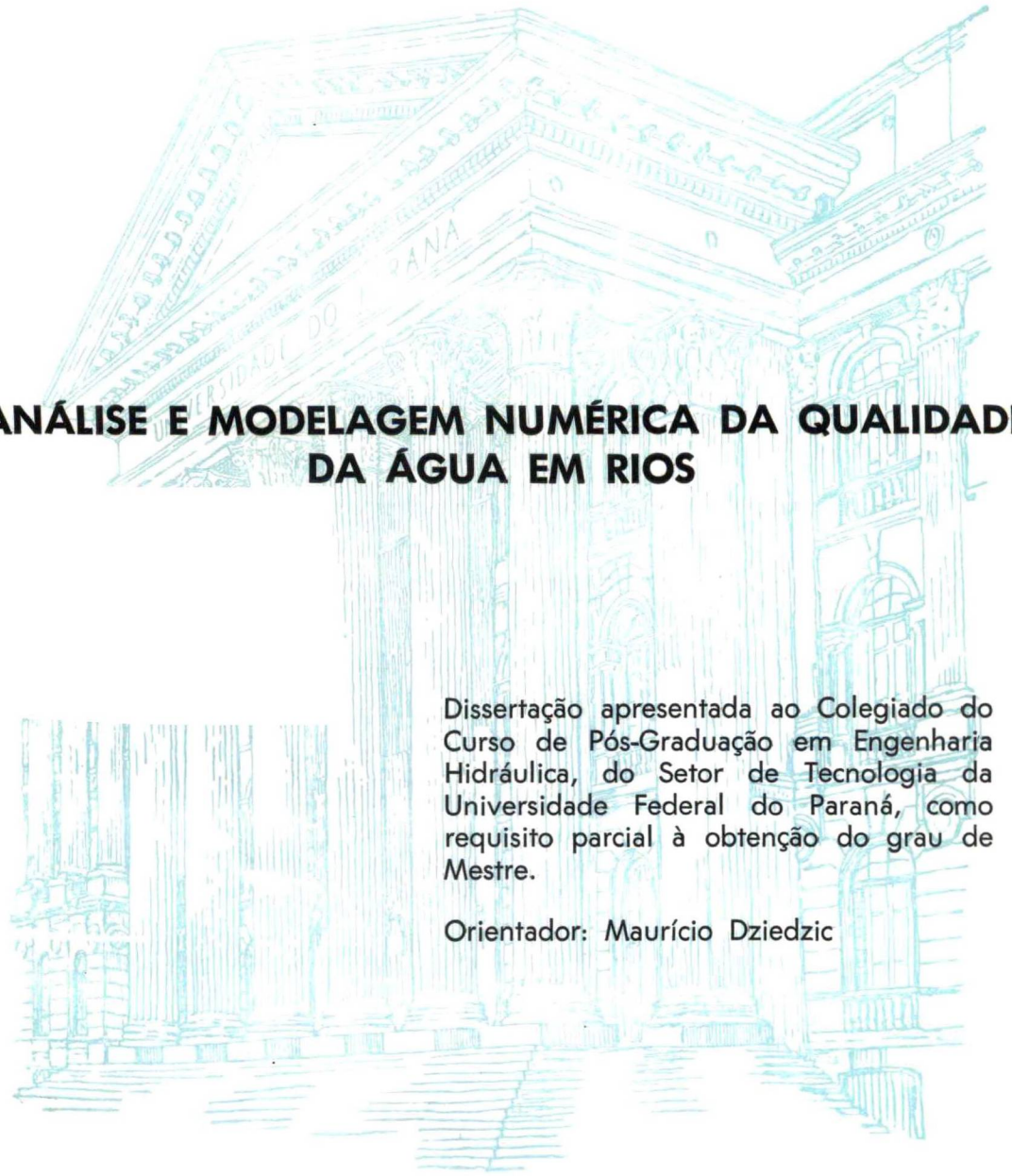
MARIA HELENA NEIDERT DE LOYOLA E SILVA



ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Maurício Dziedzic

CURITIBA
1998

MARIA HELENA NEIDERT DE LOYOLA E SILVA

ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Maurício Dziedzic

CURITIBA
1998

MARIA HELENA NEIDERT DE LOYOLA E SILVA

ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

ORIENTADOR: MAURÍCIO DZIEDZIC
CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA

SANDRA MARA ALBERTI
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÔNICA FERREIRA DO AMARAL PORTO
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Curitiba, 09 de dezembro de 1998.

MARIA HELENA NEIDERT DE LOYOLA E SILVA

ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Maurício Dziedzic

Curitiba

1998

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, meu melhor professor

AGRADECIMENTOS

Pela dedicação dispensada durante toda a elaboração desta dissertação, agradeço a atenção do professor orientador, Maurício Dziedzic.

Pela oportunidade de desenvolver o presente trabalho, agradeço à COPEL, especialmente à CNIA - Coordenadoria de Meio Ambiente, pela contratação do projeto. Agradeço ainda à equipe do CEHPAR. Em especial agradeço ao LAC - QAP - Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento na Área de Produção em Química Aplicada, em especial a Sandra Mara Alberti e Luiza Helena Lopes Ribeiro.

Agradeço à aluna do curso de Engenharia Civil e estagiária do CEHPAR, Letícia Tiboni, pela ajuda prestada durante todo o período de realização do presente trabalho.

Ao demais professores do curso de Mestrado em Engenharia Hidráulica, pelos conhecimentos transmitidos e pelo incentivo para a conclusão do trabalho.

À Sanepar, em especial a divisão de planejamento.

Por fim, a todos que, de alguma maneira, me ajudaram e incentivaram na elaboração e conclusão da presente dissertação.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA i

AGRADECIMENTOS ii

SUMÁRIO iii

LISTA DE TABELAS vi

LISTA DE ILUSTRAÇÕES ix

LISTA DE ANEXOS E FOTOS xv

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xvii

LISTA DE SÍMBOLOS xviii

RESUMO xxii

ABSTRACT xxiii

1 . INTRODUÇÃO 001

2 . OBJETIVO 002

3 . METODOLOGIA 004

4 . REVISÃO DA LITERATURA 006

4 . 1 FENÔMENOS DE TRANSPORTE 006

4 . 2 MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS - QUAL2E-UNCAS 016

4 . 2 . 1 COEFICIENTE DE REAERAÇÃO 021

4 . 2 . 2 TAXA DE DECAIMENTO DE DBO 031

4 . 2 . 3 TEMPO DE PERCURSO 037

5 . CARACTERÍSTICAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE SALTO CAXIAS 041

6 . LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA 044

7 . CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA 047

8 . MATRIZ DE FONTES DE POLUIÇÃO 055

8 . 1 POLUIÇÃO INDUSTRIAL 055

8 . 2 POLUIÇÃO DOMÉSTICA 061

9 . APLICAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL QUAL2E À REGIÃO EM ESTUDO 082

9 . 1 SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA, OD E DBO 083

9 . 1 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 105

9 . 2 SIMULAÇÃO DE COLIFORMES 135

9 . 2 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 141

9 . 3 SIMULAÇÃO DE FÓSFORO 151

9 . 3 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 154

9 . 4 SIMULAÇÃO DE NITROGÊNIO 166

9 . 4 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 169

9 . 5 SIMULAÇÃO DE CLOROFILA 174

9 . 5 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 175

9 . 6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS 179

9 . 6 . 1 VALORES DE OD E DBO 179

9 . 6 . 2 VALORES DE DBO E COLIFORMES CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA PECUÁRIA 179

9 . 6 . 3 GRÁFICOS DE NUTRIENTES x VAZÃO 181

10 . CONCLUSÃO 186

11 . SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 187

APÊNDICE 188

ANEXOS 191

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 208

LISTA DE TABELAS

01 - Localização dos pontos de coleta 005

02 - Alcance dos dados experimentais 028

03 - Poluição industrial 056

04 - Cargas industriais 059

05 - Cargas industriais no rio Iguaçu 060

06 - População 062

07 - Características físicas dos municípios 063

08 - Abastecimento de água 065

09 - Atendimento de esgoto 066

10 - Cálculo das cargas - População urbana 069

11 - Cálculo das cargas - População rural 070

12 - Pontos de lançamento e percurso do esgoto doméstico 072

13 - Concentração de DBO afluente ao rio Iguaçu (mg/l) 079

14 - Cálculo das cargas - População indígena 080

15 - Pontos de lançamento e percurso do esgoto - População indígena 080

16 - Concentração de DBO nos afluentes (kg/dia) 081

17 - Tela 02 - Discretização do sistema (Stream Reach System) 085

18 - Tela 03 - Definição dos tipos de elementos computacionais 087

19 - Tela 11 - Parâmetros hidráulicos 092

20 - Obtenção das características hidrogeométricas 093

21 - Dados da campanha de coleta de amostras de junho de 1997 097

22 - Dados utilizados na tela 14 e maneira pela qual foram obtidos 099

23 - Cálculo da vazão incremental - Tela 15 102

24 - Tela 17 - Cargas poluentes afluentes e vazões efluentes 103

25 - Dados das campanhas de coleta - Temperatura 105

26 - Dados das campanhas de coleta - OD 106

27 - Dados das campanhas de coleta - DBO 106

28 - Coliformes totais e fecais per capita 136

29 - Concentração de coliformes fecais nos afluentes (NMP/dia) 141

30 - Dados das campanhas de coleta → Coliformes 142

31 - Concentração de fósforo nos afluentes (kg/dia) 153

32 - Dados das campanhas de coleta → Fósforo 154

33 - Valores de nitrogênio e fósforo - bovinos (gado de corte) 159

34 - Valores de nitrogênio e fósforo - bovinos (gado leiteiro) 159

35 - Valores de nitrogênio e fósforo - galinhas 160

36 - Valores de nitrogênio e fósforo - ovinos 160

37 - Valores de nitrogênio e fósforo - suínos 161

38 - Valores de nitrogênio total para diversos rebanhos 162

39 - Valores de fósforo total para diversos rebanhos 162

40 - Valores totais de nitrogênio e fósforo 163

41 - Valores de DBO (pecuária) 164

42 - Valores de coliformes (pecuária) 165

43 - Concentração de nitrogênio nos afluentes 168

44 - Dados das campanhas de coleta → nitrogênio 169

45 - Dados das campanhas de coleta → clorofila 176

46 - Coordenadas das seções utilizadas no trecho UHE Salto Caxias - UHE Salto Osório..... 189

47 - Áreas de drenagem dos afluentes principais..... 190

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

01 - Mecanismos de transporte em rios 009

02 - Pluma resultante de uma descarga constante de um corante, no rio Columbia, Washington..... 011

03 - Definição do sistema de coordenadas..... 012

04 - Perfil de distribuição de velocidades 014

05 - Representação do sistema no QUAL2E 018

06 - Balanço de massa no elemento computacional 019

07 - Reaeração - esquema de Lewis e Whitman 022

08 - Reaeração - esquema de Higbie..... 023

09 - Déficit de oxigênio em um rio poluído..... 032

10 - Curva típica de demanda de oxigênio na decomposição aeróbica de matéria orgânica 033

11 - Efeito da temperatura na demanda de oxigênio..... 034

12 - Demanda de oxigênio ao longo do tempo 035

13 - Localização do empreendimento 043

14 - Percurso percorrido pelo esgoto, município de Marmeleiro 078

15 - Representação esquemática dos tramos utilizados na simulação do rio Iguaçu na região em estudo..... 084

16 - Exemplo de divisão dos tramos (tramo 01)..... 086

17 - Exemplo de divisão dos tramos (tramo 17)..... 086

18 - Coeficiente de reaeração em Salto Caxias..... 095

19 - Coeficiente de reaeração em Salto Osório..... 096

20 - Gráfico distância x vazão (Fevereiro/1997) 108

21 - Gráfico distância x temperatura (Fevereiro/1997)..... 108

22 - Gráfico distância x OD (Fevereiro/1997)..... 109

23 - Gráfico distância x DBO (Fevereiro/1997) 109

24 - Gráfico distância x vazão (Março/1997) 110

25 - Gráfico distância x temperatura (Março/1997)..... 110

26 - Gráfico distância x OD (Março/1997)..... 111

27 - Gráfico distância x DBO (Março/1997) 111

28 - Gráfico distância x vazão (Abril/1997) 112

29 - Gráfico distância x temperatura (Abril/1997)..... 112

30 - Gráfico distância x OD (Abril/1997)..... 113

31 - Gráfico distância x DBO (Abril/1997) 113

32 - Gráfico distância x vazão (Maio/1997) 114

33 - Gráfico distância x temperatura (Maio/1997)..... 114

34 - Gráfico distância x OD (Maio/1997)..... 115

35 - Gráfico distância x DBO (Maio/1997) 115

36 - Gráfico distância x vazão (Junho/1997) 116

37 - Gráfico distância x temperatura (Junho/1997) 116

38 - Gráfico distância x OD (Junho/1997)..... 117

39 - Gráfico distância x DBO (Junho/1997) 117

40 - Gráfico distância x vazão (Julho/1997) 118

41 - Gráfico distância x temperatura (Julho/1997) 118

42 - Gráfico distância x OD (Julho/1997)..... 119

43 - Gráfico distância x DBO (Julho/1997) 119

44 - Gráfico distância x vazão (Agosto/1997) 120

45 - Gráfico distância x temperatura (Agosto/1997) 120

46 - Gráfico distância x OD (Agosto/1997) 121

47 - Gráfico distância x DBO (Agosto/1997) 121

48 - Gráfico distância x vazão (Setembro/1997) 122

49 - Gráfico distância x temperatura (Setembro/1997) 122

50 - Gráfico distância x OD (Setembro/1997) 123

51 - Gráfico distância x DBO (Setembro/1997) 123

52 - Gráfico distância x vazão (Outubro/1997) 124

53 - Gráfico distância x temperatura (Outubro/1997) 124

54 - Gráfico distância x OD (Outubro/1997) 125

55 - Gráfico distância x DBO (Outubro/1997) 125

56 - Gráfico distância x vazão (Novembro/1997) 126

57 - Gráfico distância x temperatura (Novembro/1997) 126

58 - Gráfico distância x OD (Novembro/1997) 127

59 - Gráfico distância x DBO (Novembro/1997) 127

60 - Gráfico distância x vazão (Dezembro/1997) 128

61 - Gráfico distância x temperatura (Dezembro/1997) 128

62 - Gráfico distância x OD (Dezembro/1997) 129

63 - Gráfico distância x DBO (Dezembro/1997) 129

64 - Gráfico distância x vazão (Janeiro/1998) 130

65 - Gráfico distância x temperatura (Janeiro/1998) 130

66 - Gráfico distância x OD (Janeiro/1998) 131

67 - Gráfico distância x DBO (Janeiro/1998) 131

68 - Gráfico distância x vazão (Fevereiro/1998) 132

69 - Gráfico distância x temperatura (Fevereiro/1998) 132

70 - Gráfico distância x OD (Fevereiro/1998) 133

71 - Gráfico distância x DBO (Fevereiro/1998) 133

72 - Gráfico distância x Coliformes (Fevereiro/1997) 143

73 - Gráfico distância x Coliformes (Março/1997) 143

74 - Gráfico distância x Coliformes (Abril/1997) 144

75 - Gráfico distância x Coliformes (Maio/1997) 144

76 - Gráfico distância x Coliformes (Junho/1997) 145

77 - Gráfico distância x Coliformes (Julho/1997) 145

78 - Gráfico distância x Coliformes (Agosto/1997) 146

79 - Gráfico distância x Coliformes (Setembro/1997) 146

80 - Gráfico distância x Coliformes (Outubro/1997) 147

81 - Gráfico distância x Coliformes (Novembro/1997) 147

82 - Gráfico distância x Coliformes (Dezembro/1997) 148

83 - Gráfico distância x Coliformes (Janeiro/1998) 148

84 - Gráfico distância x Coliformes (Fevereiro/1998) 149

85 - Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre cargas para $k_p = 0,01$ 155

