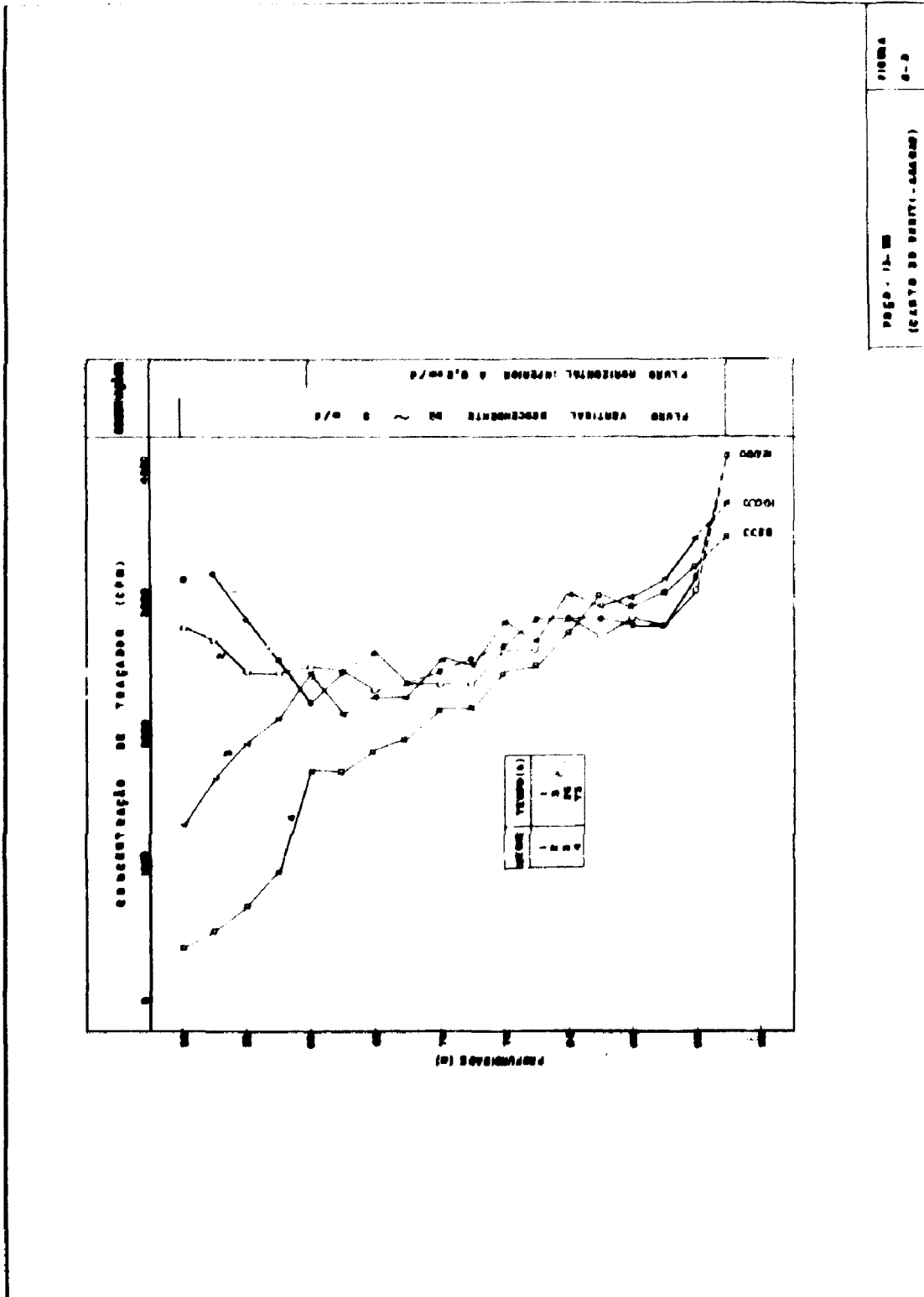




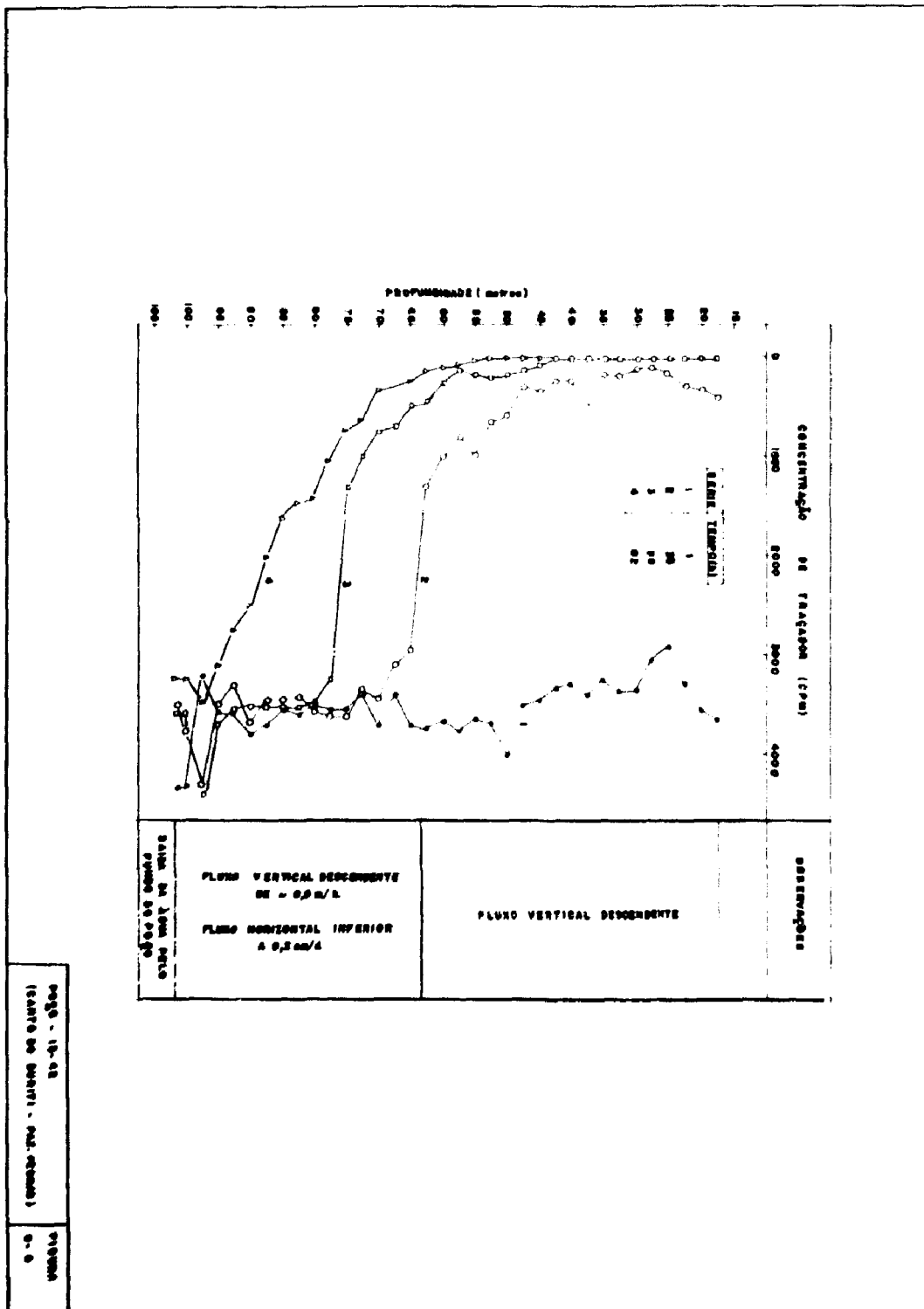


