

Modelo para a Avaliação do Perfil Vertical de Oxigênio Dissolvido na Represa Billings*

ALCIBIADES PACHECO DE TOLEDO JR. (**)
HIDEO KAWAI (***)

RESUMO

Uma das maiores dificuldades para o estabelecimento de um modelo matemático, baseado nos teores de oxigênio dissolvido na represa Billings, consiste na apreciável variação deste elemento na coluna vertical da água.

O presente estudo oferece subsídios para a solução dessa dificuldade, através da utilização da técnica estatística de regressão múltipla entre o perfil vertical de oxigênio e vários fatores ambientais.

Tal solução fornece um dado fundamental para orientar o estabelecimento de regras de operação do sistema Light, especificamente para a represa Billings.

INTRODUÇÃO

Atualmente, em conseqüência do lançamento de considerável quantidade de esgoto sanitário e despejos industriais na represa Billings, provenientes da metrópole de São Paulo, a poluição das águas neste manancial formado pelo sistema hídrico do rio Tietê e rio Grande (principalmente no seu corpo central) atingiu um nível alarmante, tendo o mesmo se transformado numa lagoa, de depuração de materiais poluentes.

Entretanto, devido à sua localização próxima à cidade de São Paulo e como também, pela escassez de mananciais abastecedores nesta região, a represa Billings assume uma posição importante no sentido de seu aproveitamento, não só para recreação e balneabilidade, mas para fonte de abastecimento público de águas para a população da Grande São Paulo, foi criada recentemente a Comissão Especial do Alto Tietê, subordinada ao Ministério das Minas e Energia, visando à melhoria das condições sanitárias de sistemas

hídricos da bacia do Alto Tietê. Neste sentido, foi iniciado o estudo global na represa Billings, em 1975, com o objetivo de estabelecer os vários níveis de qualidade de águas em seus aspectos sanitários e ecológicos, relacionados com o lançamento das cargas poluidoras e com as condições de operação desse manancial.

Um dos parâmetros estudados no presente trabalho foi o oxigênio dissolvido. Mas os resultados dos levantamentos efetuados anteriormente demonstraram que as variações de concentrações de oxigênio dissolvido em função da profundidade são bastante significativos, o que nos levou a concluir que é necessário desenvolver um processo adequado para estabelecer a relação entre as variações de oxigênio dissolvido e outros fatores que interferem nas concentrações deste elemento. Assim, para permitir que se trace o perfil de oxigênio dissolvido na represa Billings, em forma adequada e que represente as concentrações de oxigênio não só na superfície, como também em profundidade, foi desen-

(*) Trabalho apresentado ao 9.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Belo Horizonte, julho de 1977.

(**) Físico da Gerência de Pesquisas Hidrobiológicas da Superintendência de Pesquisa — Cetesb.

(***) Limnologista da Gerência de Pesquisas Hidrobiológicas da Superintendência de Pesquisa — Cetesb.

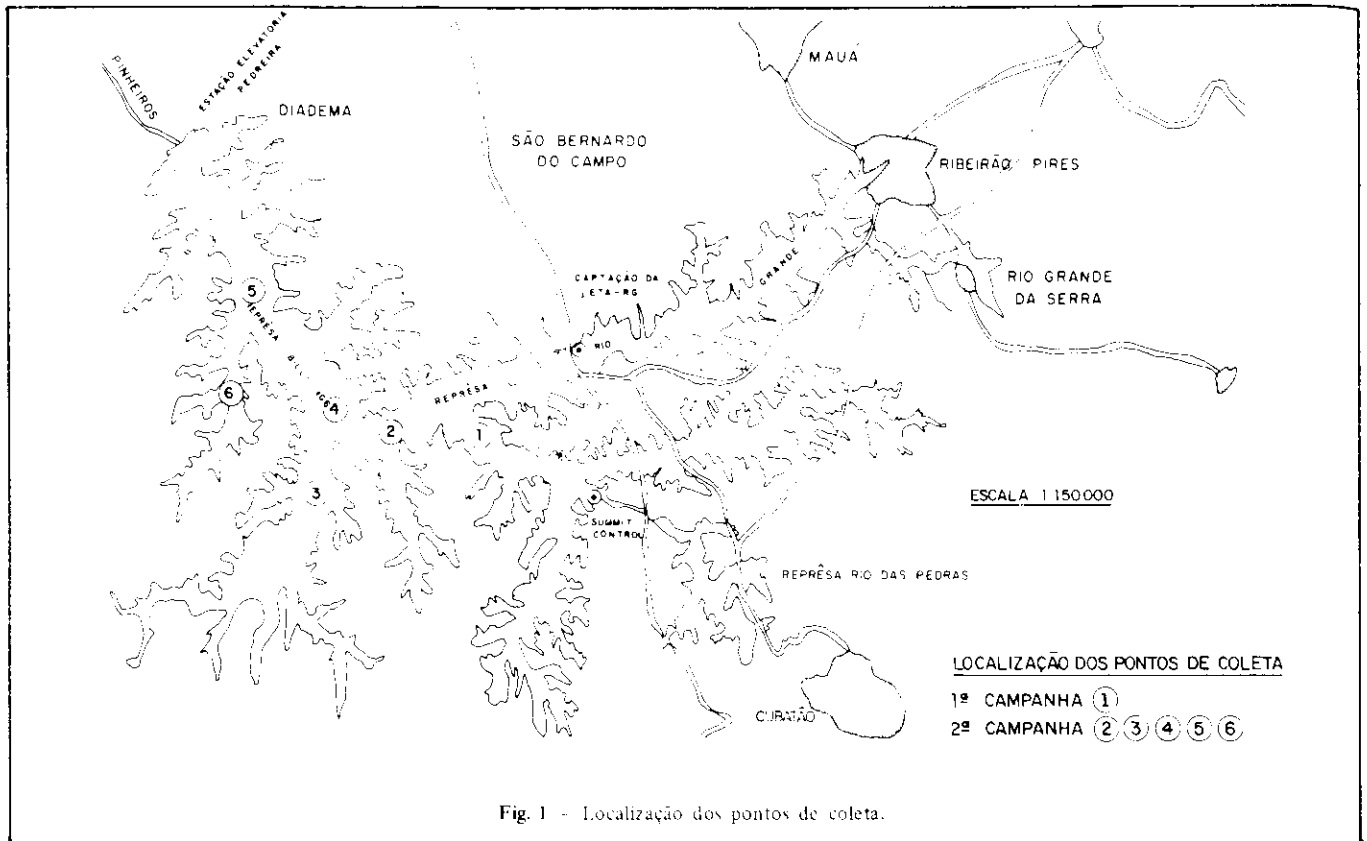


Fig. 1 - Localização dos pontos de coleta.

volvido um modelo estatístico, o qual demonstrou aplicabilidade satisfatória nas condições reais.