86 - Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre cargas para $k_p = 0,7$ 155

87 - Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre valores de k_p para c = 0 156

88 - Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre valores de k_p para c = 1 mg/l 156

89 - Gráfico distância x Fósforo (Novembro/1997), c = 4 mg/l e k_p = 0,01, c = 5 mg/l e k_p = 0,7 157

90 - Gráfico distância x Fósforo (Janeiro/1998), c = 2 mg/l e k_p = 0,01, c = 2 mg/l e k_p = 0,7 157

91 - Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas para k_n = 0,02 170

92 - Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas para k_n = 0,4 170

93 - Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), condições iniciais diferentes de zero, incremental = 10 mg/l 171

94 - Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), condições iniciais diferentes de zero, incremental = 15 mg/l 172

95 - Gráfico distância x Nitrogênio (Novembro/1997) 173

96 - Gráfico distância x Nitrogênio (Janeiro/1998) 173

97 - Gráfico distância x Clorofila (Maio/1997) 177

98 - Gráfico distância x Clorofila (Novembro/1997) 177

99 - Gráfico distância x Clorofila (Janeiro/1998) 178

100 - Gráfico distância x DBO (Novembro/1997) 180

101 - Gráfico distância x Coliformes (Novembro/1997) 180

102 - Gráfico vazão x concentração de fósforo - P01 182

103 - Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P01 182

104 - Gráfico vazão x concentração de fósforo - P03 183

105 - Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P03 183

106 - Gráfico vazão x concentração de fósforo - P07 184

107 - Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P07 184

108 - Gráfico vazão x concentração de fósforo - P13 185

109 - Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P13 185

LISTA DE ANEXOS E FOTOS

anexo 01 - Mapa da região em estudo (localização das seções transversais, pontos de coleta e afluentes) 192

anexo 02 - Mapa da região em estudo (bacia hidrográfica incremental entre Salto Osório e Salto Caxias) 194

foto 01 - Ponto de coleta P01 → Rio Iguaçu 196

foto 02 - Adufas 196

foto 03 - Ponto de coleta P07 → Rio Iguaçu 197

foto 04 - Ponto de coleta P07 → Rio Iguaçu, vista da margem esquerda..... 197

foto 05 - Ponto de coleta P13 → Rio Iguaçu 198

foto 06 - Ponto de coleta P02 → Rio Cotejipe..... 198

foto 07 - Ponto de coleta P04 → Rio Adelaide..... 199

foto 08 - Ponto de coleta P05 → Rio Tormenta..... 199

foto 09 - Ponto de coleta P08 → Rio Guarani 200

foto 10 - Ponto de coleta P09 → Rio Guarani 200

foto 11 - Ponto de coleta P09 → Rio Guarani 201

foto 12 - Ponto de coleta P10 → Rio Jaracatiá 201

foto 13 - Ponto de coleta P11 → Rio Jaracatiá 202

foto 14 - Ponto de coleta P12 → Rio Chopim 203

foto 15 - Ponto de coleta P14 → Rio Chopim 204

foto 16 - Ponto de coleta P13 → Disco de Secchi 205

foto 17 - Ponto de coleta P13 → Coleta de amostra 206

foto 18 - Laboratório 207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BPUB - Base Pública do Estado

CEHPAR - Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza

CNIA - Coordenadoria de Meio Ambiente

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

IAP - Instituto Ambiental do Paraná

IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social

JMF - Usina Hidrelétrica Júlio de Mesquita Filho

LAC - QAP - Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento na Área de Produção em Química Analítica e Aplicada

OD - Oxigênio Dissolvido

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área da seção transversal

B = DBO última de primeiro estágio

b = DBO no tempo t

C = concentração

C_s = concentração de saturação

C_T = concentração total de bactérias

C_P = concentração de bactérias agregadas

C_W = concentração de bactérias livres

c = coeficiente de retardo

c_{ss} = concentração de sólidos suspensos

D = coeficiente de difusividade

D_L = coeficiente de dispersão longitudinal

D_m = coeficiente de difusão molecular

E = taxa de evaporação

e_s = pressão de vapor de saturação do ar

e_a = pressão de vapor a uma altura de 183 cm (seis pés) sobre a superfície da água

e_{wb} = pressão de vapor de saturação

Fr = número de Froude

F_W = fração de bactérias livres

F_P = fração de bactérias agregadas

g = aceleração da gravidade

H = desnível

h = profundidade

$\bar{h}$ = profundidade média

$\bar{I}$ = energia luminosa média

I_0 = energia luminosa na superfície

i = intensidade de chuva

K = constante a ser fornecida ao QUAL2E para caracterizar o coeficiente de dispersão longitudinal D_L

k = constante de reação, base e (neperiana)

k_b = taxa de decaimento de coliformes

k_d = coeficiente de partição

k_e = coeficiente de extinção de luz

k_{b1} = taxa de mortalidade de coliformes

k_{bi} = taxa de perda de coliformes por radiação solar

k_{bs} = taxa de perda de coliformes por sedimentação

k_n = taxa de decaimento de nitrogênio

k_p = taxa de decaimento de fósforo

k' = constante de reação, base 10

k_2 = coeficiente de reaeração

L = comprimento

M = massa

n = número de Manning

O_s = concentração de saturação de oxigênio dissolvido

pa = pressão barométrica

P = perímetro molhado

Ps = porcentagem de água salgada

Q = vazão

q = fluxo de massa da substância

R = raio hidráulico

r = taxa de renovação superficial

S = declividade do canal

SD = profundidade do disco de Secchi

S' = declividade da linha de energia

$\overline{S}$ = declividade média

T = temperatura absoluta

T_a = temperatura de bulbo seco

T_{wb} = temperatura de bulbo úmido

t = tempo

t_c = tempo de concentração = tempo de percurso

U = velocidade

u_s = velocidade de sedimentação

u' = variação da velocidade em relação à velocidade média

$\overline{u}$ = velocidade média

u* = velocidade de corte

V = velocidade do vento, medida a 183 cm (seis pés) sobre a superfície da água

y_0 = profundidade do escoamento

W = largura do canal

α = constante de proporcionalidade

Δx = comprimento do elemento computacional

ΔM = massa de poluente ou traçador

ΔV = volume elementar

λ = coeficiente de desabsorção

δ = espessura da camada superficial

ε_t = coeficiente de dispersão turbulenta transversal

ε_v = coeficiente de dispersão turbulenta vertical

κ = constante de von Kàrmàn

∇ = operador gradiente = $\frac{\partial}{\partial x}\bar{i} + \frac{\partial}{\partial y}\bar{j} + \frac{\partial}{\partial z}\bar{k}$, onde $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{k})$ são vetores unitários no sistema de coordenadas cartesianas

RESUMO

O presente trabalho contém um estudo detalhado da qualidade da água do rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, tendo resultado na elaboração de um modelo computacional que permite simular a qualidade da água no rio na ausência do aproveitamento hidrelétrico de Salto Caxias.

Na fase inicial desse estudo foi realizado um levantamento detalhado da região em consideração, identificando-se as fontes potenciais de poluição e os parâmetros físicos mais importantes do sistema. Com o auxílio do modelo computacional EPA-QUAL2E foram então feitas diversas simulações de OD, DBO, coliformes fecais, nitrogênio, fósforo e algas.

O modelo desenvolvido possibilita comparação da situação alterada (reservatório) com a situação original (rio) para quaisquer condições de contorno.

ABSTRACT

The present work comprises a detailed study of the water quality of the Iguaçu River in the vicinity of the Salto Caxias power plant. It resulted in a computational model which simulates the water quality in the river in the absence of the power plant.

At first, a detailed study of the region was conducted, in order to identify the pontential sources of pollution and the most important physical parameters involved. With the aid of the computational model QUAL2E, several simulations of DO, BOD, fecal coliforms, nitrogen, phosporous and algae were carried out.

The model obtained allows comparisons between the modified situation (reservoir) and the original one (river), under any boundary conditions.

1 . INTRODUÇÃO

É cada vez maior a necessidade de se dispor de um conhecimento adequado dos fenômenos de transporte existentes em um curso de água. Se de um lado existe uma cobrança crescente da preservação dos recursos hídricos, por outro lado a demanda destes mesmos recursos também aumenta.

Na análise dos problemas relacionados com a água no meio ambiente, os processos de transporte são de fundamental importância. Quanto mais se conhecer a respeito destes processos, maior será a capacidade humana de identificar, prever e minorar os impactos ambientais decorrentes do uso da água, seja para geração de energia, abastecimento público ou outra destinação. O monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos se constitui em um poderoso instrumento para a avaliação da oferta hídrica, base para decisões do aproveitamento múltiplo e integrado da água, bem como para a minimização de impactos ao meio ambiente.

Um dos usos da água que requer especial atenção é o de geração de energia através de usinas hidrelétricas. A construção de barragens produz efeitos ambientais decorrentes da inundação de grandes áreas de vegetação e áreas agrícolas. O afogamento desta massa orgânica pode provocar alterações na composição química e biológica das águas represadas. Além disso, existe a transformação localizada de um rio em um reservatório, o que altera de maneira significativa o comportamento do curso de água, tanto sob o ponto de vista físico quanto sob os pontos de vista químico e biológico.

Uma modelagem adequada do sistema hídrico antes da formação do reservatório proporciona uma base de dados segura para tomada de decisões. Além de uma análise das condições do sistema ainda na fase rio, serve de base para futuras comparações, depois da formação do reservatório. Permite, assim, analisar as alterações aparentemente provocadas pelo reservatório, à luz de sua possível inexistência, para uma grande variedade de condições de contorno, indicando responsabilidades e auxiliando no estudo de alternativas de solução de problemas.

Este estudo assume importância por de ser a hidroeletricidade a principal opção adotada no Brasil para a geração de energia elétrica. Atualmente cerca de 92% da energia gerada no país vem de usinas hidrelétricas e uma mudança nesta situação é pouco provável, pelo menos nos próximos vinte anos, uma vez que, até o presente, foram aproveitados apenas 25% (Relatório de Impacto Ambiental de Salto Caxias - RIMA) do potencial hidrelétrico estimado. Hoje a oferta de energia no Brasil é realizada por dois grandes sistemas interligados: os sistemas norte/nordeste e

sul/sudeste/centro-oeste. As interligações das usinas, além de melhorarem a confiança no atendimento às necessidades de energia elétrica, permitem aumentar a oferta total de energia sem a construção de novos empreendimentos. De acordo com estudos feitos pelo setor elétrico (Informe Estatístico Anual 1996, Companhia Paranaense de Energia - COPEL), entre as alternativas energéticas de maior importância destacam-se a hidráulica, o carvão, o petróleo e a nuclear. A hidráulica, por ser uma fonte renovável, além de econômica e abundante no país, tem prioridade de utilização. O processo de mudança dos investimentos para a termoeletricidade ocorrerá após o ano 2010 ou 2020, dependendo da economia do país. Até esta época as fontes hidráulicas serão economicamente mais interessantes, sendo que o atendimento da necessidade de energia elétrica da região sul/sudeste/centro-oeste deverá, até o ano de 2005, ser realizado através da utilização dos rios disponíveis nestas regiões.

O estado do Paraná possui um dos maiores potenciais hídricos do país. As usinas hidrelétricas produzem quase 100 % da energia elétrica gerada no estado. A produção de energia elétrica da COPEL em 1996 atingiu 18.625 GWh, 42,2% superior aos 13.097 GWh produzidos em 1995, devido às altas afluências verificadas na cascata do rio Iguaçu e ao processo recessivo que os reservatórios da região sudeste atravessaram durante o ano de 1996. Somente as usinas Bento Munhoz da Rocha Netto e Segredo foram responsáveis por cerca de 88 % da geração total (Informe Estatístico Anual 1996, COPEL) da COPEL.

A produção de energia hidráulica no estado passou de 37.321 tEP (toneladas equivalentes de petróleo) em 1980 para 79.627 tEP em 1994, o que significa um aumento de 113,4 % na produção de energia hidráulica (Balanço Energético do Paraná 1980-1994, COPEL).

Apesar da importância da produção de energia hidráulica, tanto no estado do Paraná quanto no resto do país, não se pode deixar de dar atenção aos problemas decorrentes das alterações do meio ambiente devido ao barramento dos rios. Estas alterações precisam ser conhecidas, e dentro do possível minoradas, para que os impactos ambientais sejam tais que não comprometam a viabilidade dos empreendimentos, fornecendo energia e ao mesmo tempo garantindo a preservação dos recursos hídricos envolvidos.

2 . OBJETIVO

O objetivo da presente dissertação é o estudo dos fenômenos de transportes. bem como a análise da qualidade da água em rios, através da aplicação de modelos matemático-computacionais.

Para isto foram utilizados dados fornecidos pela Companhia Paranaense de Energia - COPEL, referentes ao rio Iguaçu e a seus afluentes principais na região de implantação da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, mais precisamente entre a Usina Hidrelétrica de Salto Osório e a foz do rio Andrada, afluente da margem direita do rio Iguaçu, a jusante da usina de Salto Caxias (ver anexo 01).

3 . METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma análise detalhada dos dados disponíveis referentes ao projeto da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, tendo como base o Estudo de Impacto Ambiental, bem como uma extensa pesquisa bibliográfica a respeito de processos de transporte em rios e reservatórios.

A seguir, foram realizadas consultas à Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR e à Base Pública do Estado - BPUP, um banco de dados sócio-econômicos, físicos e administrativos do estado do Paraná, mantido pelo Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social - IPARDES. Dessa forma foram obtidos dados de população, abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto para os trinta e seis municípios da bacia hidrográfica do rio Iguaçu compreendida entre Salto Osório e a foz do rio Andrada. Estas informações foram então manipuladas e utilizadas no fornecimento de dados ao modelo computacional de simulação da qualidade da água em rios.