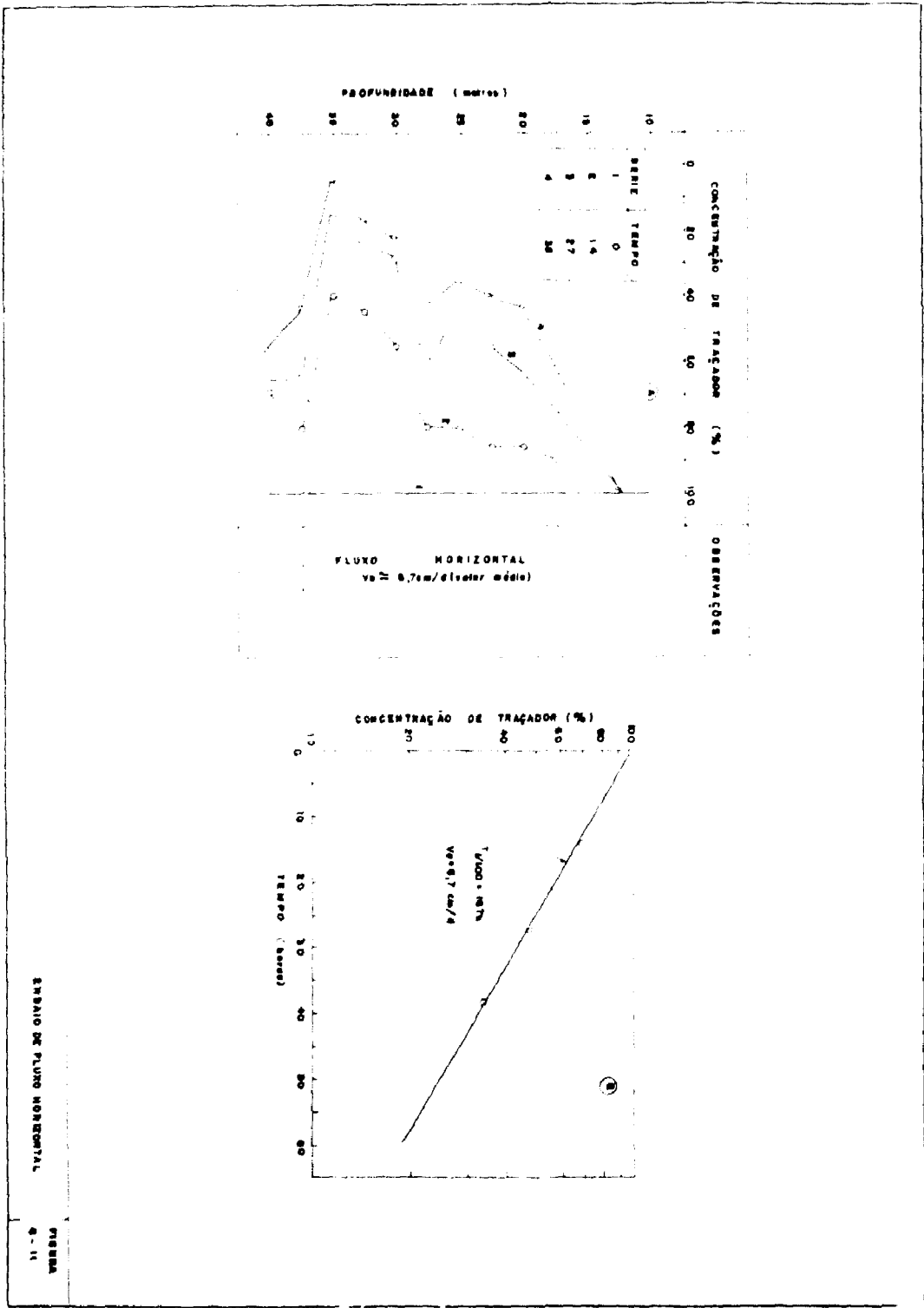






Página 12-11
PLANO ANUAL DE RECEBIMENTO DE ...