A seguir, serão apresentados os detalhes dos estudos para o estabelecimento desse modelo estatístico.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O MECANISMO DA VARIAÇÃO VERTICAL DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO

Entre os vários parâmetros físicos químicos e biológicos que determinam a qualidade da água de um rio, lago ou represa, o oxigênio dissolvido é considerado um dos parâmetros mais significativos.

A avaliação da variação longitudinal do OD em curso de água pode ser feita através de modelos matemáticos bem conhecidos, em que se considera o balanço entre os fatores oxigenadores e desoxigenadores. A reaeração e a ação fotossintética do fitoplâncton e o consumo de O₂ através da degradação da matéria orgânica pela ação bacteriana são alguns dos termos desse balanço. Estes, por sua vez, dependem da múltipla interação de condições climáticas e ambientais, o que em geral ocorre de forma bastante complexa. Além do mais, essa interação não ocorre com igual intensidade da superfície ao fundo da massa líquida, mas sim de forma mais efetiva nos primeiros metros da camada superior (epilímnio).

Como resultado, a distribuição vertical da concentração do oxigênio dissolvido não é uniforme em toda a coluna líquida, apresentando muitas vezes altas concentrações nas camadas superiores e condições de déficit nas camadas inferiores (hipolímnio). Essa situação deixa de existir, contudo, quando se apresentam condições que propiciam mistura intensa da massa líquida.

Segundo Higgins e Fruh (1968), o conteúdo de OD é a mais importante variação da qualidade da água com a profundidade. Esses autores citam o caso de reservatórios relativamente não poluídos do Texas, onde estão presentes déficits de OD nas camadas inferiores em grande parte do ano, sendo a estratificação térmica a causa mais importante desses déficits.

A região onde se desenvolve a termoclina, isto é, onde ocorre a variação máxima da temperatura com a profundidade, caracteriza-se por alta estabilidade vertical, o que tende a impedir a circulação das camadas profundas e sua conseqüente oxigenação. As condições climáticas, por outro lado, embora mais atuantes nas camadas superiores, podem modificar essa situação pela ação, por exemplo, da circulação e turbulência gerada pelos ventos, que promovem trocas entre as diversas camadas, alterando as concentrações de OD em várias profundidades.

A obtenção de um modelo determinístico que explique satisfatoriamente a distribuição do OD, em função da múltipla interação dos fatores que a determinam, é tarefa de enorme complexidade.

Decidiu-se, então, visando a resultados práticos em curto prazo, pela utilização de um modelo estatístico, com a finalidade da previsão da qualidade da água na represa Billings, em função do seu conteúdo de OD.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

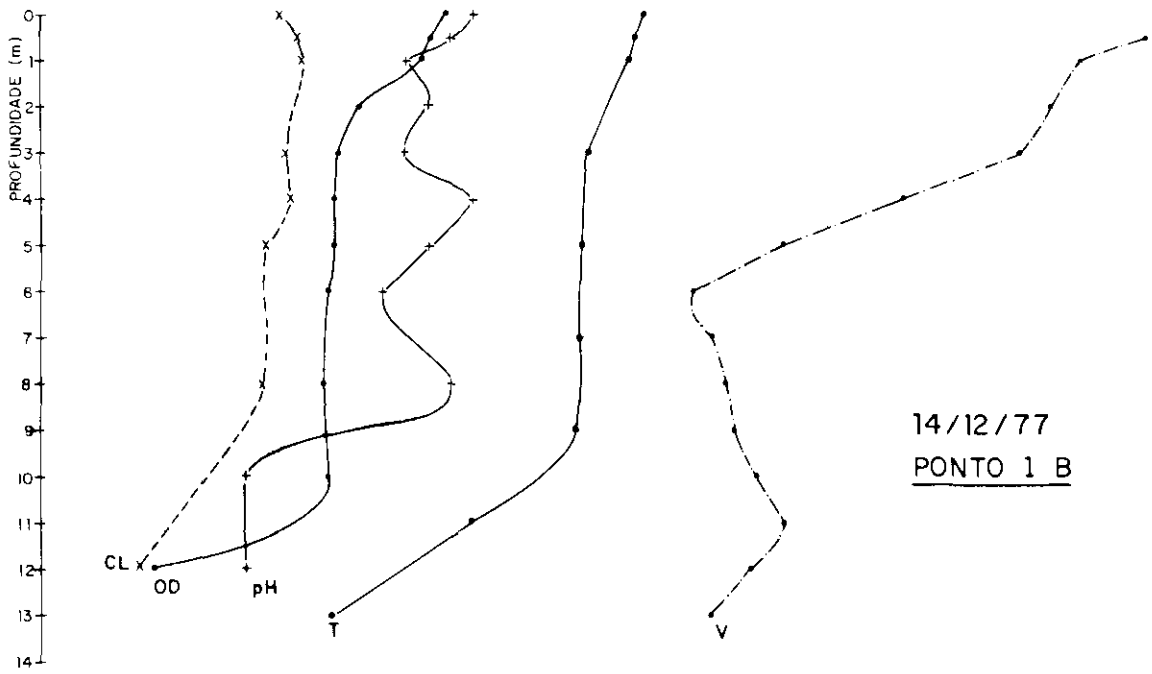
Modelo estatístico utilizado

O modelo escolhido foi o da regressão multilinear (Schneiderman, 1976, e Draper, 1966), que consiste essencialmente no ajuste aos dados experimentais de uma função linear em cada uma das variáveis, pelo método dos mínimos quadrados. Nesse modelo assume-se que os valores das variáveis independentes são exatos e que o modelo é correto quando a avaliação da variável dependente deve ser feita através de medidas com os aparelhos de que se dispõe. As equações de regressão obtidas por este método permitem determinar o valor mais provável da variável dependente para os dados valores das demais variáveis.