O modelo computacional selecionado foi o QUAL-2E, desenvolvido pela EPA- USA (**E**nvironmental **P**rotection **A**gency), e disponível gratuitamente na Internet (http://www.epa.gov/OST/QUAL2E-windows/). A escolha deveu-se à larga utilização do modelo no âmbito mundial, à existência de interface gráfica de fácil utilização e à disponibilidade do programa fonte para eventuais modificações. A seção 4.2 apresenta uma descrição detalhada do modelo.

Os dados referentes à qualidade da água na região em estudo foram obtidos em campanhas de coleta de amostras realizadas mensalmente em 14 pontos, conforme pode ser observado na tabela 01. O anexo 01 mostra a localização destes pontos, sendo quatro no próprio rio Iguaçu, um no rio Cotejipe, dois no rio Tormenta, um no rio Adelaide, dois no rio Jaracatiá, dois no rio Chopim e dois no rio Guarani. A partir de novembro de 1997 foi operado um segundo ponto de coleta no rio Adelaide.

Em cada um destes pontos são determinados em campo: a temperatura da água e oxigênio dissolvido (mg/l) em diversas profundidades, a temperatura do ar, condutividade, pH e turbidez. São determinados em laboratório o nitrogênio total, o nitrogênio amoniacal, o nitratos, os nitritos, o fósforo total, o fósforo dissolvido, a dureza, a alcalinidade total, os sólidos totais, os sólidos dissolvidos, os sólidos suspensos, os sólidos sedimentáveis, os óleos e graxas, os cianetos, os fenóis, os cloretos, os fluoretos, os sulfetos, os sulfatos, a sílica, o cálcio, o ferro, o sódio, o potássio, o magnésio, a DBO, a DQO, além de fito e zooplâncton.

Como estas coletas são efetuadas em campanhas integradas com investigações ictiológicas, elas duram em média dez dias. Assim, os dados obtidos não se referem a um mesmo instante, tendo-se adotado a seguinte hipótese para a simulação do sistema: **toma-se a vazão média durante o período de coleta e considera-se os parâmetros de qualidade da água constantes no período.**

Tabela 01

- Localização dos Pontos de Coleta -

Localização	Ponto	Latitude	Longitude
Rio Iguaçu (jusante)	P01	25° 32' 30"	53° 30' 45"
Rio Cotejipe	P02	25° 33' 43"	53° 29' 57"
Rio Iguaçu	P03	25° 31' 52"	53° 29' 24"
Rio Adelaide	P04	25° 27' 43"	53° 18' 45"
Rio Tormenta	P05	25° 27' 35"	53° 20' 57"
Rio Tormenta	P06	25° 23' 59"	53° 21' 12"
Rio Iguaçu	P07	25° 32' 50"	53° 18' 12"
Rio Guarani	P08	25° 25' 25"	53° 07' 30"
Rio Guarani	P09	25° 23' 36"	53° 06' 21"
Rio Jaracatiá	P10	25° 38' 05"	53° 17' 17"
Rio Jaracatiá	P11	25° 48' 33"	53° 10' 35"
Rio Chopim	P12	25° 35' 12"	53° 04' 44"
Rio Iguaçu	P13	25° 33' 51"	53° 07' 25"
Rio Chopim	P14	25° 34' 17"	53° 06' 14"
Rio Adelaide	P15	25° 22' 44"	53° 16' 36"

Os resultados obtidos foram então cuidadosamente analisados e efetuada calibração e validação do modelo.

4 . REVISÃO DA LITERATURA

4 . 1 FENÔMENOS DE TRANSPORTE

O transporte de massa em um determinado corpo de água pode se dar de diversas formas, ou, mais freqüentemente, associação de várias delas (Fischer, 1979; Porto, 1991):

- ADVECÇÃO: transporte de um constituinte pelo campo de velocidades do meio fluido que o contém;

- CONVECÇÃO: transporte vertical induzido por instabilidade hidrostática, ou seja, decorrente de gradientes verticais de densidade, que é o que ocorre em lagos e reservatórios submetidos a, por exemplo, um esfriamento de suas camadas superiores;

- DIFUSÃO MOLECULAR: espalhamento aleatório de partículas devido ao movimento aleatório das moléculas, representado matematicamente pela lei de Fick (ver equação 4.1.2);

- DIFUSÃO TURBULENTA: análoga à difusão molecular, porém com origem no movimento turbulento dos fluidos, e causada por vórtices dos mais variados tamanhos e orientações existentes no escoamento;

- ESCOAMENTO DE TENSÃO TANGENCIAL: também chamado de espalhamento por advecção diferenciada, este conceito é relativo à ocorrência de fenômenos de cisalhamento, isto é, ocorre quando camadas adjacentes de um fluido apresentam deslocamentos relativos entre si; é um fenômeno de importância fundamental no transporte de poluentes;

- DISPERSÃO: espalhamento de partículas devido ao efeito combinado de tensão tangencial e de difusão (tanto molecular quanto turbulenta).

Outro conceito de importância fundamental é o de concentração, C, definido como a quantidade de massa de um poluente ou traçador por unidade de volume de fluido. Matematicamente é dada pelo limite (Fischer, 1979):

$$C = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \qquad (4.1.1)$$

onde: ΔM = massa do poluente ou traçador [M]

ΔV = volume elementar [L^3]

C = concentração de massa [ML^{-3}]

As unidades das variáveis na equação acima e nas demais equações apresentadas neste trabalho são indicadas genericamente no sistema Massa, Comprimento e Tempo [MLT]. Por exemplo, a concentração [ML^{-3}] pode ser expressa em diversas unidades: kg/m^3, mg/l, g/l, etc.

Uma equação de importância fundamental para a análise de processos de transporte foi proposta em 1855 pelo fisiologista alemão Adolph Fick para descrever o fenômeno da difusão molecular de uma substância em outra. Em seu artigo intitulado "Über Diffusion", Fick mostrou como a lei de Fourier para a difusão de calor conduziria a uma hipótese para descrever o processo de difusão molecular:

"O fluxo de massa de uma substância, ou seja, a massa da substância que atravessa uma superfície unitária na unidade do tempo, em uma determinada direção, é proporcional ao gradiente de concentração da substância naquela direção".

Para um sistema unidirecional (Fischer, 1979):

$$q = -D\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (4.1.2)$$

onde: q = fluxo de massa [$ML^{-2}T^{-1}$]

C = concentração de massa [ML^{-3}]

D = coeficiente de difusividade [L^2T^{-1}]

x = comprimento na direção x [L]

Em três dimensões:

$$q = -D\nabla C \qquad (4.1.3)$$

onde:

$$\nabla = \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial z} \qquad (4.1.4)$$

é o operador gradiente [L^{-1}].

Através da equação acima e da análise linear, chega-se à solução fundamental da equação de difusão para a injeção pontual e instantânea de uma massa M em um fluido estacionário, em x = 0 (Fischer, 1979):

$$C(x,t) = \left(\frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \right) \exp - (x^2 / 4Dt) \qquad (4.1.5)$$

Quando o fluido que recebe o constituinte possui velocidade própria, então este constituinte é transportado não só por difusão mas também pelo próprio meio que o contém. Do ponto de vista matemático, a existência da advecção é considerada através da reformulação do equacionamento do fluxo. Supõe-se que o processo de transporte pela difusão e pelo movimento do fluido (com velocidade u), ocorram separadamente e sejam cumulativos, isto é, a difusão ocorre como se o fluido estivesse em repouso. O fluxo total de massa neste caso pode ser descrito pela seguinte expressão (Fischer, 1979):

$$q = \mathbf{u}C + (-D\frac{\partial C}{\partial x}) \qquad (4.1.6)$$

Onde, à direita da igualdade, o primeiro termo refere-se à advecção e o segundo à difusão.

De modo geral, os movimentos dos fluidos no meio ambiente são quase sempre turbulentos, com o processo de difusão turbulenta ocorrendo de maneira análoga ao de difusão molecular. Como os processos de difusão turbulenta são aleatórios, eles são tratados de forma estatística.

Deve-se salientar, no entanto, que para análises de engenharia ambiental as flutuações e irregularidades são tão importantes quanto as médias. Se, por exemplo, a concentração média de um determinado poluente presente em um reservatório não oferece riscos à vida aquática, o mesmo não pode ser afirmado com relação aos valores instantâneos de concentração. Valores de concentração acima da média podem oferecer riscos à vida aquática, tornando falsa a conclusão obtida com o uso do valor da concentração média.

Assim, é preciso uma análise detalhada dos resultados obtidos através do uso de modelos matemáticos, evitando conclusões errôneas baseadas apenas em valores médios.

Pode-se definir um coeficiente de difusão turbulenta, ε_x [ML^2T^{-1}], análogo ao coeficiente de difusão molecular, através da seguinte relação:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2}\frac{d\langle X^2 \rangle}{dt} \qquad (4.1.7)$$

onde: $X = X(\xi, \eta, \zeta, t, t_0)$

(função aleatória que define a posição de uma partícula, onde ξ, η e ζ são as coordenadas cartesianas)

No caso de escoamentos de tensão tangencial a dispersão na direção do fluxo é causada principalmente pelo perfil de distribuição de velocidades na seção transversal.

Processos de transporte em rios

A dispersão de um constituinte em um rio pode ser dividida em três estágios, conforme ilustrado na figura abaixo:

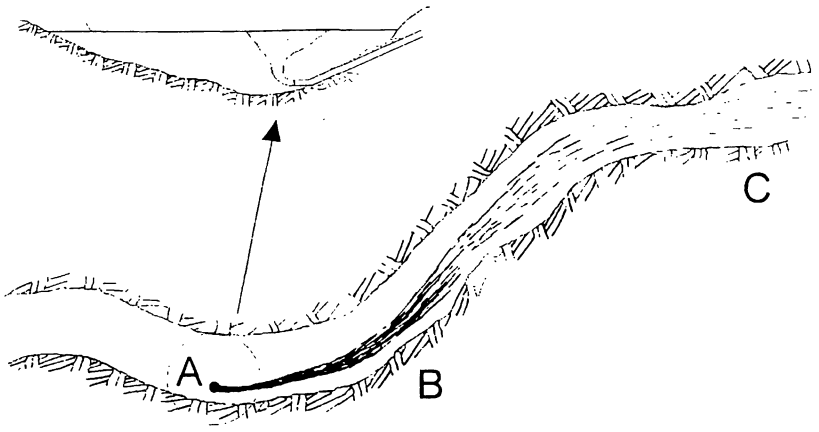


Figura 01

- Mecanismos de transporte em rios -

(Fischer et al., 1979)

Inicialmente, a quantidade de movimento e o empuxo atuantes na massa de uma substância lançada em um rio determinam a taxa de diluição, figura 01 (A); com a diluição do traçador, os efeitos da quantidade de movimento e do empuxo são também diluídos, levando a um segundo estágio no qual o traçador é misturado à vazão do rio na seção transversal, principalmente devido à turbulência do escoamento (B); em um terceiro e último estágio, quando o traçador já está totalmente disperso na seção transversal, o processo de dispersão devido à tensão tangencial tende a eliminar a variação de concentração no sentido longitudinal (C).

Quando um efluente é descarregado em um rio, como pode ser observado na figura 02, existe a formação de um jato ou uma pluma. De acordo com Fischer et al., 1979, um jato é uma descarga de um fluido a partir de um orifício ou ranhura, em um corpo de fluido de mesma densidade ou similar. O termo pluma (do inglês *plume*) pode ser entendido como sendo um escoamento de densidade. Uma pluma se assemelha a um jato, mas é causada por uma fonte potencial de energia, cuja intensidade depende da diferença entre a densidade do ambiente em que é descarregada e sua própria densidade. A existência dessa energia potencial fica bem ilustrada quando se consideram dois líquidos de densidades diferentes separados por uma membrana horizontal flexível e delgada, com o líquido mais denso acima da membrana e o menos denso abaixo desta. A abertura de um orifício nesta membrana causa, de imediato, o escoamento do fluido de maior densidade para o interior do de menor densidade. Há, portanto, a produção de trabalho, caracterizado pela existência do movimento do fluido de maior densidade e sua progressiva diluição no fluido de menor densidade se os fluidos são imiscíveis ou a formação de um escoamento singular em caso contrário. O escoamento surgiu não como decorrência de uma diferença de pressão, outra forma de energia potencial, pois prevalecia o equilíbrio estático antes da abertura do orifício, mas sim como decorrência da diferença das densidades dos dois fluidos. Se a diferença de densidades não existisse o sistema permaneceria em repouso absoluto para fluidos não miscíveis ou ocorreria um processo de difusão molecular de um fluido no outro em caso contrário, mas não a formação de uma pluma.

Figura 02

- Pluma resultante de uma descarga constante de um corante, no rio Columbia, Washington - (Fischer et al., 1979)

Como exemplo (Fischer et al., 1979), se o bocal de uma mangueira for submerso em um corpo de água como um tanque, tem-se um jato, resultante da quantidade de movimento da água que sai pelo bocal da mangueira. Já um campo em chamas forma uma pluma de fumaça e gases aquecidos sobre o campo, formada pelo aquecimento do ar, que dessa maneira tem sua densidade reduzida, sofrendo ascensão.

Tanto os jatos quanto as plumas podem ser laminares ou turbulentos e, assim como em escoamentos em condutos, é possível associar um número de Reynolds ao jato, que se for suficientemente grande, garante que o escoamento é totalmente turbulento. Junto à fonte, o jato ou a pluma são governados inteiramente pelas condições iniciais, que incluem a geometria do jato ou pluma, a velocidade média na saída, a diferença inicial entre as densidades do fluido descarregado e do meio circundante, além da intensidade da turbulência.