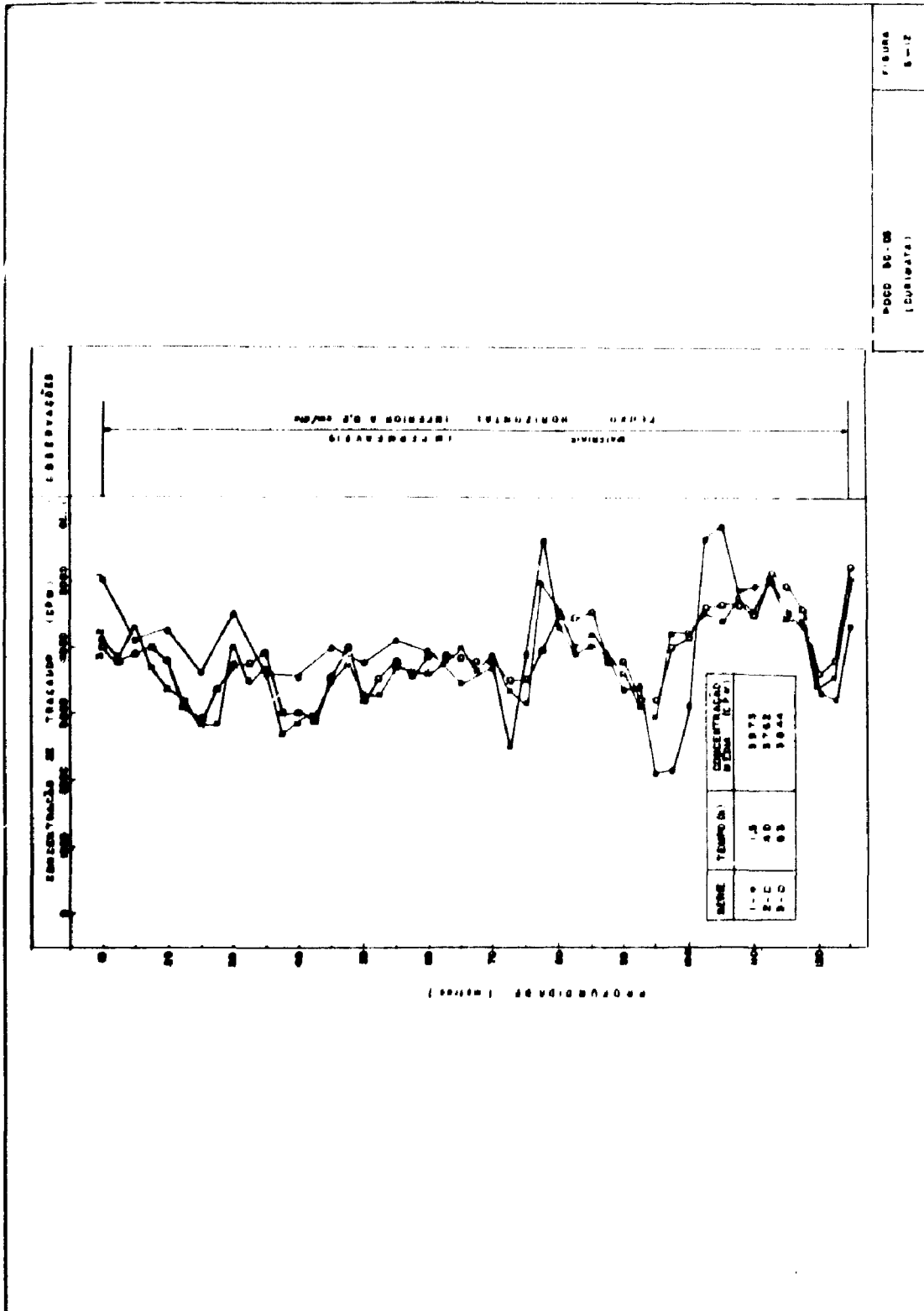
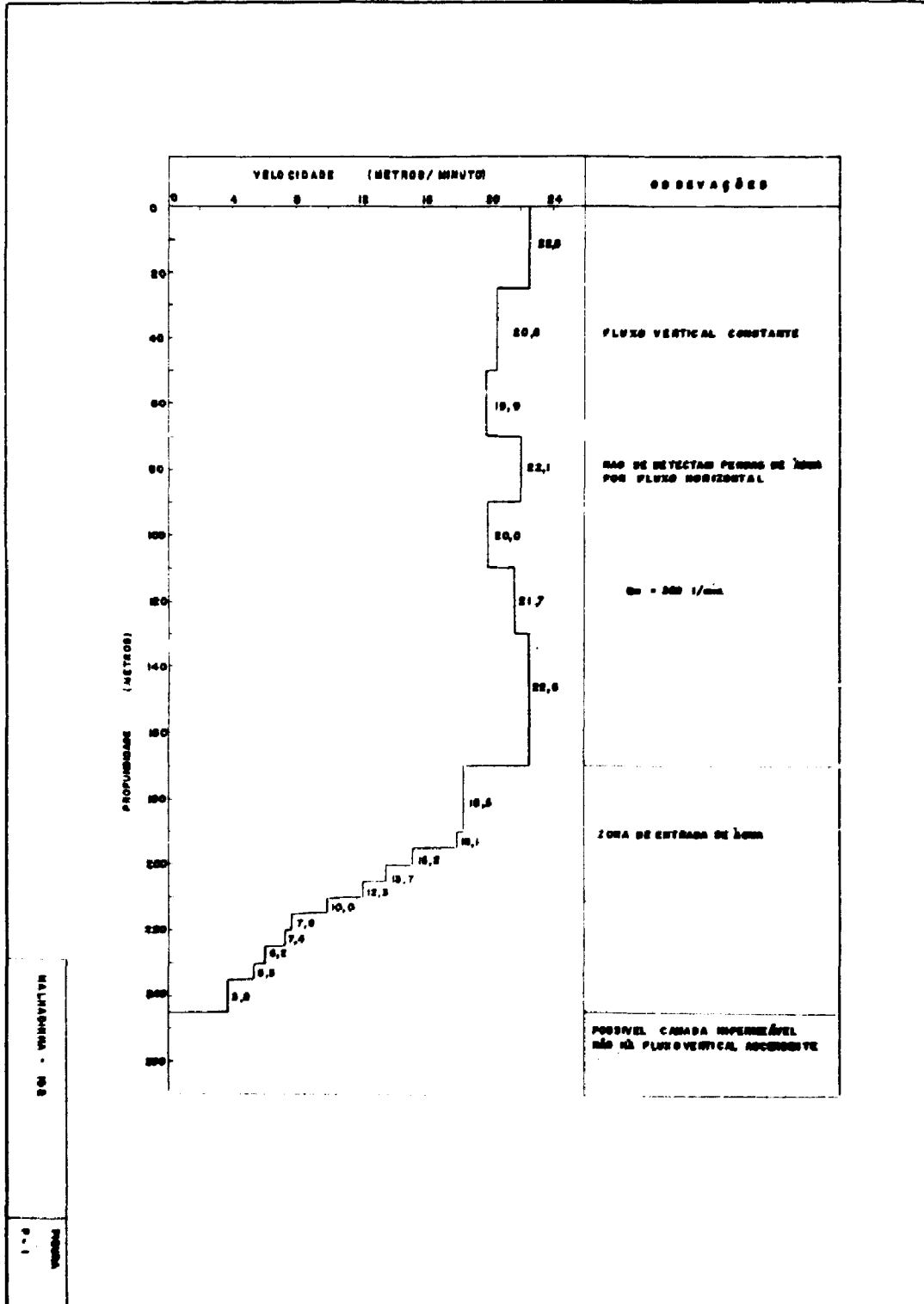


FIGURA 8-12
 POCO 90-08
 (Continúa)