A aplicação do modelo obedece às seguintes etapas:

- processamento dos dados através de computador.

pH	6	8	7	2	4	6	8	8	2	4	6												
OD(mg/l)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
T(°C)	18		19		20		21		22		23		24		25		26		27				
CL(mg/m ³)	0		10		20		30		40		50		60		70		80		90				
							V(cm/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15



pH	6	8	7	2	4	6	8	8	2	4	6															
OD(mg/l)	0	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15											
T(°C)	18		19		20		21		22		23		24		25											
CL(mg/m ³)	0		10		20		30		40		50		60		70		80		90		100	110	120	130		
							V(cm/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11							

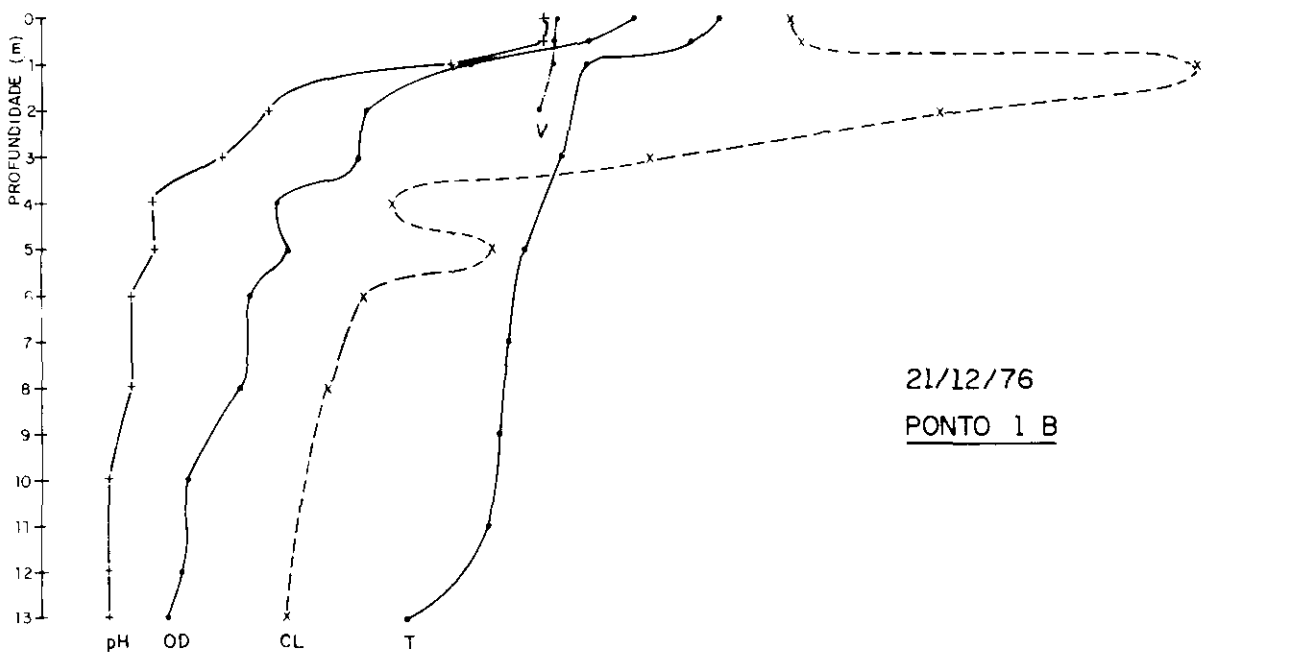


Fig. 2 - Perfis dos diversos parâmetros físico-químicos - 1ª Campanha.

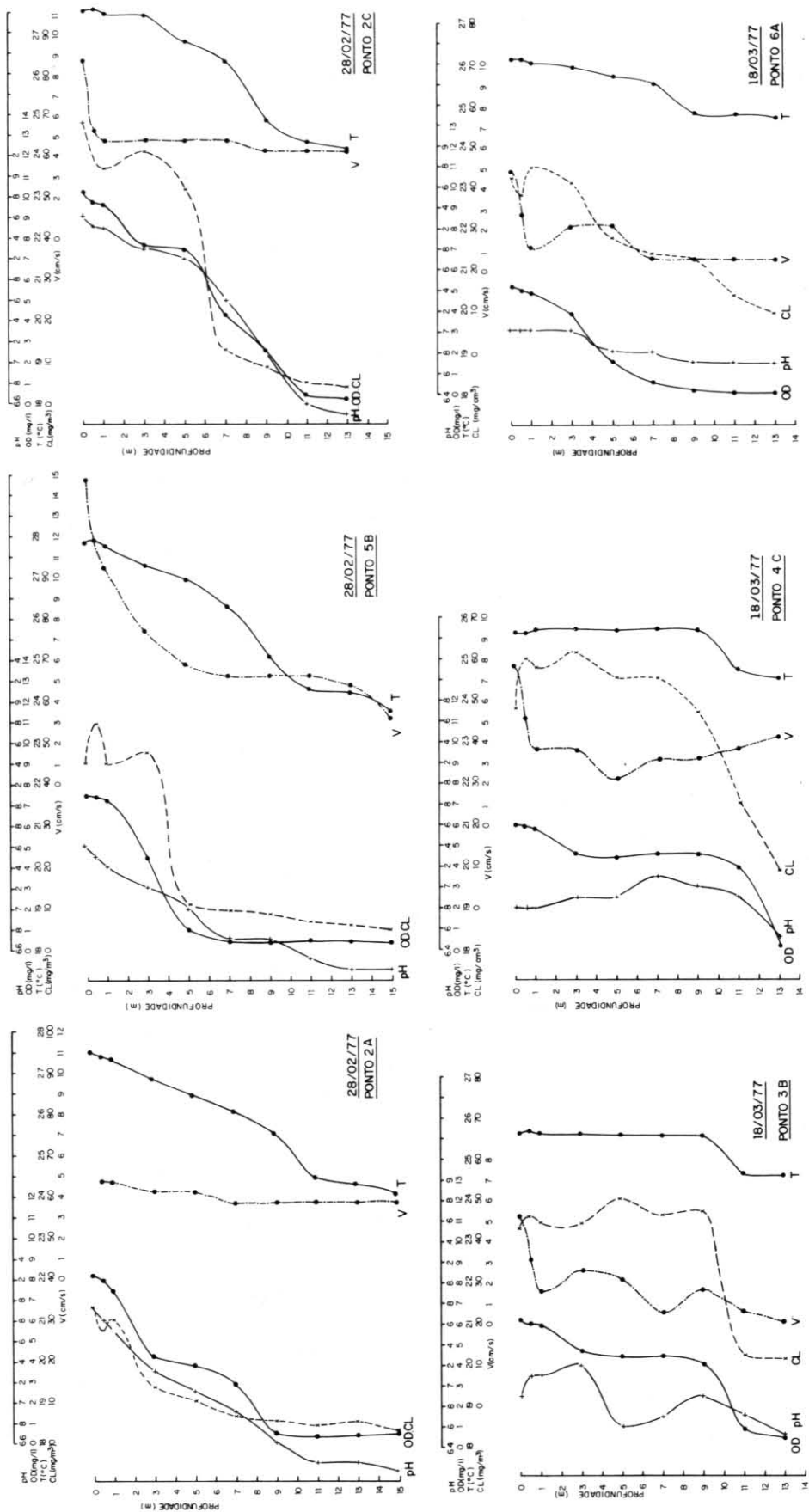


Fig. 3 - Perfis dos diversos parâmetros físico-químicos - 2ª Campanha.