Processo de mistura vertical

Para o caso de um canal uniforme, retilíneo, de largura infinita e profundidade constante, um coeficiente de dispersão turbulenta vertical pode ser obtido a partir do perfil logarítmico de velocidade de von Kàrmàn e do equilíbrio de forças. A lei logarítmica do perfil de velocidade leva à seguinte expressão para o coeficiente de mistura vertical ε_v [ML^2T^{-1}] da quantidade de movimento (Fischer, 1979):

$$\varepsilon_V = \kappa h u * \left(\frac{z}{h}\right)\left[1 - \frac{z}{h}\right] \qquad (4.1.8)$$

onde: κ = constante de von Kàrmàn $\approx 0{,}40$

h = profundidade [L]

z = posição ao longo do eixo z [L] (ver figura 03)

u* = velocidade de corte [LT^{-1}], dada por

$$u* = \sqrt{gdS} \qquad (4.1.9)$$

g = aceleração da gravidade [LT^{-2}]

S = declividade do canal

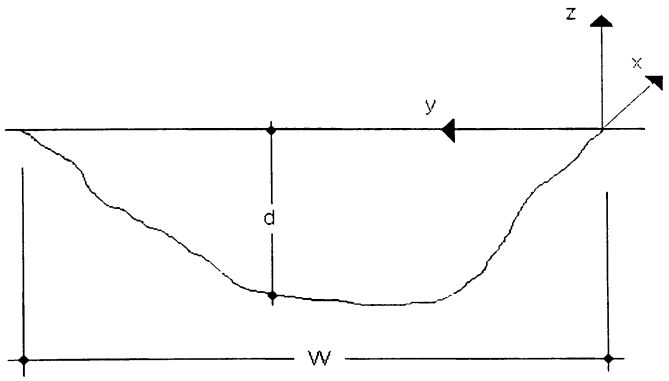


Figura 03

- Definição do sistema de coordenadas -

(Fischer et al. 1979)

Pela analogia de Reynolds, este mesmo coeficiente pode ser usado para o transporte de massa. Usando $\kappa = 0{,}40$ e tomando uma profundidade média, tem-se para o coeficiente de dispersão turbulenta vertical (Fischer, 1979):

$$\bar{\varepsilon}_v = 0{,}067 du^* \qquad (4.1.10)$$

Processo de mistura transversal

Também para o caso de canais retangulares de grande largura, com base em diversos resultados experimentais, conclui-se que uma média aproximada do valor de um coeficiente de dispersão turbulenta transversal é (Fischer, 1979):

$$\bar{\varepsilon}_t \cong 0{,}15 du^* \qquad (4.1.11)$$

Processo de mistura longitudinal

Ainda para o caso de um canal retangular de grande largura, a turbulência causa uma mistura longitudinal, à mesma taxa da mistura transversal, devido à falta de contornos sólidos para inibir o movimento. Entretanto, este processo de mistura longitudinal pode ser geralmente desprezado, uma vez que a importância da dispersão longitudinal devido aos efeitos de tensões tangenciais (perfil transversal de velocidades) é significativamente maior.

Canais naturais

As equações anteriores aplicam-se a um canal uniforme, retilíneo, de largura infinita e profundidade constante. As condições encontradas em canais naturais são bem diferentes. Neste caso existe variação irregular da profundidade, curvas e margens.

Apesar da falta de uniformidade existente em um canal natural, acredita-se que essas irregularidades não influenciem de maneira significativa a taxa de dispersão vertical, e usa-se normalmente a equação (4.1.10) para caracterizá-la

Os valores de ε_t/du^* em canais uniformes retilíneos situam-se geralmente entre 0,1 e 0,2. As curvas e irregularidades nas margens aumentam o coeficiente de dispersão transversal, de maneira que o valor de ε_t/du^* quase nunca é menor do que 0,4, situando-se normalmente entre 0,4 e 0,8. Por isso, para fins práticos, é conveniente utilizar a seguinte expressão (Fischer, 1979):

$$\varepsilon_t / du^* = 0{,}6 \pm 50\% \qquad (4.1.12)$$

Dispersão longitudinal

Depois de uma determinada substância se achar completamente misturada na seção transversal, o processo final de mistura é a redução dos gradiente longitudinais de concentração, promovida pela dispersão longitudinal em conseqüência dos efeitos de tensão tangencial.

Nesse caso, a posição ao longo do eixo vertical também tem importância, pois a velocidade em cada ponto é função do perfil de distribuição de velocidades, como ilustrado na figura 04.

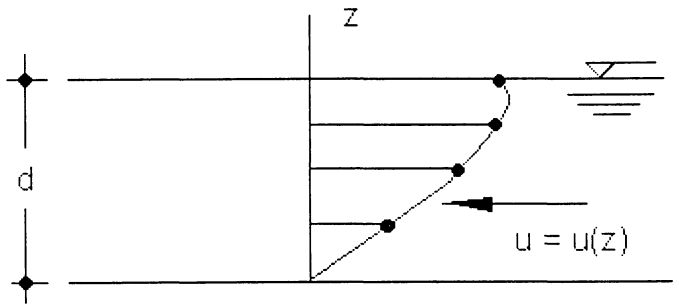


Figura 04

- Perfil de Distribuição de Velocidades -

(Fischer et al. 1979)

A velocidade de uma determinada molécula é essencialmente a da linha de corrente na qual ela está localizada. Devido à difusão molecular e turbulenta, cada partícula move-se aleatoriamente para frente e para trás ao longo da seção transversal. Depois de um determinado tempo, a localização de uma determinada partícula independe de sua posição inicial, e sua velocidade também independe da velocidade inicial. Fischer (1979) demonstrou que a variação da velocidade na seção transversal tem também grande importância. O perfil transversal de distribuição de velocidades é, na realidade, mais importante na dispersão longitudinal do que o perfil vertical.

A propriedade de difusão devido ao perfil de velocidade é geralmente expressa por D_L [L^2T^{-1}], chamado de coeficiente de dispersão longitudinal. O papel de K é o mesmo de D no caso da difusão molecular. A equação unidimensional de dispersão é (Fischer, 1979):

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \qquad (4.1.13)$$

onde:

$$\bar{C} = \frac{1}{h}\int_0^h C dy \qquad (4.1.14)$$

Um valor estimado de D_L pode ser dado pela equação 4.1.15 (Fischer, 1979):

$$D_L = -\frac{1}{A}\int_0^W u' \int_0^y h \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t h} u' \, h dy dy dy \qquad (4.1.15)$$

onde: A = área da seção transversal [L^2]

u' = variação da velocidade em relação à velocidade média [LT^{-1}]

h = profundidade do canal [L]

Através de estudos e resultados experimentais, Fischer chegou à seguinte expressão:

$$D_L = 0{,}011\bar{u}^2 W^2 / du^* \qquad (4.1.16)$$

onde: □ = velocidade média [LT^{-1}]

W = largura do canal [L]

4 . 2 MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS - QUAL2E-UNCAS

A simulação computacional do sistema físico no presente estudo é efetuada através do modelo de qualidade da água QUAL2E-UNCAS, cuja primeira versão foi desenvolvida na década de sessenta nos Estados Unidos, pelo Texas Water Development Board. Na seqüência, várias versões foram desenvolvidas pela EPA e, após extensivas revisões e testes o modelo passou a ser largamente utilizado.

Simula até 15 parâmetros de qualidade da água e é aplicável a sistemas dendríticos de rios que contenham meandros e que sejam bem misturados nas direções vertical e lateral. Utiliza a equação do balanço de massa, cuja solução é obtida pelo método das diferenças finitas. Algumas das principais hipóteses simplificadoras do modelo são de que o transporte do poluente nos rios ocorre de forma unidimensional e a adoção de características hidrogeométricas únicas para cada tramo. O modelo QUAL2E-UNCAS é um avanço do modelo QUAL2E que permite aferir o grau de precisão ou confiabilidade dos resultados obtidos. Esta análise pode ser feita de três diferentes maneiras:

- análise de sensibilidade: efetuada através do estudo da influência de cada variável separadamente, ou seja, varia-se o valor de um determinado parâmetro e observa-se sua influência no resultado;

- análise de erro de primeira ordem: considera a variação simultânea de várias variáveis, assumindo, porém, que estas são independentes;

- simulação de Monte Carlo: método que opera numericamente um sistema complexo de variáveis aleatórias. As variáveis de entrada são selecionadas aleatoriamente com base em uma distribuição de probabilidade pré-determinada, e a distribuição de dados de saída provenientes de diversas simulações, são estatisticamente analisados.

Os quinze parâmetros que podem ser simulados são:

1 - Oxigênio Dissolvido;

2 - Demanda Bioquímica de Oxigênio;

3 - Temperatura;

4 - Algas como Clorofila a;

5 - Nitrogênio Orgânico;

6 - Amônia;

7 - Nitrito;

8 - Nitrato;

9 - Fósforo Orgânico;

10 - Fósforo Dissolvido;

11 - Coliformes;

12 - Constituinte Não Conservativo Arbitrário;

13 - Três Constituintes Conservativos Arbitrários.

O programa trabalha com sete tipos diferentes de elementos:

1) Elemento de Cabeceira (H = Headwater): início do rio principal e dos afluentes;

2) Estrutura Hidráulica (D = Dam): elemento que possui uma estrutura hidráulica;

3) Elemento de Exutória (E = Most Dowsnstream): último elemento do sistema a ser simulado;

4) Carga Pontual (P = Point Source): elemento que possui uma carga pontual;

5) Elemento de Retirada (W = Withdrawal): elementos que possuem decréscimo de vazão;

6) Junção (J = Junction): elemento de junção;

7) Elemento Padrão (S = Standard): os demais elementos que não se enquadram nos descritos acima.

A representação do protótipo no programa consiste em dividir o rio em estudo (e seus afluentes, quando desejado) em tramos, ou seja, trechos do rio (ver Figura 05). Além do programa admitir características hidrogeométricas (como coeficiente de rugosidade, declividade dos taludes e largura do canal) únicas ao longo de cada tramo, ele também assume parâmetros biológicos e químicos constantes para cada tramo. Como exemplo, valores diferentes do coeficiente de rugosidade de Manning podem ser especificados para tramos diferentes, mas cada um destes valores permanece constante ao longo de um tramo particular. Cada um dos tramos, por sua vez, é dividido em elementos computacionais de comprimento pré-definido.

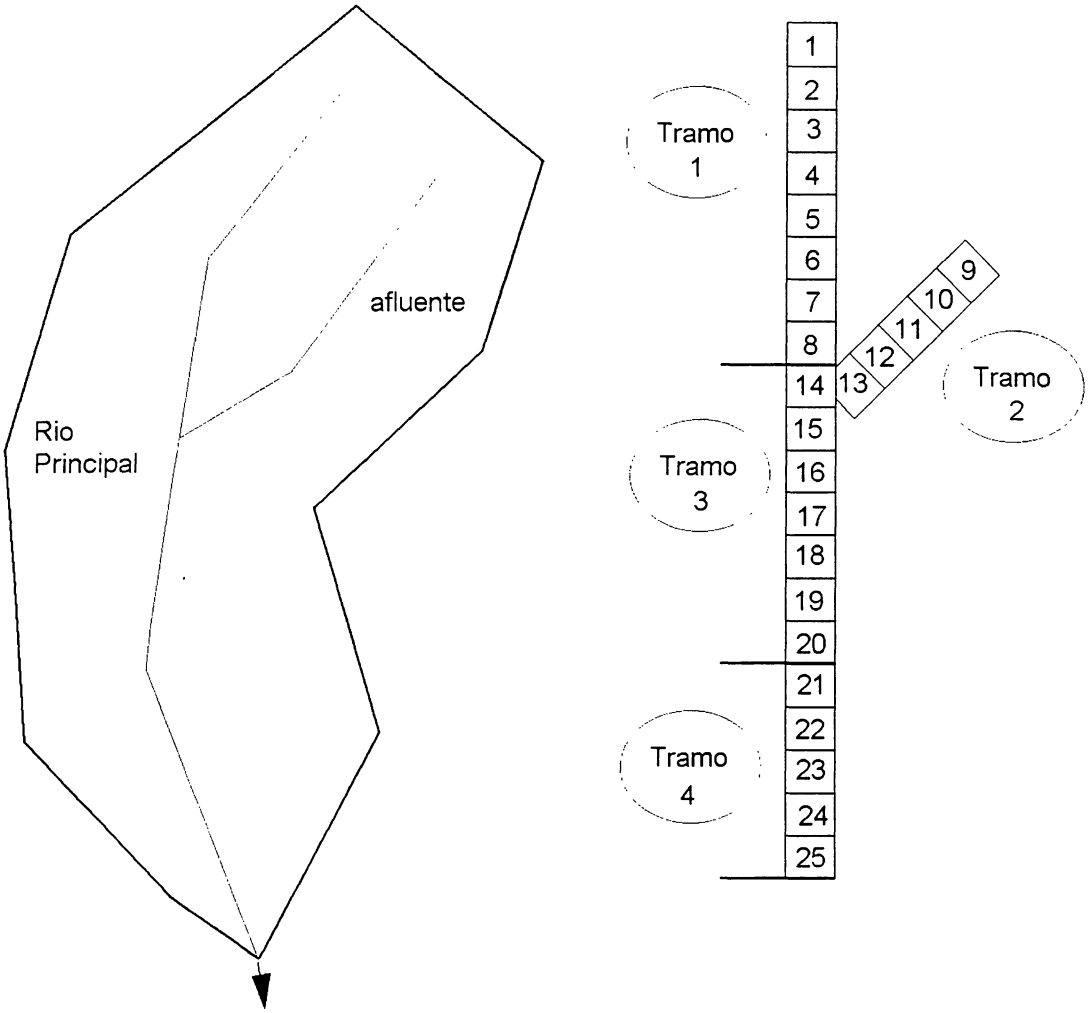


Figura 05

- Representação do Sistema no QUAL2E -

(Chapra, 1994)

Apesar de ter sido desenvolvido para ser um programa geral, ele possui algumas limitações, impostas durante a elaboração:

- número máximo de tramos: 50
- número máximo de elementos computacionais: 20 por tramo ou 500 no total
- número máximo de elementos de cabeceira: 10
- número máximo de elementos de junção: 9
- número máximo de cargas pontuais e elementos de retirada de vazão: 50

Conforme já comentado, a modelagem matemática é baseada na equação do transporte de massa, que consiste no balanço das entradas e saídas de um constituinte no sistema (ver Figura 06). Como nas simulações o sistema é composto por elementos computacionais, este balanço de massa

é aplicado a cada um desses elementos. O balanço engloba a entrada, a saída, as perdas por reação cinética e mecanismos de transporte dos constituintes de qualidade da água.