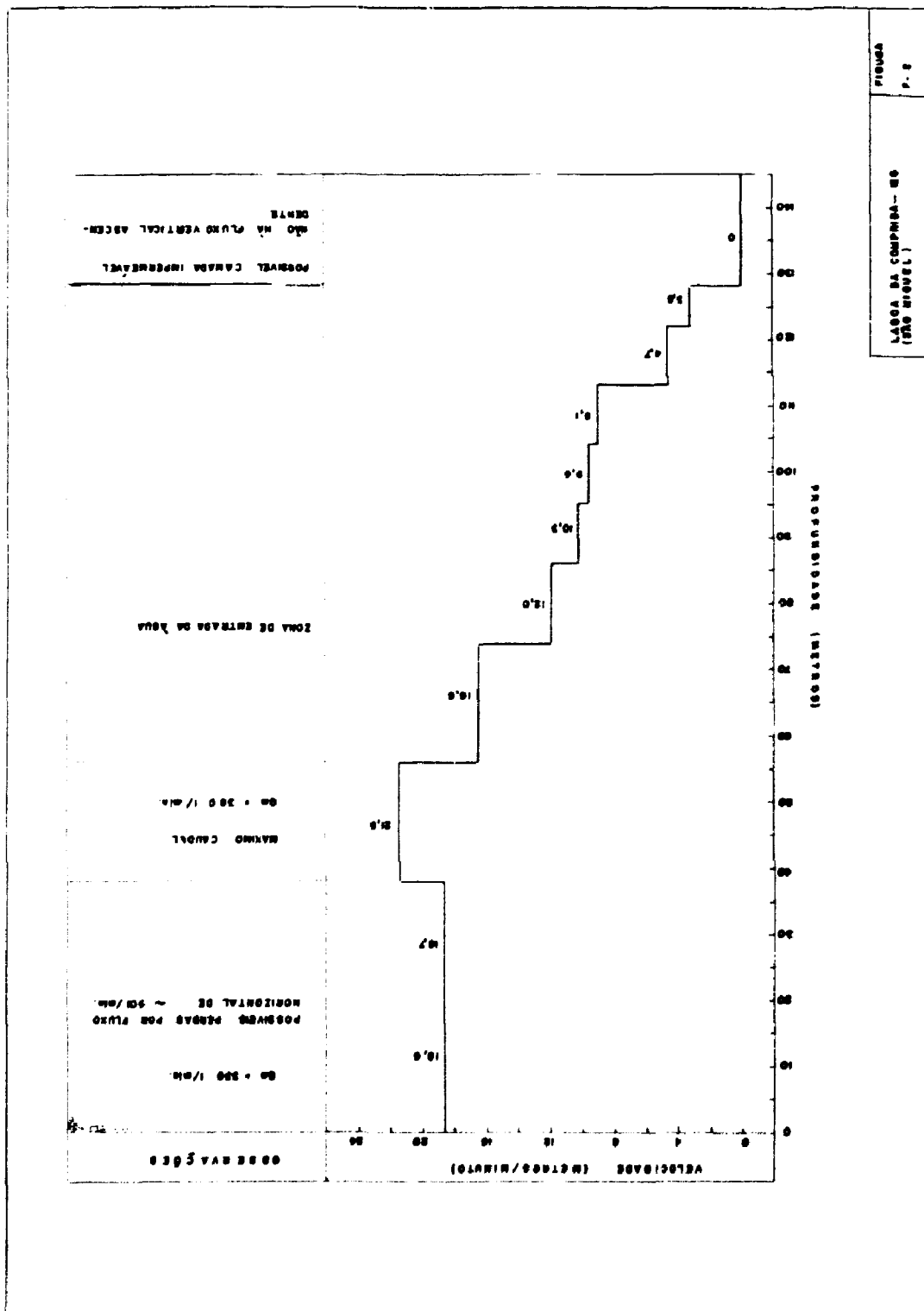
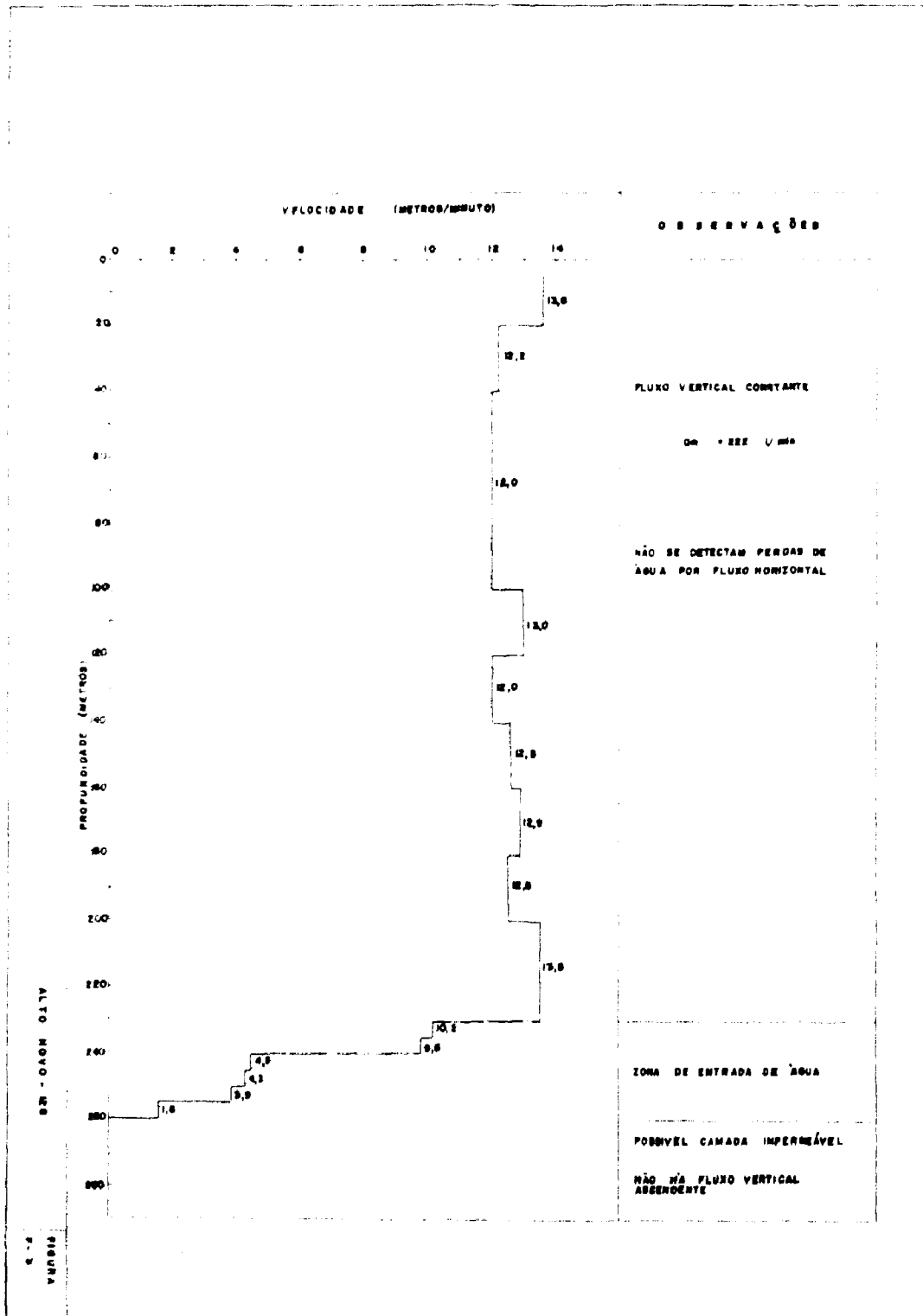