□ estimativa dos parâmetros que medem o grau de correlação.

□ teste da significância da estatística que mede a existência de correlação.

□ escolha da melhor equação de regressão compatível com o grau de precisão que se quer atingir.

O problema consiste então, uma vez prefixada a precisão com que se deseja obter a estimativa do OD, em determinar empiricamente, através de análise de regressão, se o conjunto de variáveis independentes disponíveis é suficiente para explicar a variação observada dessa propriedade. Uma vez verificada essa condição, o próximo passo é considerar o menor número de variáveis necessário para explicar essa variação, dentro da precisão especificada.

No presente trabalho, a estimativa, em termos da porcentagem de variação do OD explicada pela regressão, foi prefixada em torno de 80%.

Critérios adotados para a coleta das amostras

Tendo em conta que o presente estudo visa basicamente à caracterização do perfil de OD no corpo central da represa Billings, a coleta dos dados foi orientada no sentido da obtenção de resultados representativos das condições existentes na maior parte desse corpo central, sendo a escolha dos pontos de coleta efetuada com base nos levantamentos realizados preliminarmente. A localização dos pontos de coleta é vista na Figura 1.

Os dados experimentais foram coletados em duas campanhas realizadas nos períodos de 24-11-76 a 10-01-77 e 14-02-77 a 18-03-77, entre as 9 e as 15 horas. Nesses períodos amostraram-se sistematicamente da superfície ao fundo os seguintes parâmetros físico-químicos: clorofila-a (CL) temperatura (T), pH, penetração da luz (L), velocidade da corrente (V) e oxigênio dissolvido (OD). Foram também medidas as seguintes variáveis meteorológicas: velocidade e direção do vento, temperatura do ar e intensidade da radiação solar.

Na primeira campanha as coletas e medidas foram efetuadas nas profundidades de 0, 0,5, 1 e até o fundo, de metro em metro, e na segunda campanha a 0, 0,5, 1 e até o fundo de dois em dois metros, com o auxílio de guinchos hidrográficos.

A temperatura foi medida com termômetros de reversão Rigosha, mon-

tados em dispositivos apropriados que permitem a amostragem de toda a coluna de uma só vez. As amostras de água foram colhidas com garrafas Kemmerer. O oxigênio dissolvido foi determinado com um medidor de oxigênio YSI, modelo 54. O pH foi medido com um aparelho Methron Herisau E 448. A velocidade e a direção da corrente foram determinadas com um correntômetro Hydro Products 505. Essas determinações foram feitas em campo. Uma parte das amostras foi preservada para a determinação em laboratório da concentração de clorofila-a pelo método de Strickland e Parsons (1960).

A velocidade e a direção do vento foram calculadas a partir do registro de um anemógrafo Lambrecht, modelo 1482, instalado nas margens da represa. A radiação solar foi obtida com um actinógrafo Fuess, Robitzsch Type, modelo 58 dc, instalado no posto meteorológico da Light. A penetração da radiação da luz na água foi medida com um luxímetro Rigosha que utiliza uma célula fotossensível lançada através de um cabo à profundidade desejada.

Nas figuras 2 e 3 são apresentados alguns perfis dos diversos parâmetros amostrados.

PROCESSAMENTO DE DADOS

O valor de L (Langley/dia) foi determinado em função do valor total diário da radiação solar (I_0). Inicialmente, determinaram-se os coeficientes de extinção da luz (λ_e) através da expressão $I = I_0 \exp(-\lambda_e Z)$, sendo os valores de I e I_0 obtidos através do luxímetro, determinando-se a seguir o valor de L nas várias profundidades a partir dos dados do actinógrafo.

A utilização dos totais diários foi considerada conveniente após a verificação de que nos horários de coleta, isto é, das 9 às 15 horas, o total da radiação incidente ficou compreendido entre 41 e 45% daqueles totais, sendo portanto indiferente utilizar um ou outro valor, pois diferem entre si de um fator aproximadamente constante.

Determinou-se em primeiro lugar a matriz de correlação através do computador, com a utilização do programa Factor Analysis (Dixon, 1964). Os elementos dessa matriz são os coeficientes de correlação (r) entre as diversas variáveis. Selecionou-se a variável com o maior coeficiente de correlação com o OD, como a primeira a entrar na equação. No caso da

primeira campanha essa variável foi T, com $r = 0,75874$. Procedeu-se, em seguida, ao cálculo das regressões com o auxílio do Programa Regre (IBM, 1968).

A partir da primeira regressão obtida, $OD = f(T)$, introduziram-se sistematicamente as demais variáveis, verificando-se em cada passo a melhoria alcançada. Esse processo é representado esquematicamente abaixo, onde os valores entre parênteses representam a porcentagem de variação da variável dependente explicada pela regressão, sendo essa porcentagem dada por $100 R^2$, onde R é o coeficiente de correlação múltipla. Esse coeficiente é uma medida da influência combinada de todas as variáveis independentes em termos da diferença entre os valores observados e estimados da variável dependente.

T (58%) → T,pH (67%) → T,pH,L (70%)

T,CL (76%) → T,CL,pH (81%) → T,pH,L,CL (84%) → T,pH,L,CL,V (84%) → T,CL,L (82%) → CL,pH (63%) → CL,pH,L (70%)

Como se observa no esquema apresentado acima, a melhor equação de regressão pode ser obtida com as variáveis T,pH, L, CL, que explicam 84% da variação observada do OD. Entretanto, em vista de os parâmetros CL, T e L apresentarem mais aplicabilidade prática nas previsões futuras, escolheu-se a equação $OD = f(CL, T, L)$ como a mais adequada para esse propósito. Passou-se em seguida aos testes da significância da regressão.

O programa de computação utilizado fornece os seguintes testes estatísticos: teste F global da regressão e teste t de cada variável independente.

No teste F comparou-se o valor obtido para a regressão com o valor $F_{\text{crítico}}$, dado por $F(k, n-k-1, \alpha)$ onde n é o número de observações, k é o número de variáveis independentes e α é o nível de confiança. O valor calculado de F para a regressão $OD = f(CL, T, L)$ foi 264,62 e para o valor crítico ao nível de $\alpha = 0,01$ foi 3,7816, resultando que $F > F_{\text{crítico}}$. Em vista desse resultado pode-se afirmar com um grau de confiança de 99% que pelo menos uma das variáveis influi na variação observada do OD.