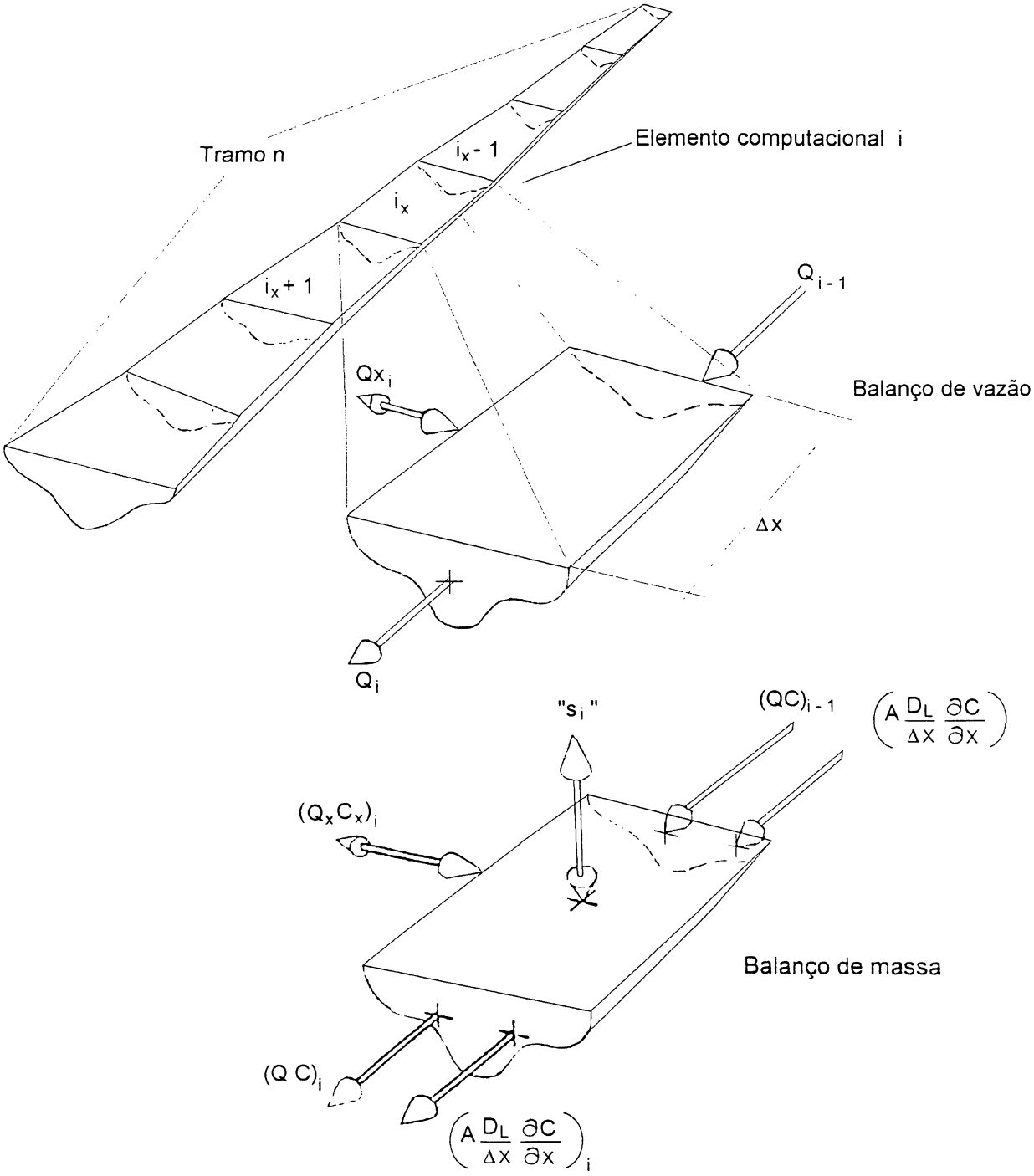


Figura 06

- Balanço de Massa no Elemento Computacional -

(Chapra, 1994)

onde: M = massa [M]

Δx = comprimento do elemento computacional [L]
Q_{i-1} = vazão a montante do elemento computacional [L^3T^{-1}]
Qx_i = fontes ou sumidouros externos [L^3T^{-1}]
Q_i = vazão a jusante do elemento computacional [L^3T^{-1}]
s_i = fontes ou sumidouros internos [L^3T^{-1}]
D_L = coeficiente de dispersão
A = área da seção transversal [L^2]
C = concentração [ML^{-3}]

A equação básica utilizada pelo programa é a equação de transporte de massa por advecção e dispersão (Chapra, 1994):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(A_x \bar{u}c)}{\partial x} dx + V\frac{dc}{dt} + s \qquad (4.2.1)$$

O primeiro termo da equação é a variação da massa do constituinte ao longo do tempo.

O segundo termo é a parcela da dispersão, sendo o seu efeito resultante da ação conjunta da difusão e da advecção diferenciada.

O terceiro termo corresponde a advecção, ou seja transporte de um constituinte pelo campo de velocidades do meio fluido que o contém.

O quarto termo corresponde às reações cinéticas, isto é, geração ou extinção do constituinte através de reações físicas, químicas ou biológicas com outras grandezas ou com o próprio fluido, ou ainda por tornar-se parte da cadeia alimentar existente no local. Como exemplo pode-se citar a respiração e fotossíntese de algas, hidrólise, volatização e biodegradação.

O quinto e último termo é relativo às entradas e saídas, que correspondem aos lançamentos e retiradas de vazão.

A equação é resolvida pelo método das diferenças finitas, uma técnica de solução simples e poderosa para a solução de problemas avançados de engenharia, que fornece um resultado aproximado, porém muito próximo do exato, para equações diferenciais complexas.

A utilização do modelo computacional requer o conhecimento de diversos coeficientes que representam os fenômenos físicos envolvidos. Entre eles estão o coeficiente de reaeração e a taxa de decaimento de DBO.

4 . 2 . 1 COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

A reaeração é o fenômeno físico de absorção de ar da atmosfera por um corpo líquido, constituindo-se no principal meio pelo qual um rio repõe o oxigênio consumido nos processos de biodegradação. A importância de um conhecimento adequado deste fenômeno se dá pelo fato de ser a manutenção de oxigênio dissolvido o fator determinante do suporte de vida aquática, além de estabelecer a quantidade de efluentes, tanto domésticos quanto industriais e rurais, que o rio pode absorver sem que haja prejuízo para o meio ambiente.

A quantidade de oxigênio dissolvido consumida é governada por diversos fatores, como por exemplo a DBO associada a cargas poluidoras, respiração de flora e fauna aquática e intrusão de oxigênio dissolvido no lodo bentônico.

O fenômeno de reaeração não é ainda totalmente conhecido. De uma maneira geral, moléculas de oxigênio atingem a superfície líquida, sendo que uma parte é dissolvida enquanto outras são ricocheteadas de volta à atmosfera. A quantidade de moléculas absorvidas diminui à medida que a camada superficial torna-se saturada. Este gás absorvido é então transportado às camadas inferiores através de processos de difusão descritos pela lei de Fick.

Os modelos conceituais existentes para a determinação do coeficiente de reaeração são de pouca aplicação, pois necessitam de dados de difícil quantificação ou obtenção em campo, como por exemplo a determinação da espessura camada superficial (δ) ou a taxa de renovação superficial (r). Alguns destes modelos encontram-se listados a seguir (Lau, 1972):

Lewis e Whitman (1924): Postulam a existência de duas camadas laminares na interface ar-água, uma líquida e outra gasosa (figura 07). O gás passa para a camada laminar líquida através de difusão molecular e penetra no restante do corpo líquido através de difusão turbulenta, conforme pode ser observado na equação 4.2.1.1 (Lau, 1972):

$$q = -D_m \left[\frac{\partial C}{\partial y}\right]_{y=0} = D_m \frac{C_s - C_0}{\delta} \qquad (4.2.1.1)$$

onde: C_0 = concentração no corpo principal do fluido $[ML^{-3}]$

C_s = concentração de saturação $[ML^{-3}]$

D_m = coeficiente de difusão molecular

q = taxa de transferência de massa [ML^{-3}]

δ = espessura da camada superficial [L]

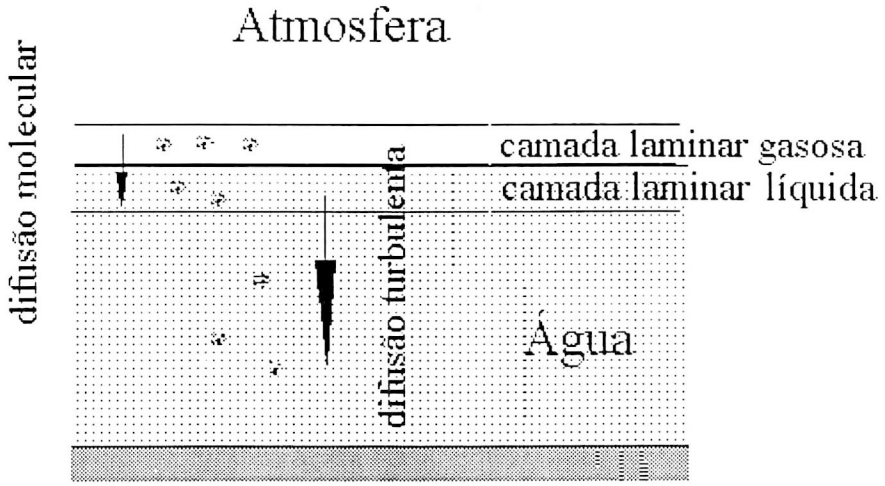


Figura 07

- Reaeração - esquema de Lewis e Whitman -

Higbie (1935): Neste outro modelo a hipótese é de que o fluido na interface ar-água é continuamente substituído por elementos de fluido das camadas inferiores.

Para Higbie, antes de ocorrer o processo de difusão turbulenta proposto por Lewis e Whitman os elementos de fluido da camada laminar líquida são substituídos por elementos de fluido das camadas inferiores como pode ser observado na figura 08 (Lau, 1972):

$$q = \frac{1}{t_e}\int_0^{t_e}\sqrt{\frac{D_m}{\pi t}}\left(C_s - C_0\right)dt = 2\sqrt{\frac{D_m}{\pi t_e}}\left(C_s - C_0\right) \qquad (4.2.1.2)$$

onde: t_e = tempo necessário para a formação de uma nova camada laminar líquida [T]

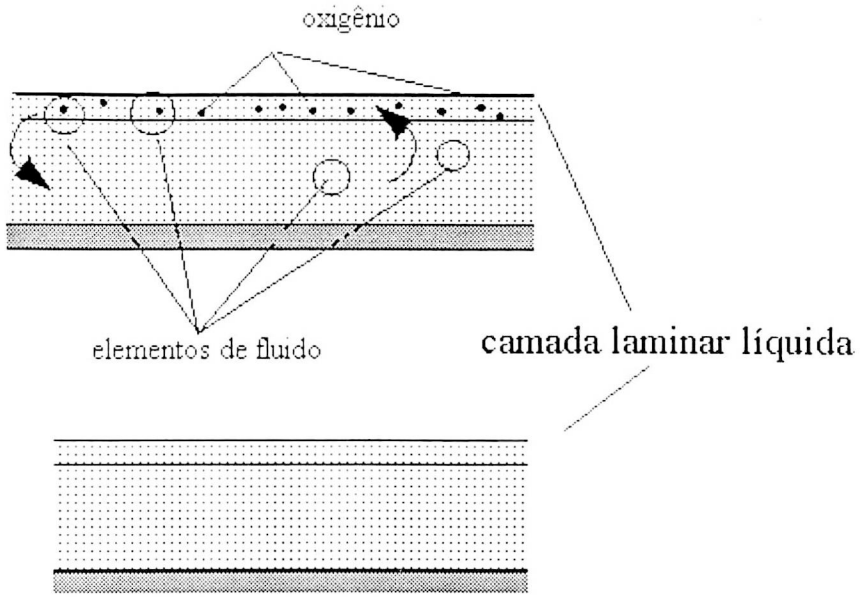


Figura 08

- Reaeração - esquema de Higbie -

Danckwerts (1951): Este modelo conceitual assume uma camada líquida estável na superfície, cujos elementos são transportados para as camadas inferiores através de vórtices (Lau, 1972):

$$q = (C_S - C_0)\sqrt{D_m\, r} \qquad (4.2.1.3)$$

onde: r = taxa de renovação superficial

Dobbins (1956): Assume que o gradiente de concentração no corpo de água principal (sem a camada superficial) é constante, uma vez que é muito pequeno se comparado com o existente na camada superficial. Desta forma, a equação de difusão deve ser aplicada somente à camada superficial (Lau, 1972):

$$q = \left(C_s - C_0\right)\sqrt{D_m\, r}\ \operatorname{cotg}\sqrt{\frac{r\delta^2}{D_m}} \qquad (4.2.1.4)$$

King (1966): Desenvolveu um modelo geral para o processo de transferência de massa, que preconiza a existência de um zona de resistência à transferência de massa junto à superfície. Neste caso, vórtices de tamanho maior que esta zona contribuem para a renovação superficial, enquanto que os vórtices de tamanho menor contribuem para a formação de gradiente de difusão dentro desta zona.

Fortescu e Pearson (1967): Tenta incorporar o efeito de transporte convectivo devido à formação de vórtices. Assumem que a camada superficial é formada por uma única linha composta de células de vórtices quadradas.

Rudis e Machek (1971): Este modelo conceitual é quase totalmente estatístico. A hipótese principal é a de que qualquer parte da superfície líquida de um escoamento em canais alterna períodos de superfície não perturbada e períodos onde existe a formação de vórtices e a renovação superficial é evidente.

Diversas equações empíricas ou semi-empíricas foram desenvolvidas com o objetivo de relacionar o valor do coeficiente de reaeração com variáveis mais facilmente mensuráveis, como profundidade, vazão e declividade. Estas equações funcionam como ferramentas para o profissional, não se preocupando com os mecanismos físicos envolvidos. A grande dificuldade para sua aplicação é o fato delas ajustarem-se bem apenas às condições particulares usadas para a sua determinação. O alcance dos dados utilizados na determinação das equações encontra-se na tabela 02.

Dos modelos listados a seguir, talvez a equação com a seqüência de dados experimentais mais confiáveis seja a obtida por Churchill-Elmore-Buckingham. Suas experiências foram realizadas em trechos de rios a jusante de barragens, onde as descargas eram praticamente desprovidas de DBO e a concentração de OD era baixa devido a longos períodos de retenção no reservatório. Os valores de concentração de OD foram obtidos em 16 locais diferentes, em 5 rios. Os pesquisadores mostraram que não havia gradiente significativo de OD na direção vertical, mas que, entretanto havia grandes variações ao longo da seção transversal, sendo as concentrações altas nas margens e baixas no centro. O valor de k_2 nas equações a seguir está expresso em dia^{-1}.