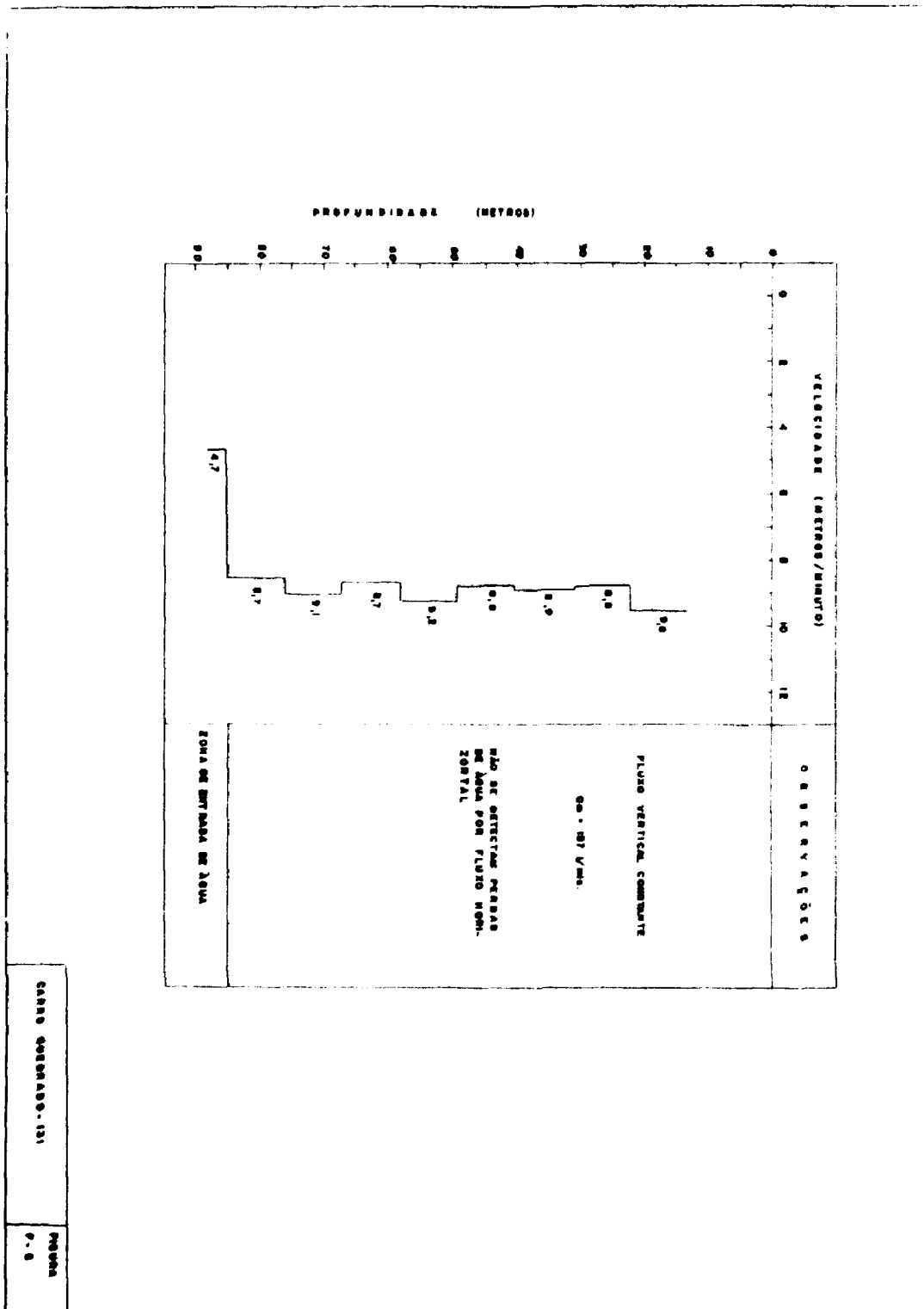
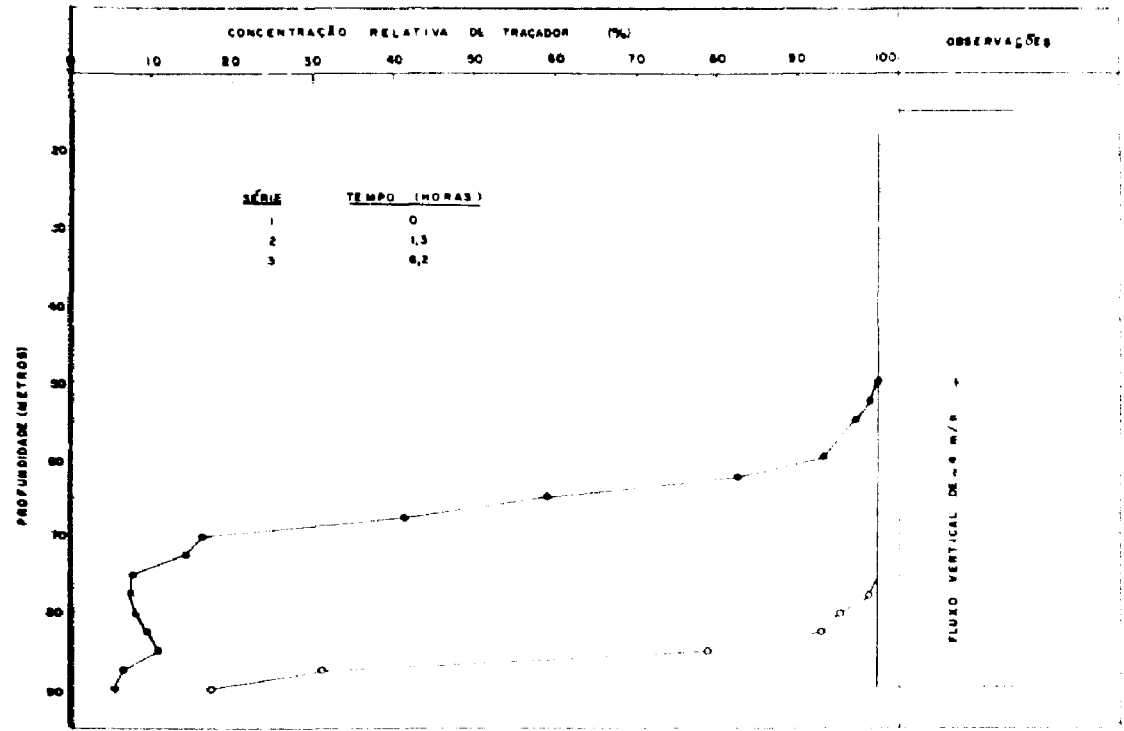