A aplicação do teste t permitiu determinar se todas as variáveis influem significativamente na regres-

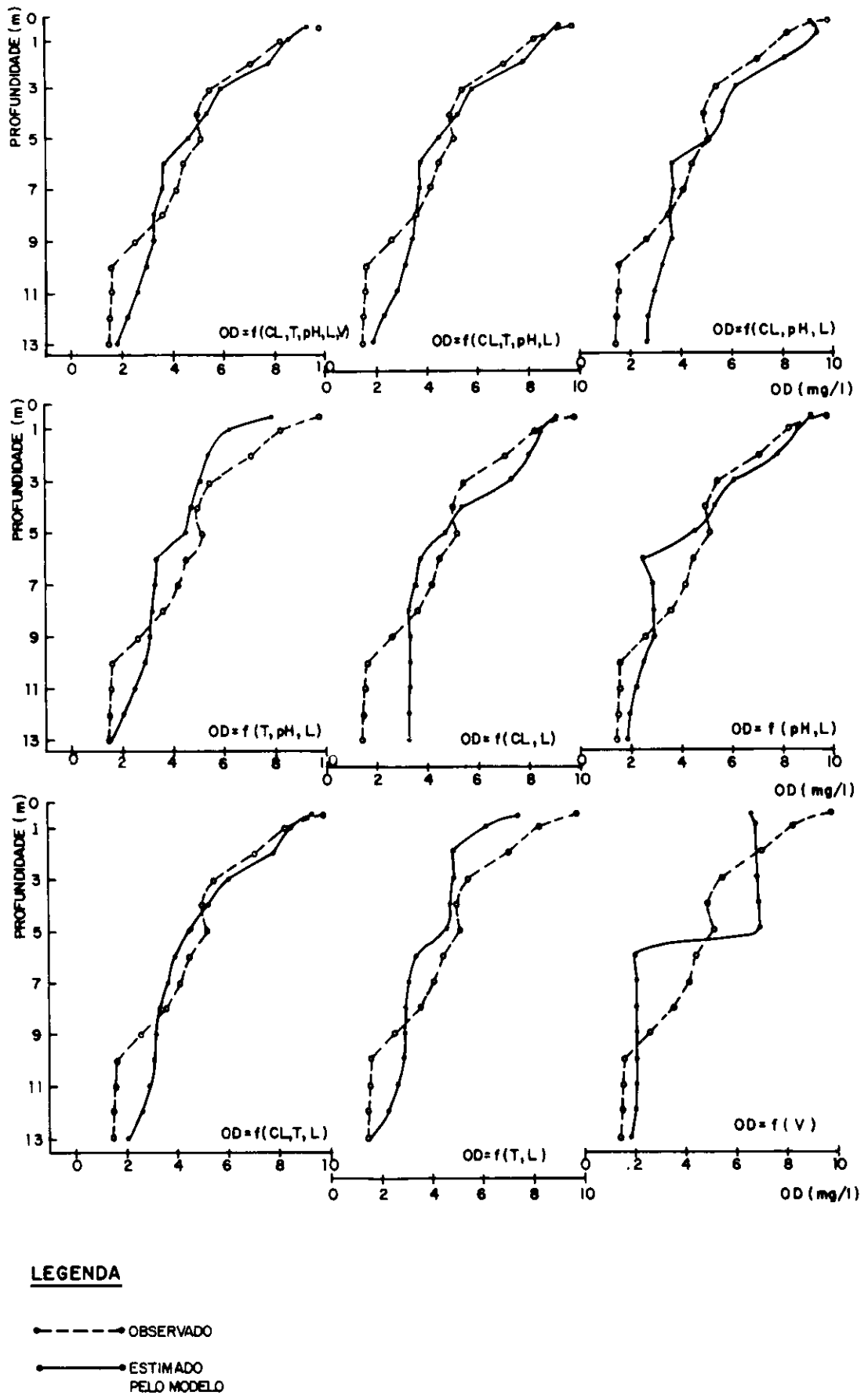


Fig. 4 - Comparação entre os perfis de OD obtidos através de diferentes equações de regressão - 22/12/76 - Ponto 1B.