Churchill-Elmore-Buckingham (1962):

$$k_2 = 11{,}6 \frac{U^{0.969}}{\bar{h}^{1.673}} 1{,}0241^{(T-293.15)} \qquad (4.2.1.5)$$

onde: $\bar{h}$ = profundidade média [L]

T = temperatura absoluta

condições experimentais: $1{,}26 \times 10^{-4} < S < 2{,}35 \times 10^{-3}$

$0{,}65 \text{ m} < h < 3{,}48 \text{ m}$

$0{,}56 \text{ m/s} < U < 1{,}52 \text{ m/s}$

O'Connor-Dobbins (1958):

para C (Chèzy) < 17: $$k_2 = 86.400 \frac{D^{1/2} S^{1/4} g^{1/4}}{2{,}31 h^{5/4}} \qquad (4.2.1.6)$$

para C > 17: $$k_2 = 86.400 \frac{D^{1/2} U^{1/2}}{2{,}31 h^{3/2}} \qquad (4.2.1.7)$$

condições experimentais: $2{,}7 \times 10^{-5} < S < 3{,}6 \times 10^{-3}$

$0{,}27 \text{ m} < h < 7{,}38 \text{ m}$

$0{,}16 \text{ m/s} < U < 1{,}28 \text{ m/s}$

Krenkel-Orlob (1963):

$$k_{2.20^\circ C} = \frac{20{,}488 E^{0.4081}}{d^{0.66}} \qquad (4.2.1.8)$$

onde: E = U S g

condições experimentais: $7{,}5 \times 10^{-4} < S < 2{,}4 \times 10^{-2}$

$0{,}02 \text{ m} < h < 0{,}06 \text{ m}$

$0{,}04 \text{ m/s} < U < 0{,}65 \text{ m/s}$

Issacs-Gaudy (1968):

$$k_2 = 6{,}772 \frac{U}{d^{3/2}} \qquad (4.2.1.9)$$

condições experimentais: $0{,}65\ m < h < 3{,}48\ m$

$0{,}56\ m/s < U < 1{,}52\ m/s$

$$k_2 = 2{,}44 \frac{U}{d^{3/2}} \qquad (4.2.1.10)$$

condições experimentais: $0{,}02\ m < h < 0{,}06\ m$

$0{,}04\ m/s < U < 0{,}65\ m/s$

Thackston-Krenkel (1969):

$$k_2 = 1{,}296 \frac{D_L}{d^2} \qquad (4.2.1.11)$$

$$k_2 = 18{,}576 \frac{U^*}{d} \qquad (4.2.1.12)$$

$$k_2 = 10{,}80(1 + Fr^{1/2}) \frac{U^*}{d} \qquad (4.2.1.13)$$

onde:

$$U^* = (g\ R\ S)^{1/2} \qquad (4.2.1.13a)$$

$$Fr = U / (g\ d)^{1/2} \qquad (4.2.1.13b)$$

condições experimentais: $2{,}70 \times 10^{-5} < S < 2{,}04 \times 10^{-2}$

$0{,}01\ m < h < 7{,}38\ m$

$0{,}06\ m/s < U < 1{,}52\ m/s$

Owens (1964):

$$k_2 = 38{,}234 \frac{U^{0.67}}{d^{1.85}} 1{,}0241^{(T - 293{,}15)} \qquad (4.2.1.14)$$

condições experimentais: $0{,}10\ m < h < 3{,}48\ m$

$0{,}04\ m/s < U < 1{,}52\ m/s$

Negulescu-Rojanski (1969):

$$k_2 = 4{,}74 \left(\frac{U}{d}\right)^{0.85} \qquad (4.2.1.15)$$

condições experimentais: $0{,}09\ m < h < 0{,}58\ m$

$0{,}05\ m/s < U < 0{,}95\ m/s$

Bennett e Rathbun (Dziedzic[b], 1997), com base em todos os dados experimentais utilizados na determinação das equações acima, definiram erros padrão de estimativa, E_S e E_{SL}:

$$E_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(k_2)_e - (k_2)_c\right]_i^2}{n}} \qquad (4.2.1.16)$$

$$E_{SL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\log(k_2)_e - \log(k_2)_c\right]_i^2}{n}} \qquad (4.2.1.17)$$

onde: $(k_2)_e$ = valor estimado pela equação

$(k_2)_c$ = valor calculado com dados experimentais

O erro percentual foi definido como:

$$E_P = 100(1 - 10^{-E_{SL}}) \qquad (4.2.1.18)$$

Tendo como base todos os dados experimentais disponíveis, propuseram duas equações para o cálculo do k_2, tendo a primeira um erro percentual (E_P) de 31,5 % e a segunda um erro percentual de 37,5 % (Dziedzic[b]. 1997):

$$k_2 = 15{,}019 \frac{U^{0.413} S^{0.273}}{d^{1.408}} \qquad (4.2.1.19)$$

$$k_2 = \frac{31{,}681\ U^{0.607}}{d^{1.689}} \qquad (4.2.1.20)$$

Tabela 02

- Alcance dos dados experimentais -

Equação	declividade S		profundidade h (m)		velocidade u (m/s)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
4.2.1.5	$1{,}26 \times 10^{-4}$	$2{,}35 \times 10^{-3}$	0,65	3,48	0,56	1,52
4.2.1.6 4.2.1.7	$2{,}75 \times 10^{-5}$	$3{,}6 \times 10^{-3}$	0,27	7,38	0,16	1,28
4.2.1.8	$7{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}4 \times 10^{-2}$	0,02	0,06	0,04	0,65
4.2.1.9	-	-	0,65	3,48	0,56	1,52
4.2.1.10			0,02	0,06	0,04	0,65
4.2.1.11 4.2.1.12 4.2.1.13	$2{,}70 \times 10^{-5}$	$2{,}04 \times 10^{-2}$	0,01	7,38	0,06	1,52
4.2.1.14	-	-	0,10	3,48	0,04	1,52
4.2.1.15	-	-	0,09	0,58	0,05	0,95

A determinação de valores de k_2 continua sendo um desafio, pois nenhuma expressão teórica ou empírica satisfatória foi desenvolvida. A determinação prática torna-se, neste caso,

muito importante. O desenvolvimento de técnicas de medição envolvendo traçadores gasosos permite a determinação mais confiável do valor de k_2 e a possibilidade de comparação com os valores obtidos através de fórmulas.

Uma das técnicas (Bacchus, 1981) baseia-se na observação de que a taxa de desabsorção de um gás traçador é diretamente proporcional à concentração deste gás na água. expressa matematicamente por (Bacchus, 1981):

$$\frac{dC}{dt} = \lambda (C_{\infty} - C) \qquad (4.2.1.21)$$

onde: λ = coeficiente de desabsorção

C = concentração do gás na água no tempo t $[ML^{-3}]$

C_{∞} = concentração do gás na água, em equilíbrio com a atmosfera $[ML^{-3}]$

Assume-se que a concentração do traçador na atmosfera sobre a água é zero, sendo que a concentração em equilíbrio também é zero, logo:

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \qquad (4.2.1.22)$$

o que conduz a:

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{C_1}{C_2} \qquad (4.2.1.23)$$

Como a concentração é influenciada também por efeitos de difusão e de dispersão, é necessário também a utilização de um traçador conservativo para a determinação destes efeitos. Assim, o valor de λ é dado por (Bacchus, 1981):

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{(C_g / C_l)_u}{(C_g / C_l)_d} \qquad (4.2.1.24)$$

onde: Δt = tempo de percurso do ponto u ao ponto d, em dias [T]

C_g = concentração do gás traçador $[ML^{-3}]$

C_l = concentração do traçador conservativo $[ML^{-3}]$

u = índice que indica ponto a montante do tramo

d = índice que indica ponto a jusante do tramo

A relação entre o coeficiente de reaeração e o de desabsorção de gás é dado por:

$$k_2 = \lambda/R \qquad (4.2.1.25)$$

onde: R = relação entre o coeficiente de desabsorção para o gás traçador e o coeficiente de desabsorção para o oxigênio

Entre os gases traçadores que podem ser utilizador para a determinação prática do coeficiente de reaeração está o etileno, que pode ser medido em microgramas por litro através de um cromatógrafo de gás. É um dos mais solúveis e de mais baixo peso molecular entre os gases hidrocarbonos, possuindo um coeficiente de difusão molecular na água próximo ao do oxigênio, além de ser volátil e, portanto, não permanente no rio. Praticamente não é tóxico nas concentrações utilizadas e possui um custo baixo.

Como exemplo de traçador conservativo existe a Rodamina WT, que possui alta detectabilidade e boa difusividade. Como é um corante fluorescente, pode ser detectado mesmo a baixas concentrações a olho nu, e pode ser medido em níveis até menores do que 1 ppb. É importante salientar que a Rodamina WT possui atividade mutagênica e é um modificador ativo do DNA, portanto é necessário o uso de vestuário adequado para evitar contato direto.

Além da determinação in situ a partir do uso de traçadores, outro método, menos preciso porém também com bons resultados, é através do uso de um sólido solúvel flutuante. Utiliza-se, neste caso, ácido benzóico como o sólido flutuante. O método oferece maior simplicidade e menor custo (Bicudo, 1989).

4 . 2 . 2 TAXA DE DECAIMENTO DE DBO

Na natureza os rios funcionam como um imenso sistema de tratamento de esgotos devido à sua capacidade de depuração de cargas poluentes, sendo que a matéria orgânica é degradada de acordo com processos aeróbios e/ou anaeróbios, dependendo da quantidade de oxigênio disponível. Um sistema convencional de tratamento de esgotos pode ser visto como um dispositivo de otimização do uso destes processos. De uma maneira geral, as grandes diferenças entre esses dois "sistemas" de tratamento são que, para os rios:

- a extensão pode chegar a centenas de quilômetros;
- os processos biológicos ocorrem de maneira seqüencial ao invés de simultaneamente;
- não existem parâmetros precisos como os encontrados em estações de tratamento projetadas;
- condições ambientais ótimas de biodegradação são difíceis de serem mantidas:
- existe a interferência de diversas atividades humanas (como geração de energia, irrigação e lazer).

Os esforços científicos têm se concentrado na determinação de parâmetros que indiquem o potencial de assimilação de cargas poluentes pelos recursos hídricos, além de estabelecer critérios de correlação entre qualidade e gerenciamento dos recursos hídricos.

Um destes critérios é a manutenção de um nível adequado de oxigênio no corpo receptor, ou seja: o ciclo aeróbico de biodegradação deve ser mantido, sendo que a concentração de cargas orgânicas poluidoras deve ser limitada.

Quando um corpo receptor, que contém uma certa quantidade de oxigênio dissolvido e serve de suporte de vida para um ecossistema aquático, recebe uma carga poluente, o que acontece pode ser arbitrariamente dividido em quatro zonas distintas, ilustradas na figura 09 e descritas a seguir:

I - Zona de Degradação: Nesta zona a decomposição do esgoto começa a deplecionar o nível de oxigênio. A turbidez diminui a absorção de luz e plantas verdes tendem a desaparecer. A água adquire uma cor acinzentada. Existe uma redução progressiva das formas de vida e aumento de bactérias. A zona limite é atingida quando o oxigênio dissolvido é reduzido a 40 % do valor de saturação;

II - Zona de Decomposição Ativa: Nesta zona o declínio do nível de oxigênio continua e pode chegar até zero. A vida aquática pode ser reduzida a organismos anaeróbios, que sobrevivem

sem oxigênio. A água adquire uma cor negra, com a presença de gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, e exala um cheiro desagradável. Eventualmente, o ciclo de decomposição atinge um ponto onde os processos naturais de reaeração se sobrepõem aos processos de desoxigenação. O oxigênio dissolvido volta a aparecer, e o limite da zona é atingido quando a concentração de OD volta a 40 % do valor de saturação;

III - Zona de Recuperação: Plantas aquáticas e outros organismos começam a reaparecer. A recuperação do nível de oxigênio continua, e compostos de nitrogênio podem incluir amônia e outros nitratos. A zona atinge seu limite quando o nível natural de oxigênio dissolvido no corpo de água é restabelecido. Este término não é rigidamente definido.

IV - Zona de Água Limpa: Nesta zona o corpo receptor volta a apresentar seu nível original de oxigênio dissolvido. A quantidade de bactérias permanece alta e podem ser encontrados agentes patogênicos, além da presença de sólidos dissolvidos, como nitratos, sulfatos, etc. No entanto o corpo receptor já é passível de reutilização, especialmente se outros afluentes contribuíram para a diluição.

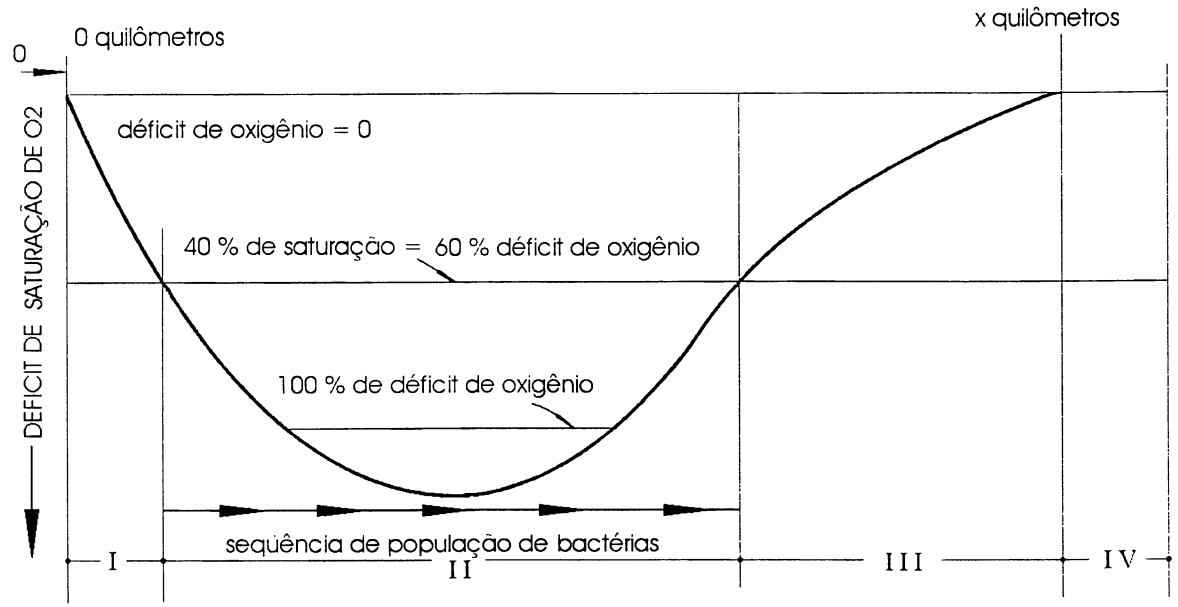


Figura 09

- Déficit de Oxigênio em um Rio Poluído -

(McGauhey, 1968)

Quando a quantidade de carga poluente não é muito grande, o nível de oxigênio pode diminuir sem colocar em risco a fauna aquática, e a adição de nutrientes pode apenas fertilizar a água. Os processos ativos de reaeração encontrados nas quatro zonas descritas anteriormente são:

- difusão de oxigênio ao longo da profundidade, numa taxa proporcional ao consumo;

- absorção de oxigênio pela água com níveis abaixo do nível de saturação devido à existência de corredeiras ou obstáculos como pedras, que criam turbulência no escoamento;

- fotossíntese devido ao crescimento de algas e outras plantas aquáticas.

A curva da figura 09 é usualmente chamada de curva de depleção de oxigênio, e pode ser obtida matematicamente através da curva de primeiro estágio de DBO (figura 10) e da curva representativa da taxa de reaeração do corpo receptor.