FIGURA
P. 8
LARGA DA COMPRESA - 80
(1000 METROS)



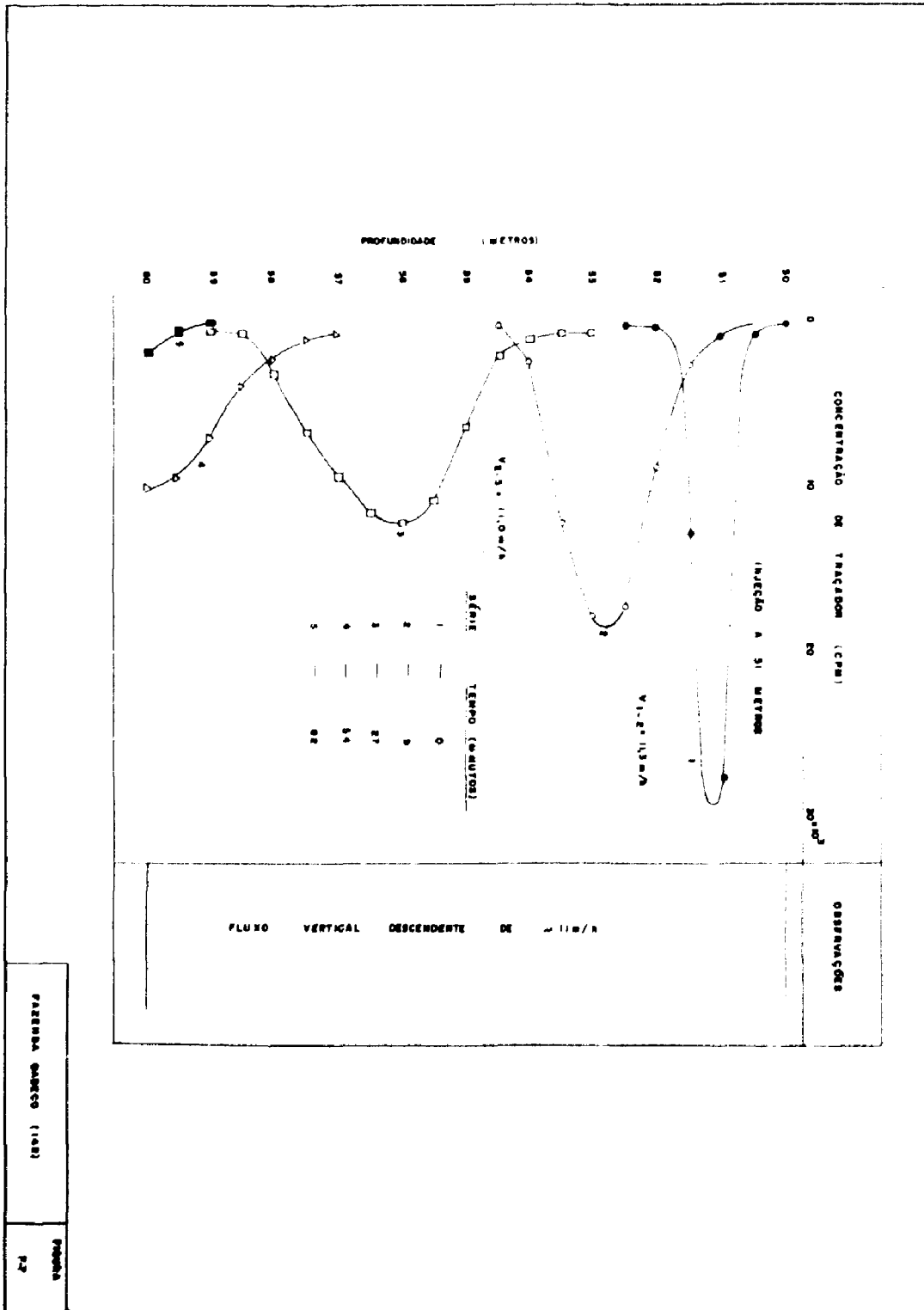