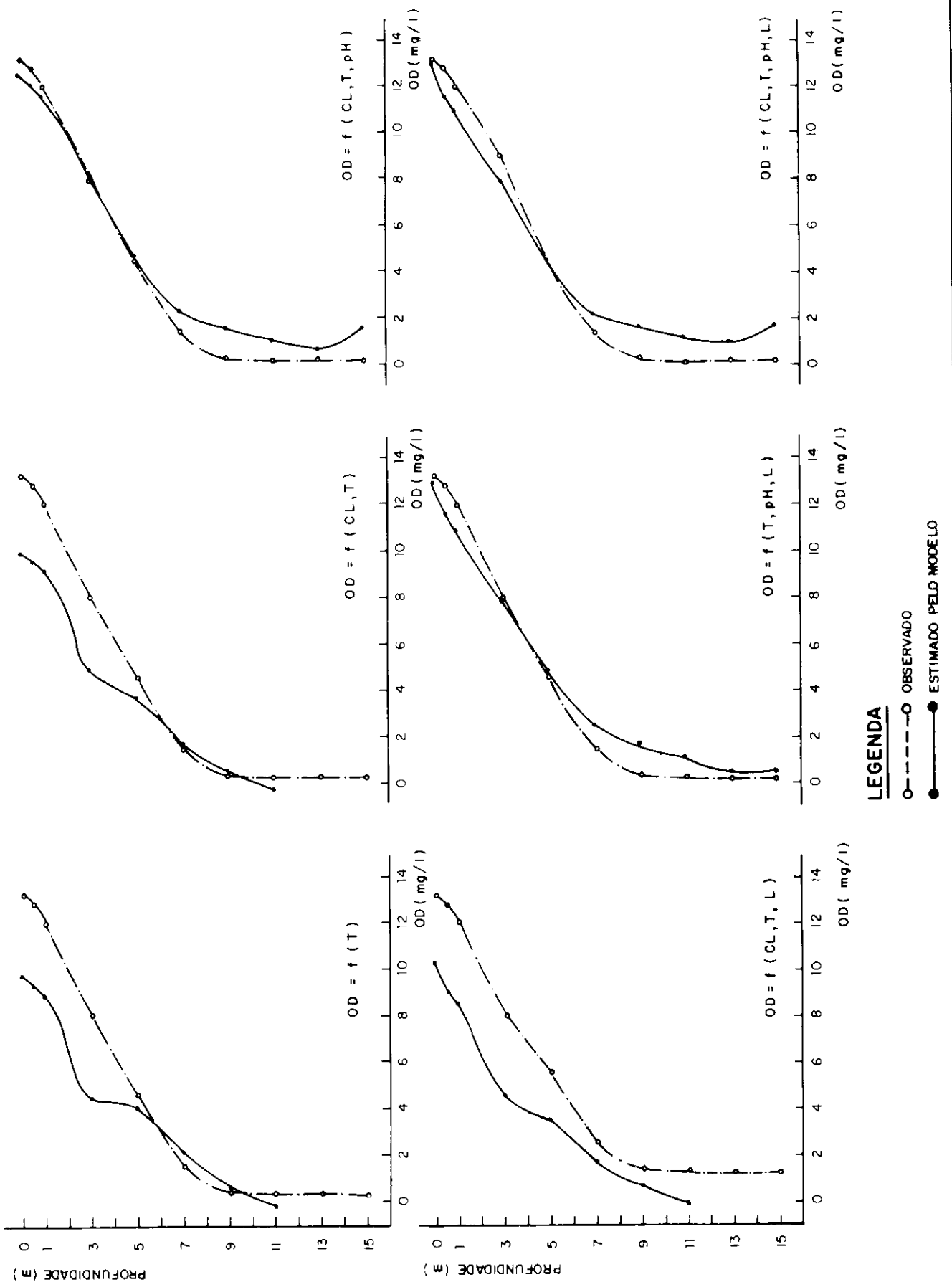


Fig. 5 - Comparação entre os perfis de OD obtidos através de diferentes equações de regressão.

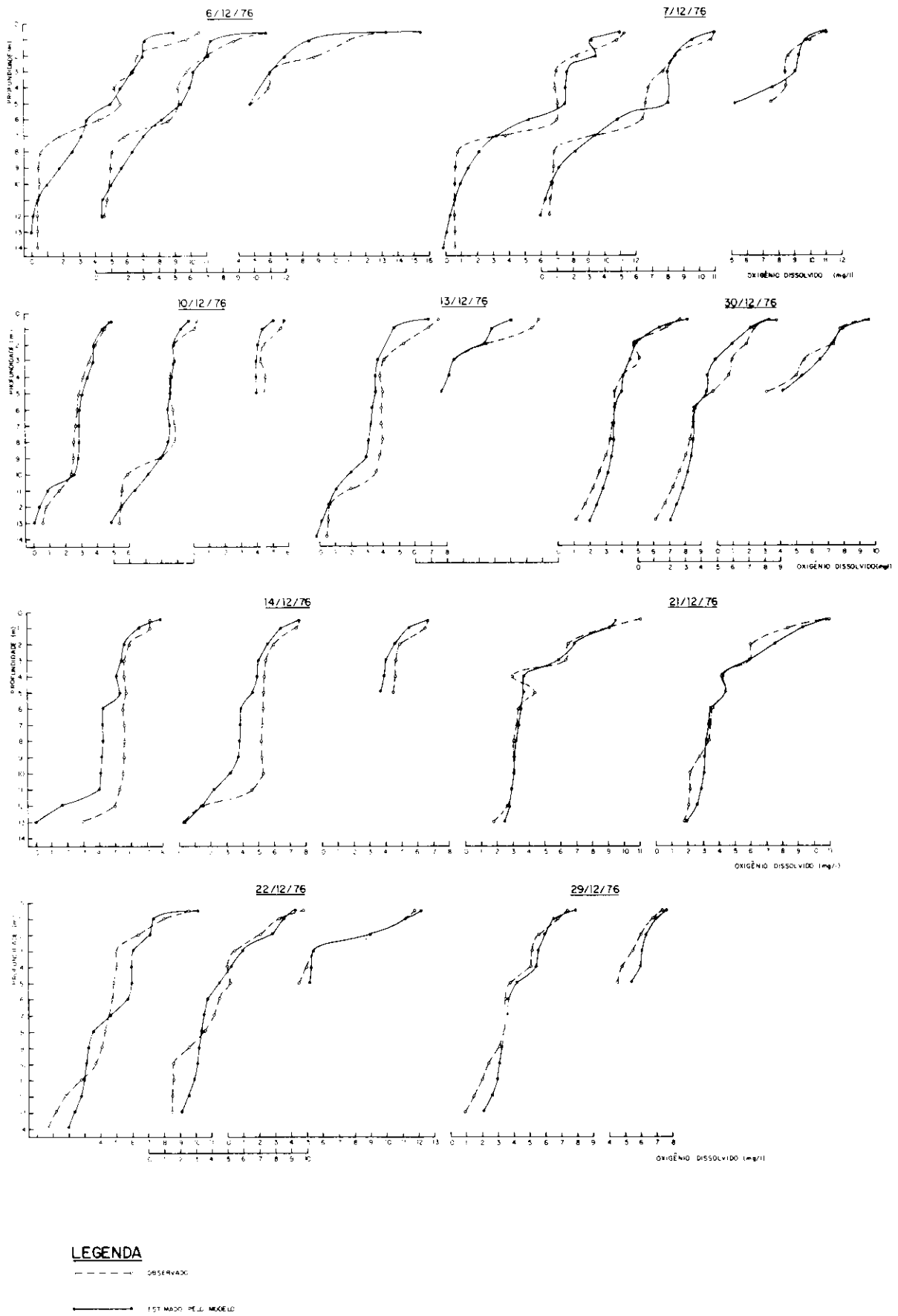
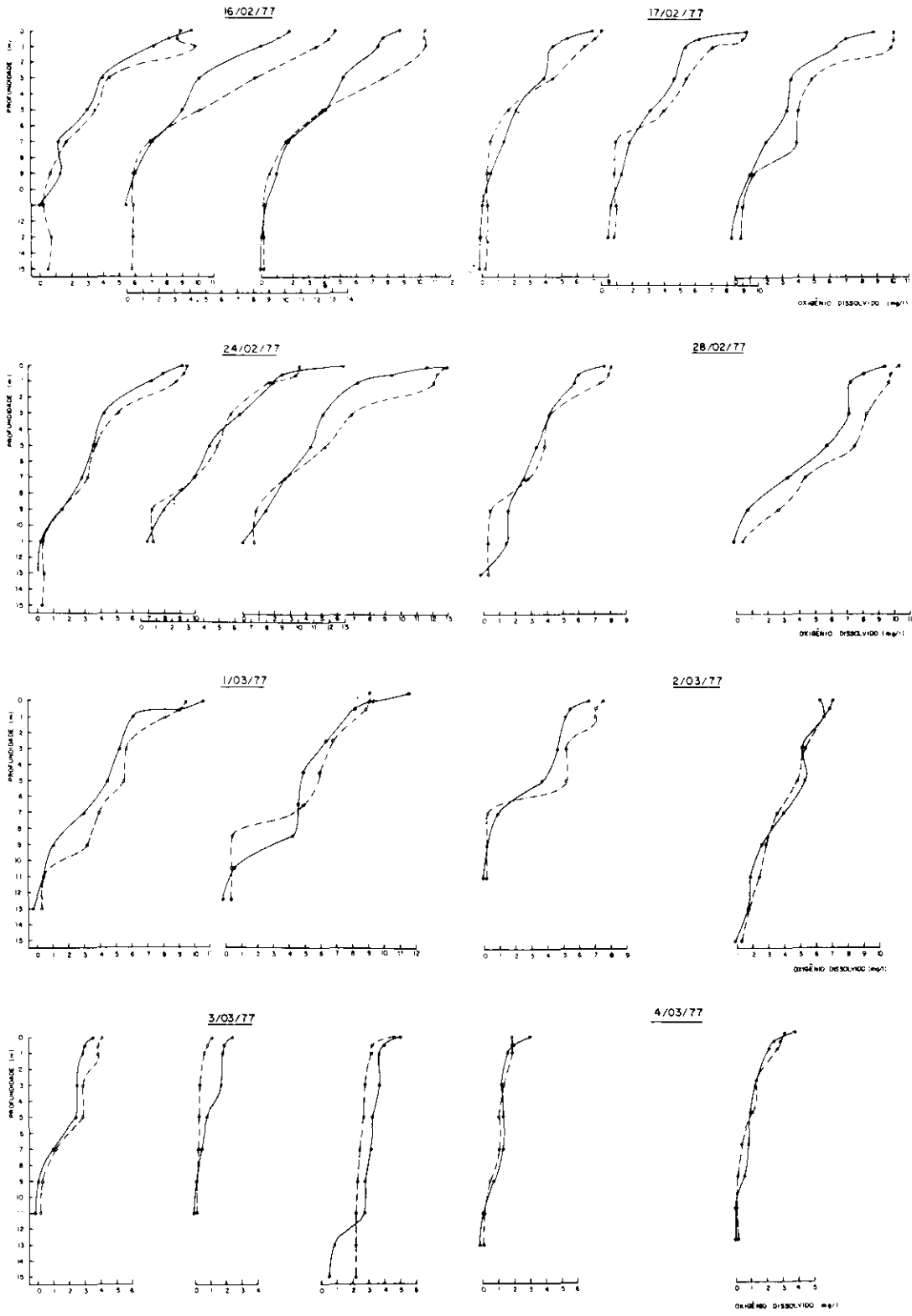