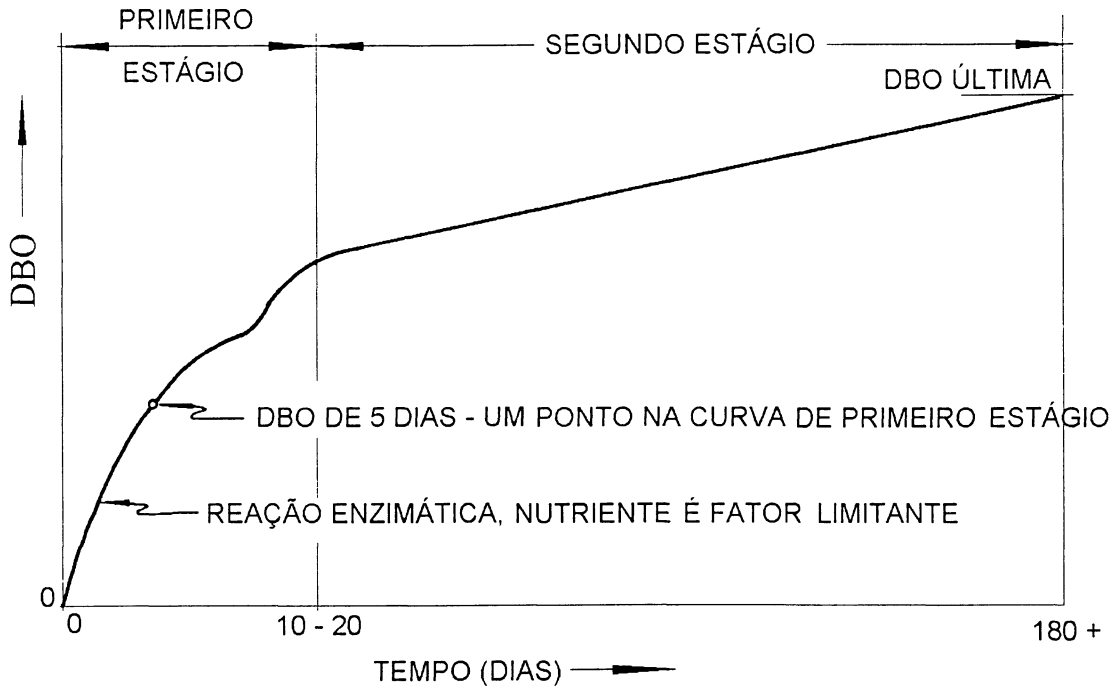


Figura 10

- Curva Típica de Demanda de Oxigênio na Decomposição Aeróbica de Matéria Orgânica - (McGauhey, 1968)

Com base em dados teóricos e experimentais mostrou-se (McGauhey, 1968) que a diminuição da carga orgânica, que governa a demanda de oxigênio durante o primeiro estágio da degradação aeróbica (ver Figura 11) é uma reação de primeira ordem na qual a taxa de reação é proporcional à concentração da carga orgânica. Isto pode ser aplicado à curva de primeiro estágio

da DBO, para desenvolver uma equação que permite estimar a DBO a 20 °C a qualquer instante no primeiro estágio, onde a demanda de oxigênio é mais significativa.

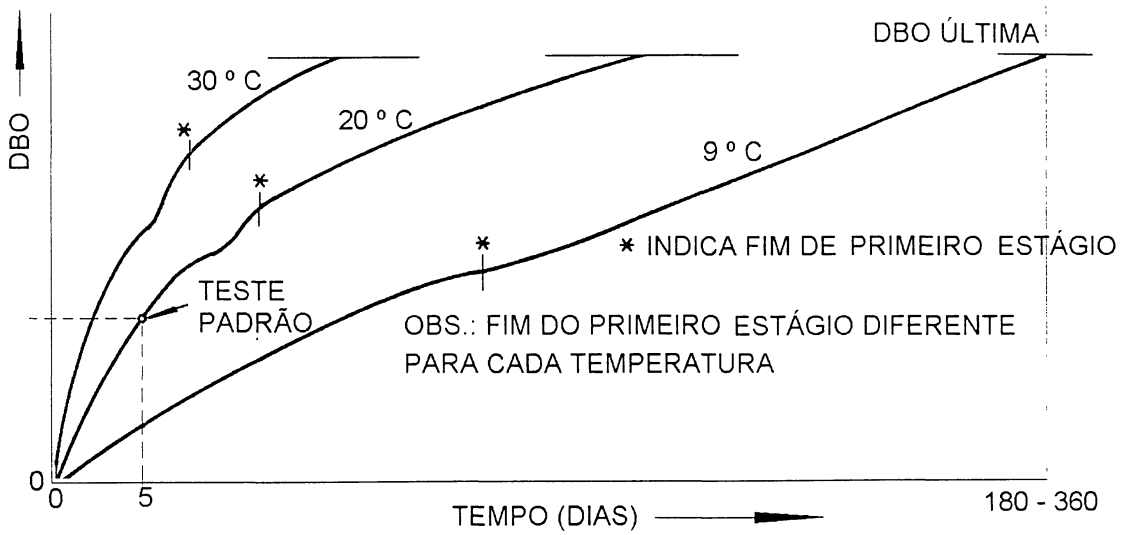


Figura 11

- Efeito da Temperatura na Demanda de Oxigênio -

(McGauhey, 1968)

Com base na figura 12, onde:

B = DBO última de primeiro estágio $[ML^{-3}]$

b = DBO no tempo t $[ML^{-3}]$

B_t = demanda de oxigênio no tempo t $[ML^{-3}]$

k = constante de reação, base e

k' = constante de reação, base 10

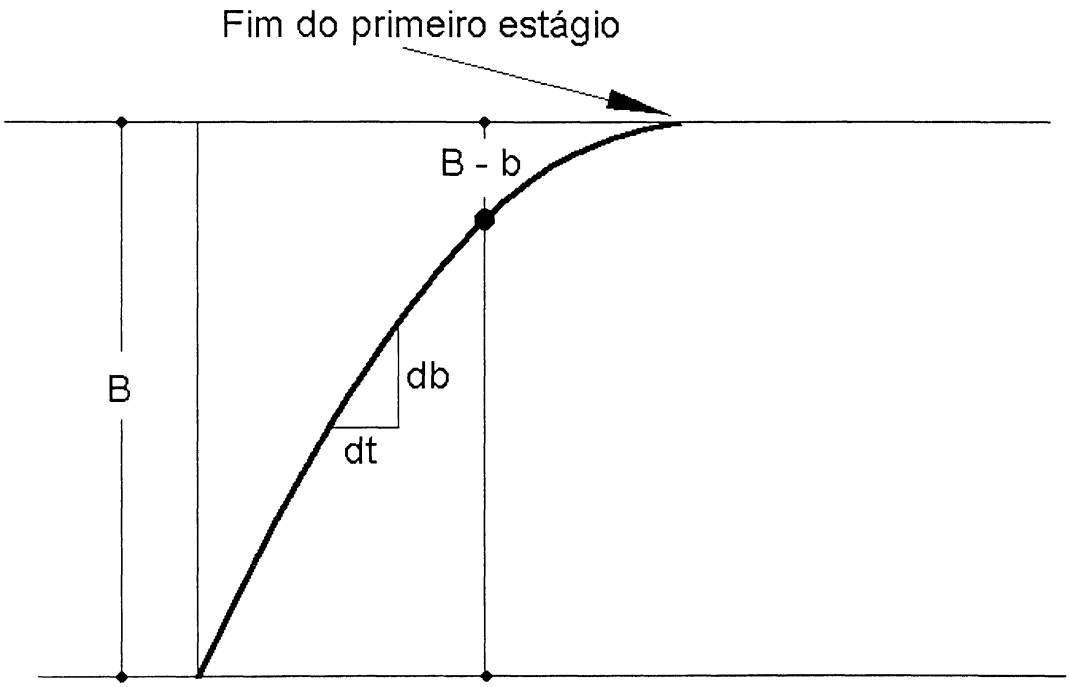


Figura 12

- Demanda de Oxigênio ao Longo do Tempo -

(McGauhey, 1968)

db/dt = variação da DBO com o tempo t, ou (McGauhey, 1968):

$$\frac{db}{dt} = (B - b)k \qquad (4.2.2.1)$$

que integrada adquire a forma:

$$b = B(1 - e^{-kt}) \qquad (4.2.2.2)$$

ou:

$$b = B(1 - 10^{-k't}) \qquad (4.2.2.3)$$

ou ainda:

$$\log \frac{L - y}{L} = -k't \qquad (4.2.2.4)$$

Como tanto B quanto k' não são conhecidos, eles devem ser determinados experimentalmente, de uma série de amostras em 1, 2, 3, ..., n dias à temperatura de 20 °C. De experiências realizadas chegou-se ao valor usual de k' = 0,10 (McGauhey, 1968), para esgoto doméstico. Para outro tipo de carga poluente, é necessária determinação experimental. No presente trabalho, por não se dispor inicialmente de dados experimentais, será provisoriamente adotado esse valor de k' = 0,10, ou, na base e, k = 0.23.

Fazendo (McGauhey, 1968):

B - b = C (concentração no tempo t)

B = C_0 (concentração inicial)

$$C = C_0 e^{-0,23t} \qquad (4.2.2.5)$$

Logo, nota-se que, a partir do lançamento, a carga poluidora começa a sofrer um processo de depuração. Como na maioria dos estudos de engenharia nem todas as cargas poluidoras são lançadas diretamente no corpo de água em estudo, é necessário aplicar uma equação do tipo da equação 4.2.2.5 para reduzir essas cargas aos valores esperados no corpo receptor. Em geral, a concentração inicial, C_0, é conhecida e adota-se um valor para k, sendo necessário determinar o tempo de percurso para se obter uma estimativa de C.

Como, em geral não se conhece a geometria, hidrologia e parâmetros hidráulicos dos canais secundários que conduzem as cargas poluidoras ao corpo receptor, foi decidido aproximar o tempo de percurso pelo tempo de concentração, conforme descrito no parágrafo a seguir.

4 . 2 . 3 TEMPO DE PERCURSO

O valor do tempo de concentração foi uma aproximação utilizada no presente estudo para a determinação do tempo de percurso entre o ponto de lançamento da carga e o rio Iguaçu.

O tempo de concentração é contado a partir do início da precipitação até que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir na seção em estudo. Corresponde ao intervalo de tempo necessário para que todos os pontos da bacia hidrográfica passem a contribuir para a vazão na sua exutória (seção em estudo). O tempo de concentração não é constante para uma dada área, mas varia com o estado de recobrimento vegetal e a altura e distribuição da chuva sobre a bacia. Entretanto, para períodos de recorrência superiores a 10 anos, a influência da vegetação parece ser desprezível.

Existem diversas fórmulas empíricas e ábacos que fornecem o valor do tempo de concentração em função das características físicas da bacia (Pinto et al, 1976; Chow et al. 1988; Ramos et al, 1982):

PICKING:

$$t_c = 5{,}3\left(\frac{L^2}{\overline{S}}\right)^{1/3} \qquad (4.2.3.1)$$

onde: L = distância horizontal em km [L]

$\overline{S}$ = declividade média

t_c = tempo em minutos [T]

VEN TE CHOW:

$$t_c = 25{,}20\left(\frac{L}{\overline{S}}\right) \qquad (4.2.3.2)$$

onde: L = comprimento do talvegue em km [L]

$\overline{S}$ = declividade média

t_c = tempo em minutos [T]

CALIFORNIA CULVERTS PRACTICE (California Highways and Public Works):

$$t_c = 57\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \qquad (4.2.3.3)$$

onde: L = comprimento do talvegue em km [L]

H = desnível em metros [L]

observação: desenvolvida para pequenas bacias montanhosas na Califórnia.

KIRPICH:

$$t_c = 0,01947\left(\frac{L^{0,77}}{\overline{S}^{0,385}}\right) \qquad (4.2.3.4)$$

onde: L = comprimento do canal em metros [L]

$\overline{S}$ = declividade média

observação: desenvolvida para sete bacias rurais no Tennessee com canais bem definidos.

SCS (Soil Conservation Service):

$$t_c = \frac{258,695L^{0,8}\left[(1.000 / CN) - 9\right]^{0,7}}{1.900S^{0,5}} \qquad (4.2.3.5)$$

onde: L = comprimento em metros [L]

CN = número da curva (ábaco)

S = declividade em %

Observação: desenvolvido para bacias com área agrícola.

IZZARD:

$$t_c = \frac{113{,}0705\left(\frac{i}{3.628{,}57} + c\right)L^{0{,}33}}{S^{0{,}333}i^{0{,}667}} \qquad (4.2.3.6)$$

onde: S = declividade

i = intensidade da chuva em cm/h [LT^{-1}]

c = coeficiente de retardo

L = comprimento do talvegue em metros [L]

observação: desenvolvido a partir de dados experimentais pelo Bureau of Public Roads para rodovias e superfícies gramíneas.

HATHAWAY:

$$t_c = \frac{Ln}{804{,}5S^{3/2}} \qquad (4.2.3.7)$$

onde: L = comprimento em metros [L]

n = número de Manning [$L^{-1/3}T$]

S = declividade

t_c = tempo em minutos [T]

RASER-KIRPICH:

$$t_c = \frac{L^{0{,}77}}{3.081{,}4\bar{S}^{0{,}39}} \qquad (4.2.3.8)$$

onde: L = comprimento em pés [L]

$\bar{S}$ = declividade média

VENTURA:

$$t_c = 0{,}0127\left(\frac{A}{S}\right)^{1/2} \qquad (4.2.3.8)$$

onde: A = área em km^2 [L^2]

PASINI:

$$t_c = 0{,}023\left(\frac{AL}{S}\right)^{1/2} \qquad (4.2.3.9)$$

onde: A = área em km^2 [L^2]

L = comprimento em km [L]

No presente trabalho, em função da disponibilidade de dados, foram testadas as equações de Kirpich, Picking e California Culverts Practice. O valor adotado foi aquele obtido através da equação de Kirpich, visto não haver grande diferença entre os resultados obtidos com as outras duas equações, além da equação de Kirpich ser recomendada para áreas agrícolas.