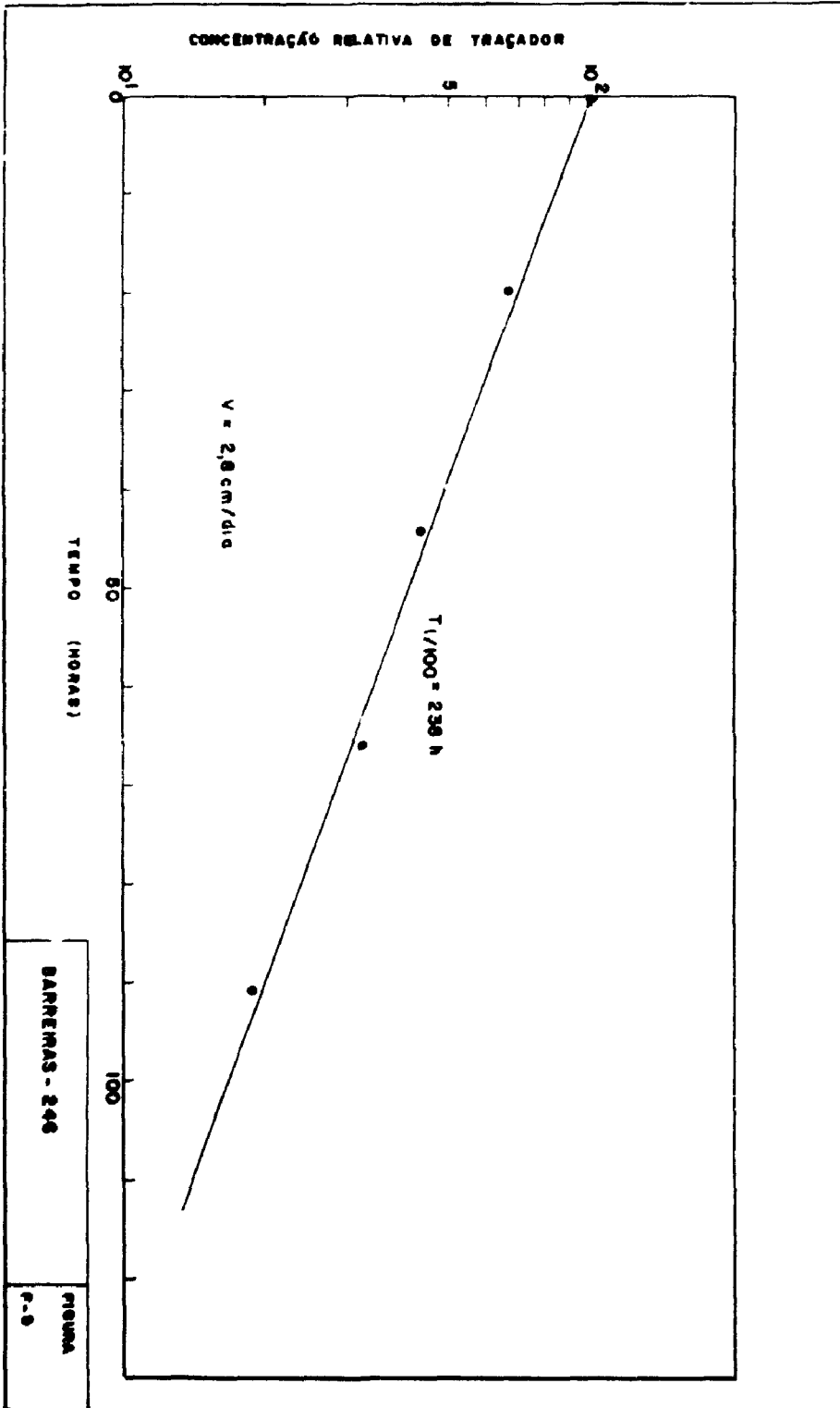


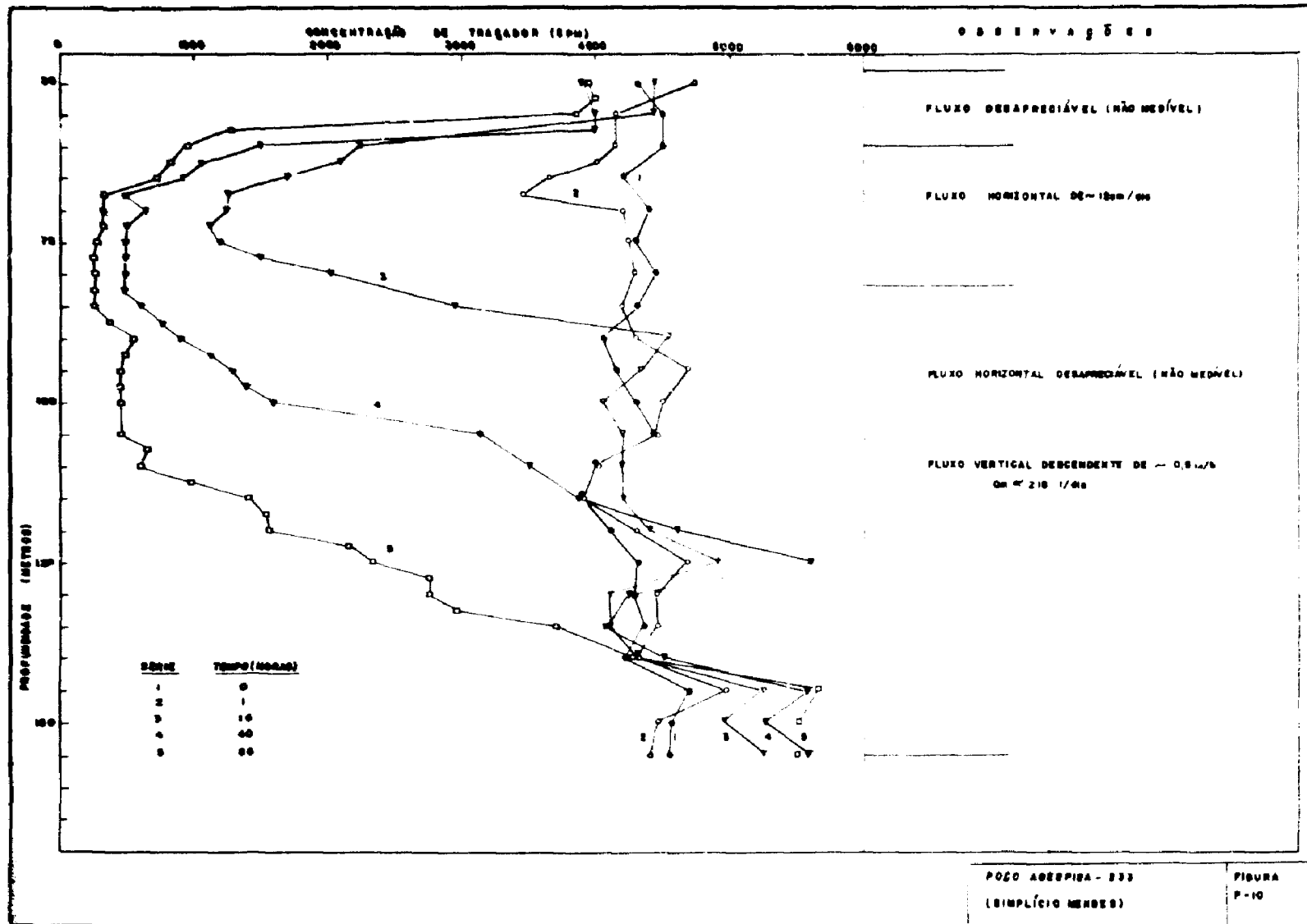
MORROS DOS CAVALOS (120)