Fig. 6 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido calculado pelo modelo e determinado em condições reais no período de 6/12 a 29/12/76.



LEGENDA

- OBSERVADO
- ESTIMADO PELO MODELO

Fig. 7 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido calculado pelo modelo e determinado em condições reais no período de 16/02 a 4/03/77.

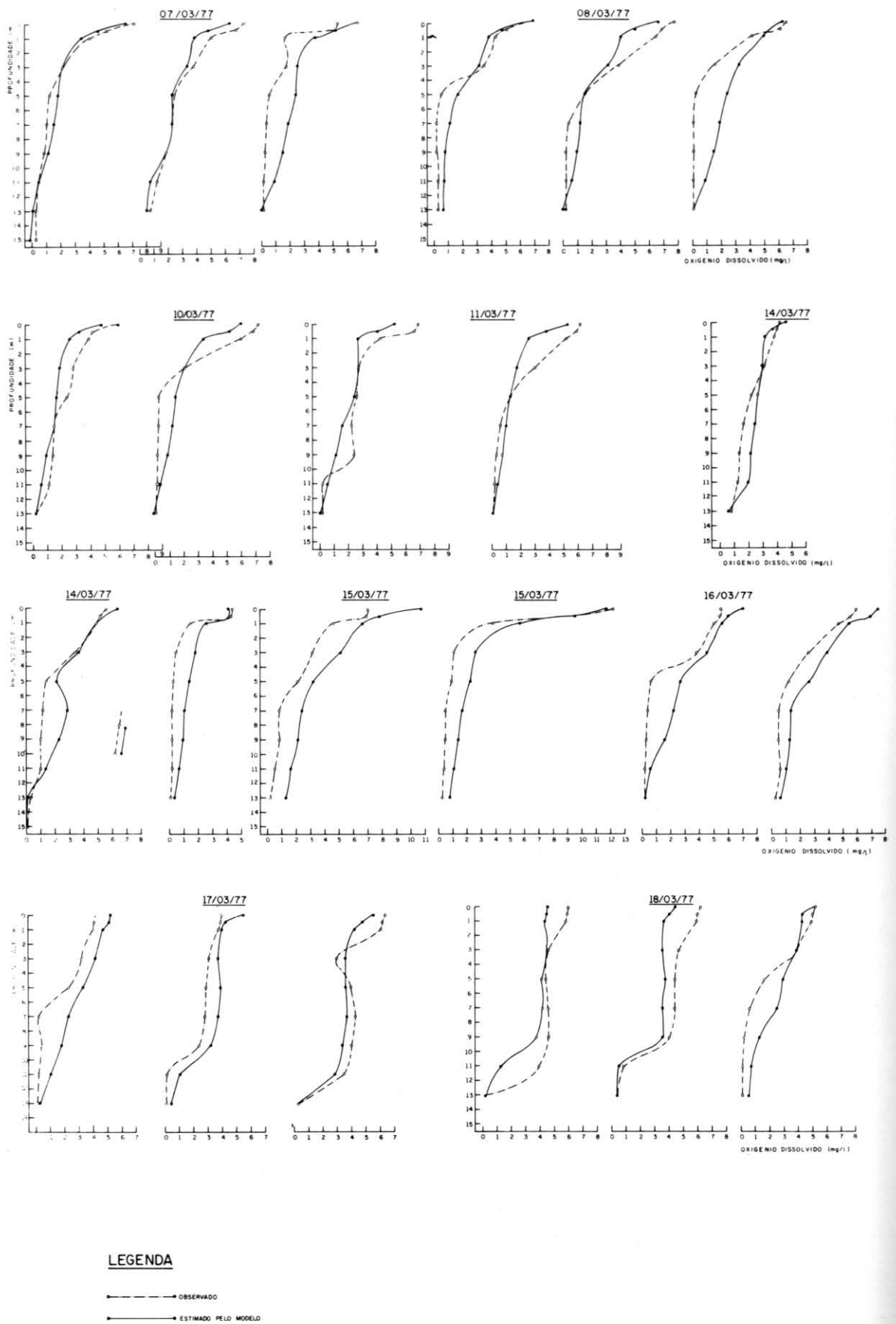


Fig. 8 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido calculado pelo modelo e determinado em condições reais no período de 07/03 18/03/77.

são. Comparou-se neste caso $|t|$ com t ($n-k-1, 1 - 1/2 \alpha$) ao nível de 0,01. Através das tabelas de distribuição t , obteve-se $t(176, 0,995) = 2,876$, sendo que os valores calculados para a regressão foram: 13,96 para CL, 19,49 para T e 6,19 para L. Também neste caso $|t_i| > t_{\text{crítico}}$ para as três variáveis, podendo-se afirmar ao nível de 0,1%, ou seja, com 99% de confiança, que todas as variáveis são estatisticamente significativas em relação à variação do OD.