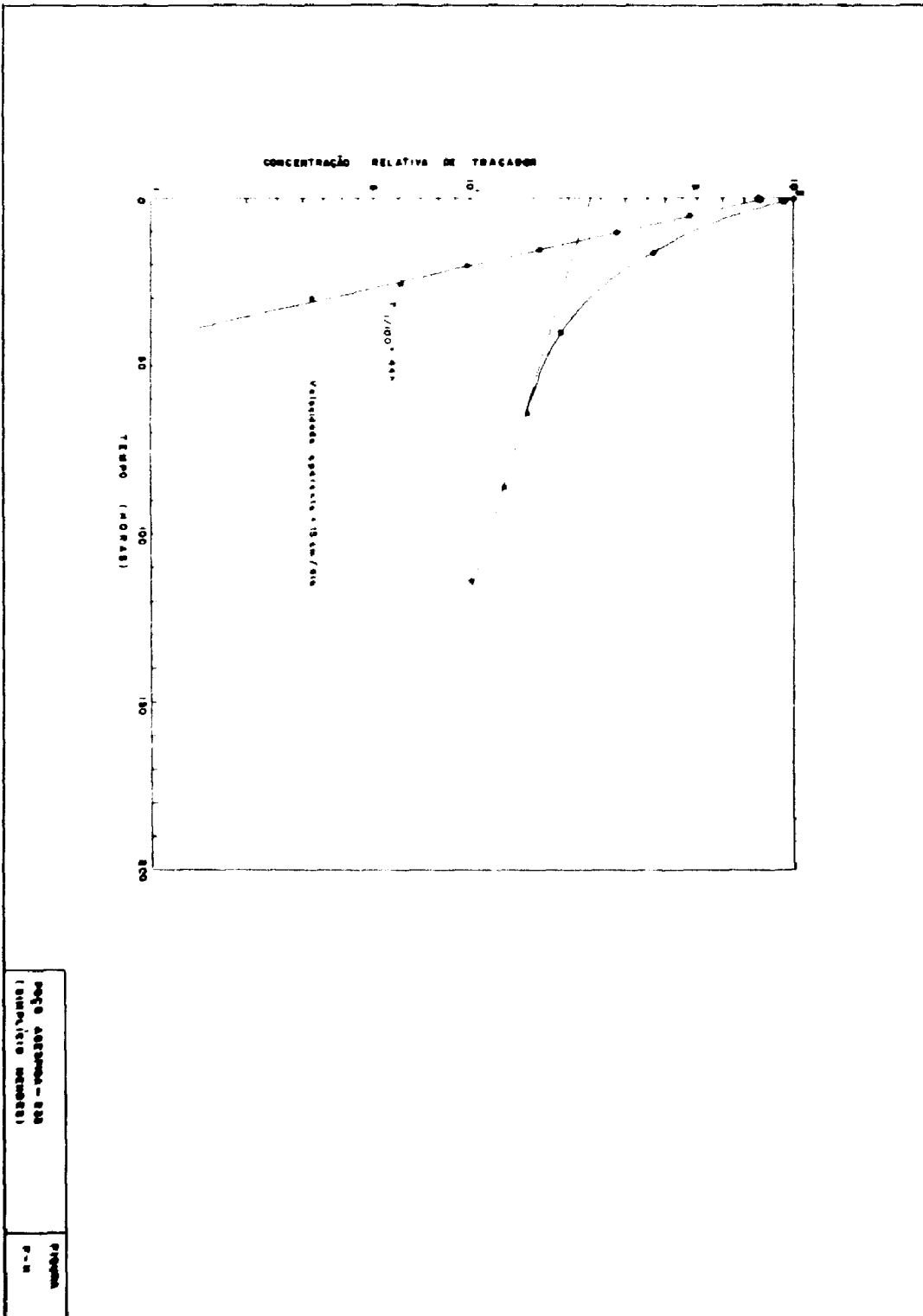
FIGURA

F-5









para avarias e/ou para o motor

Fig. 1

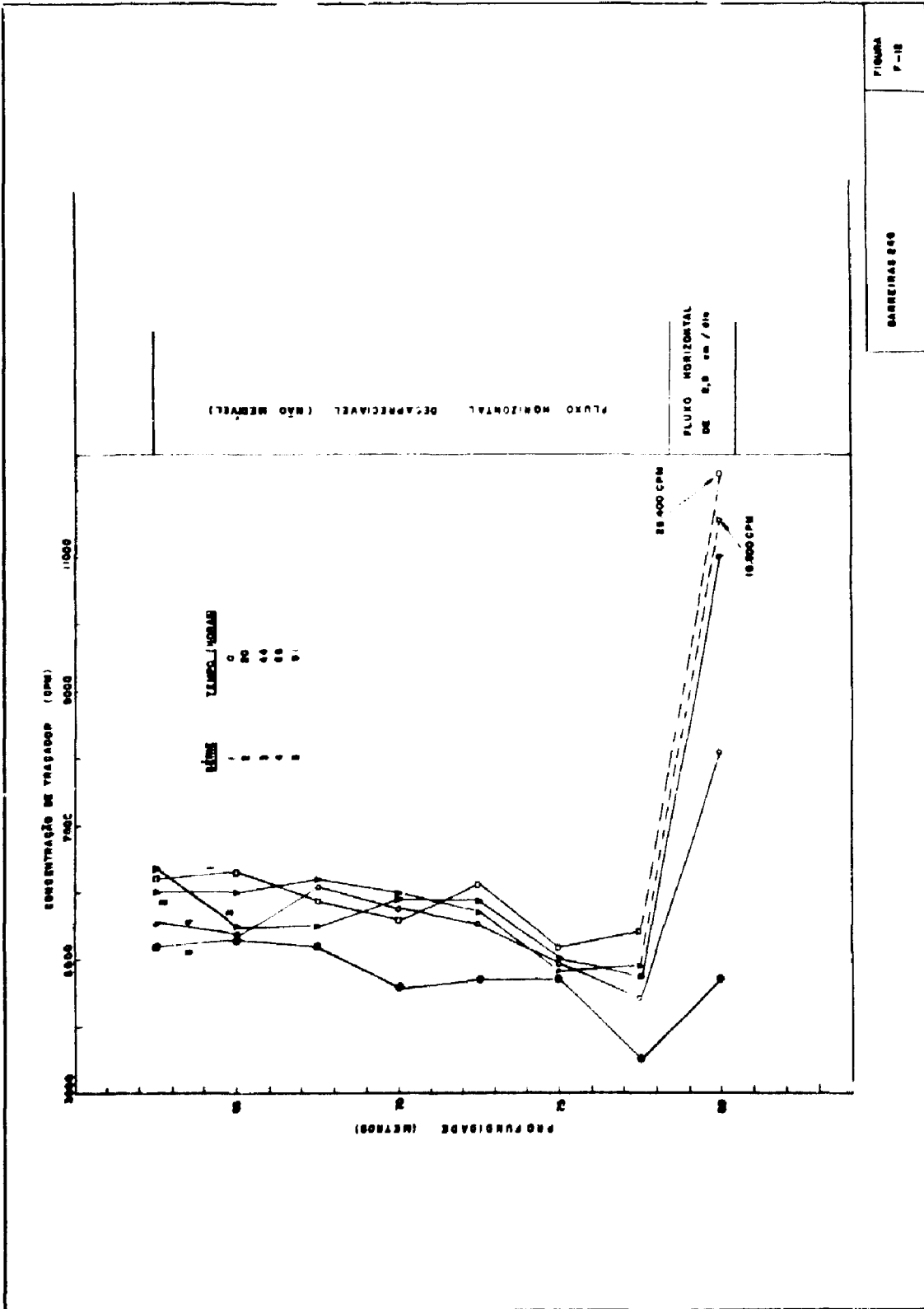


FIGURA 7-18

SARRIENS 800