Os mesmos procedimentos foram aplicados ao conjunto de dados para as profundidades de 5 m ao fundo e para os dados da segunda campanha. No caso desta última, os dados foram utilizados globalmente da superfície ao fundo o que, embora tenha diminuído o ajuste, permitiu a obtenção de uma única equação para toda a coluna de água. Os resultados foram os seguintes:

Primeira campanha — profundidades de 5 m ao fundo

T (64%) → T,pH (70%) → T,pH,V (71%)
 →
 T,CL (68%) → T,pH,CL (75%) ←
 CL,pH (50%)
 →
 T,CL,V (71%) → T,pH,CL,V (76%)

Equação escolhida: $OD = f(CL, T)$

Valor de F: 152,12 $F_{\text{crítico}}$: 3,7816

Teste t CL: 4,06 T: 13,60 $t_{\text{crítico}}$: 2,576

Conclusão: todas as variáveis são estatisticamente significativas.

Segunda campanha — profundidades da superfície ao fundo

T (74%) → T,pH (82%) → (T,pH,L (84%))
 →
 T,CL (79%) → T,CL,pH (85%) →
 T,CL,pH,V,L (87%)
 →
 T,CL,L (80%)

Equação escolhida: $OD = f(CL, T, L)$

Valor de F: 626,52 $F_{\text{crítico}}$: 3,7816

Teste t: CL: 10,39 T: 18,41 L: 5,76
 $t_{\text{crítico}}$: 2,576

Conclusão: todas as variáveis são estatisticamente significativas.

Como se verifica ainda nestes últimos dois casos, as equações escolhidas não representam a melhor re-

gressão do ponto de vista da precisão do ajuste; sua escolha, porém, deveu-se aos motivos já expostos anteriormente.

Nas figuras 4 e 5 são apresentados alguns resultados para comparação entre os diversos graus de aproximação entre os perfis reais e os perfis estimados pelo modelo, quando são introduzidas diferentes variáveis nas equações de regressão.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

A partir da análise apresentada no item anterior são propostas as seguintes equações da regressão para a previsão dos valores do oxigênio dissolvido.

Primeira campanha

Para profundidades entre 0,5 e 5 m:
 $OD = -49,30795 + 0,04032 CL + 2,27566 T + 0,01061 L$

Coefficiente de correlação múltipla = 0,90473

$100 R^2 = 82\%$.

Para profundidades entre 5 m e o fundo:

$OD = -22,01019 + 0,02994 CL + 1,08384 T$

Coefficiente de correlação múltipla = 0,82478

$100 R^2 = 68\%$.

Segunda campanha

Para profundidades da superfície ao fundo:

$OD = -38,92880 + 0,04496 CL + 1,57984 T + 0,00342 L$

Coefficiente de correlação múltipla = 0,89632

$100 R^2 = 80\%$.

onde: OD oxigênio dissolvido, em mg/l

CL clorofila, em mg/m^3

T temperatura, em °C

L radiação solar em Langley/dia.

Essas equações são igualmente válidas para a estimativa dos valores médios da concentração de OD na coluna líquida, a partir dos valores médios das demais variáveis.

Nas figuras 6, 7 e 8 são apresentados os diversos perfis de OD previstos pelo modelo, superposto aos perfis observados.

O exame dos resultados permite concluir que o modelo é satisfatório, tanto do ponto de vista estatístico como do ponto de vista da aplicação prática. Os coeficientes de correlação múltipla apresentaram valores consideravelmente altos e todos os

parâmetros estimados foram estatisticamente significativos a um nível de $\alpha = 0,001$.

A porcentagem da variação de oxigênio dissolvido explicada pelas regressões situou-se em torno dos 80% prefixados. A parte não explicada dessa variação pode ser atribuída a outros fatores físicos, químicos e biológicos, não levados em conta na regressão e aos erros inerentes à determinação do oxigênio dissolvido.

A observação dos gráficos das figuras 6, 7 e 8 mostra que o modelo prevê bastante bem as variações do OD da superfície ao fundo. As maiores discrepâncias podem ser notadas em alguns casos, quando se apresenta uma variação brusca na concentração do OD, o que não é acompanhado pela previsão. Na segunda campanha, o modelo falha para valores muito baixos da variável dependente. Este fato não ocorre na primeira campanha, em que se obtiveram duas equações separadas.

A aplicabilidade das equações em outros períodos do ano depende da verificação da maneira como evoluem os diversos parâmetros em termos absolutos e médios. Comparando-se os diversos perfis apresentados nas figuras 4 e 5, pode-se dizer que as distribuições verticais dos diversos parâmetros não sofreram variações consideráveis durante os períodos das duas campanhas. Não é de se esperar, porém, uma boa previsão para valores das variáveis independentes muito fora do intervalo em que se apresentaram nas presentes campanhas.

Estão em prosseguimento campanhas de amostragem destinadas ao aperfeiçoamento do modelo.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Dixon, W. J., "BMD Computer Program Manual", UCLA, 1964.
- (2) Draper, N. R., & H. Smith, "Applied regression analysis", John Wiley, New York, 1966.
- (3) Higgins, R. B., & E. G. Fruh, "Relationship between the chemical limnology and raw water quality of a subtropical Texas impoundment", Texas Journal of Science XX (1) — 13-32, 1968.
- (4) IBM, "Regre, multiple linear regression", IBM Applications Program, System/360 Scientific Subroutine Package (360 A-CM-03 X) Version III Application Description, H20-0166-5, 1968.
- (5) Schneiderman, B., "Correlação e regressão. Estatística — 4.ª parte", Escola de Engenharia Mauá, Inst. Mauá de Tecnologia, 1976.
- (6) Strickland, J. D. H., & T. R. Parsons, "A manual of sea water analysis", Bull. Fish. Res. Bd. Ca. (1925): 1-185, 1966.