5 . CARACTERÍSTICAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE SALTO CAXIAS

A usina hidrelétrica de Salto Caxias localiza-se no rio Iguaçu, na região sudoeste do estado do Paraná, a aproximadamente 482 km de Curitiba, na divisa dos municípios de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu (Figura 13). Distará cerca de 204 km da foz do rio Iguaçu. O início da geração comercial está previsto para janeiro de 1.999. O empreendimento é formado por uma usina com capacidade para gerar 1.240 MW de energia, e o reservatório terá uma área aproximada de 141 km^2. Construída pela COPEL - Companhia Paranaense de Energia, deverá ser ligada ao sistema de geração de energia elétrica das regiões sul, sudeste e centro-oeste (Intertechne[a], 1993). A seguir são apresentados os dados principais:

Localização:

Bacia Hidrográfica..... Rio Paraná
Sub-bacia..... Rio Iguaçu
Curso de água..... Rio Iguaçu
Latitude..... 25°32'35" S
Longitude..... 53° 29'43" W

Dados do Projeto:

Vazão mínima média mensal..... 140 m^3/s
Vazão mínima defluente..... 112 m^3/s
Vazão máxima turbinável..... 533 m^3/s
Vazão máxima turbinável total..... 2.132 m^3/s
Vazão de projeto do vertedouro..... 48.300 m^3/s
Queda bruta máxima..... 68 m
Queda líquida máxima..... 67 m
Nível máximo normal do reservatório..... 325,00 m
Área inundada..... 141,43 km^2
Volume total do reservatório..... 3.570.000.000 m^3
Área de drenagem da bacia incremental..... 11.200 km^2
Tipo de barragem..... concreto compactado a rolo
Altura máxima da barragem..... 67 m
Comprimento da barragem..... 1.080 m

Volume total da estrutura da barragem..... 1.093.000 m^3

Tipo de turbinas.....francis

Número de turbinas 4

Potência nominal das turbinas..... 310 MW

Potência instalada das turbinas..... 1.240 MW

O acesso à usina é feito através da estrada federal BR-277 até a cidade de Cascavel. A partir daí, segue-se pelas estradas estaduais PR-182, até próximo da cidade de Capitão Leônidas Marques, e PR-484, em direção a Boa Vista da Aparecida. Após a ponte sobre o rio Andrada, na PR-484, existe um trecho não pavimentado de ligação ao local da usina.

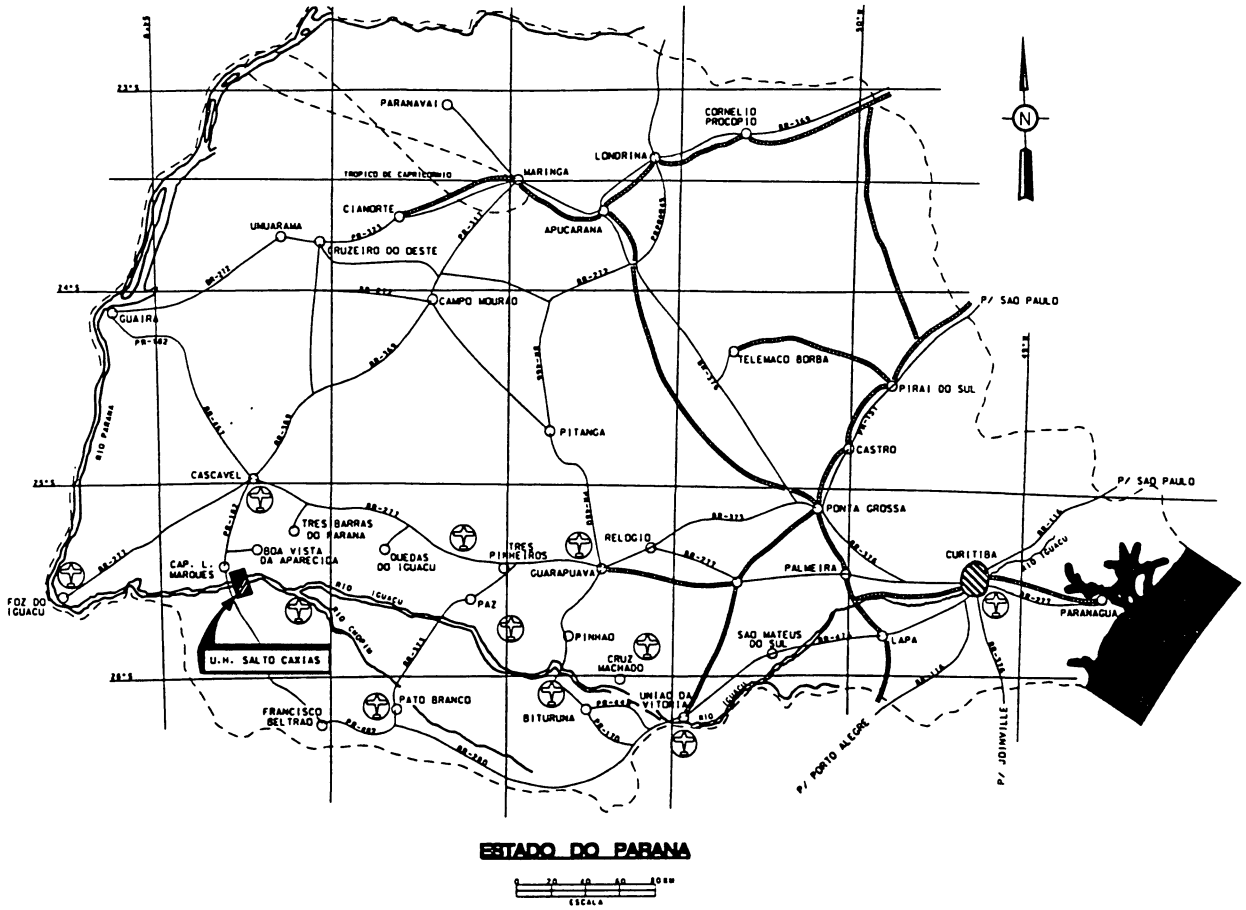


Figura 13

- Localização do Empreendimento -

(Intertechne[a]. 1993)

6 . LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

O rio Iguaçu, um dos principais afluentes do rio Paraná, tem suas nascentes nas proximidades de Curitiba e sua bacia desenvolve-se basicamente no sentido Leste-Oeste, entre os paralelos 25° e 26° sul e os meridianos 49° e 54°35' oeste. Drena uma área de 67.300 km^2 até Salto Cataratas, próximo à sua foz, em um percurso de aproximadamente 1.100 km de extensão. A bacia se alonga por cerca de 550 km com uma largura razoavelmente uniforme da ordem de 120 km e atravessa as três mais importantes regiões geomorfológicas do estado do Paraná: o planalto de Curitiba, o planalto de Ponta Grossa e o planalto de Guarapuava.

No anexo 02 pode ser vista a bacia hidrográfica incremental da região em estudo, entre as usinas hidrelétricas de Salto Caxias e Salto Osório. Os principais afluentes do rio Iguaçu que serão parcialmente inundados pelo reservatório são os rios Tormenta, Adelaide e Guarani na margem direita e Jaracatiá e Chopim na margem esquerda. Destes, o de maior importância é o rio Chopim, que deságua na margem esquerda do rio Iguaçu, 10 km a jusante de Salto Osório e drena uma área de 7.500 km^2.

Os municípios que terão parte de seus territórios inundados pelo reservatório são: Capitão Leônidas Marques, Boa Vista da Aparecida, Três Barras do Paraná e Quedas do Iguaçu, na margem direita, e Nova Prata do Iguaçu, Salto do Lontra, Boa Esperança do Iguaçu, Cruzeiro do Iguaçu e São Jorge do Oeste, na margem esquerda.

Como definido no Relatório de Impacto Ambiental, denomina-se *área diretamente afetada* a área onde existe uma interferência direta do empreendimento (obras, reservatório, acessos, infra-estrutura) e *área de influência* a área que poderá sofrer impactos indiretos da construção da barragem ou interferir com o empreendimento.

Como o interesse da presente dissertação é a determinação da qualidade de água, considerou-se a área de estudo como sendo a área da bacia hidrográfica (entre Salto Osório e a foz do rio Andrada), formada pelos seguintes municípios (total ou parcialmente):

Trecho entre Salto Osório e Salto Caxias:

Margem Direita:
- Boa Vista da Aparecida
- Capitão Leônidas Marques
- Cascavel
- Catanduvas
- Guaraniaçu

- Ibema
- Nova Laranjeiras
- Quedas do Iguaçu
- Três Barras do Paraná

Margem Esquerda:

- Boa Esperança do Iguaçu
- Bom Sucesso do Sul
- Chopinzinho
- Clevelândia
- Coronel Vivida
- Cruzeiro do Iguaçu
- Dois Vizinhos
- Enéas Marques
- Flor da Serra do Sul
- Francisco Beltrão
- Honório Serpa
- Itapejara do Oeste
- Mariópolis
- Marmeleiro
- Nova Esperança do Sudoeste
- Nova Prata do Iguaçu
- Palmas
- Pato Branco
- Renascença
- Salto do Lontra
- São João
- São Jorge do Oeste
- Verê
- Vitorino

Trecho Entre Salto Caxias e a foz do rio Andrada:

Margem Direita:
- Boa Vista da Aparecida
- Capitão Leônidas Marques
- Cascavel

Margem Esquerda:
- Ampére
- Francisco Beltrão
- Nova Esperança do Sudoeste
- Nova Prata do Iguaçu
- Realeza
- Salto do Lontra
- Santa Izabel do Oeste

Os efeitos da ocupação do solo nesta área (esgoto doméstico, efluentes industriais, etc) são sentidos no rio Iguaçu, que é receptor de todas as cargas de poluição hídrica provenientes desta região. No item 7 a seguir serão descritas as características físicas da bacia hidrográfica da região em estudo.

7 . CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

Clima

A bacia do rio Iguaçu, especialmente a área de influência da usina de Salto Caxias, está sujeita à influência de pelo menos três massas de ar: a *tropical atlântica de baixa pressão*, mais forte nos meses de verão (outubro a março), trazendo tempo bom com pouca nebulosidade e seco; a *polar atlântica*, mais atuante nos meses de inverno (abril a setembro), provocando tempo bom, com pouca nebulosidade, madrugadas frias e secas; e a *corrente marítima quente*, que influencia as temperaturas, provocando clima quente e úmido.

O clima da área de influência está classificado, segundo o esquema de Köeppen, na sua maior parte como Cfa (clima subtropical úmido, mesotérmico, com verões quentes, geadas menos freqüentes, chuvas concentradas nos meses de verão e sem estação seca definida), e como Cfb (clima subtropical, mesotérmico, verões frescos, com freqüentes geadas severas e sem estação seca definida), especialmente na parte sul da área de influência, região de Palmas e Clevelândia. Toda a área diretamente afetada tem clima do tipo Cfa.

Em toda a bacia do rio Iguaçu não existe uma estação chuvosa bem definida. Já em termos de temperatura, observa-se um padrão bem definido entre os meses frios e quentes. Em julho e agosto a insolação média é superior aos demais meses de inverno (abril a setembro). Nos meses de maio e junho, em que a insolação é baixa, observam-se altas taxas de umidade.

Precipitação:

O total anual médio, tendo como base as médias dos totais mensais máximos, médios e mínimos, calculados pela média aritmética dos valores pontuais das estações pluviométricas existentes, é de 1.919 mm. A máxima precipitação mensal histórica, ocorrida dentro da Área de Influência, foi no posto pluviométrico de Águas do Verê, com 903 mm, em novembro de 1982.

A precipitação média anual, calculada pelo método das isoietas resultou, para a bacia do rio Iguaçu a montante da usina hidrelétrica de Salto Caxias, em 1.725 mm; para a bacia incremental entre Salto Osório e Salto Caxias (Área de Influência) em 1.948 mm; e para a área do reservatório (Área Diretamente Afetada) em 1.850 mm.

Evaporação e Evapotranspiração:

De acordo com o volume II do Estudo de Impacto Ambiental da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, com o uso da equação do balanço hídrico simplificado foi calculada a evapotranspiração real na bacia do rio Iguaçu, a montante de Salto Caxias (57.000 km^2). A precipitação média anual nesta área é de 1.725 mm e o deflúvio médio é de 1.246 m^3/s (689 mm), o que resultou numa evapotranspiração real média de 1.036 mm. Na Área de Influência (11.246 km^2), onde a precipitação média é de 1.948 mm e o deflúvio médio é o da usina hidrelétrica de Salto Caxias (1.246 m^3/s) menos o da usina hidrelétrica de Salto Osório (994 m^3/s), igual a 710 mm, a evapotranspiração real resultou igual a 1.238 mm.

A evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial na área do reservatório, calculadas pelo método de Morton, resultaram em 1.106 mm e 1.521 mm, respectivamente. O excedente hídrico médio nesta área, avaliado pela diferença entre a precipitação média da Área Diretamente Afetada (1.850 mm) e a evapotranspiração real (1.106 mm) resultou em 744 mm.

O deflúvio médio da bacia do rio Iguaçu, a montante de Salto Caxias (689 mm) e na Área de Influência (721 mm), representa os excedentes hídricos médios observados nestas bacias.

Insolação:

A insolação é a parte da radiação solar que atinge a superfície terrestre. A transferência de calor, devido à insolação, é um dos fatores responsáveis pelas variações diárias no tempo e fonte de energia fundamental para o ciclo hidrológico, exercendo grande influência no meio ambiente.

No caso da insolação tem-se, tanto para a Área de Influência quanto para a Área Diretamente Afetada, uma média de 6,6 horas de insolação por dia. Os valores de outubro à março situam-se em torno de 7 horas de insolação por dia. O menor valor na Área de Influência corresponde a junho (5,5 horas de insolação por dia).

Umidade Relativa do Ar:

A umidade do ar é fundamental à termodinâmica da atmosfera, ao desenvolvimento de certos fenômenos meteorológicos e à formação de nuvens. Interfere diretamente na evaporação, evapotranspiração e no equilíbrio ecológico.

O valor médio da umidade relativa do ar para a Área de Influência é de 75%, tendo como base sete estações meteorológicas representativas desta área. Para a Área Diretamente Afetada foi adotado o valor da estação meteorológica de Quedas do Iguaçu, que apresenta uma umidade relativa média também em torno de 75%.

De janeiro a julho as médias mensais de umidade são mais altas. Os meses de maio a junho são os meses mais úmidos, apresentando valores em torno de 79%. O período entre os meses de agosto a dezembro apresenta umidade relativa menor, em torno de 72%.

Ventos:

O vento é fundamental para a definição das condições meteorológicas. Para representar a Área de Influência foram calculadas médias aritméticas da velocidade do vento para os diversos meses do ano. Esses valores médios variam de 2,6 m/s a 3,3 m/s, sendo a média geral no período de 2,9 m/s.

Para a Área Diretamente Afetada foi adotado o valor da estação meteorológica de Quedas do Iguaçu - velocidade média de 2,8 m/s, com 30% do tempo predominante na direção sudeste.

Temperatura:

A distribuição espacial da temperatura média foi definida a partir do traçado das isotermas (Intertechne[b], 1993), utilizando-se os dados de todas as estações meteorológicas do estado do Paraná.

A temperatura média anual, calculada pelo método das isotermas, resultou em 17,2 °C para a bacia do rio Iguaçu a montante de Salto Caxias; em 18,5 °C para a Área de Influência; e para Quedas do Iguaçu, considerada representativa da Área Diretamente Afetada, resultou em 20,1 °C.

No trimestre mais frio - junho, julho e agosto - as temperaturas médias mensais na Área de Influência variam entre 14 °C e 16 °C. A mínima temperatura registrada nas estações representativas da Área de Influência foi de -7,1 °C na estação de Palmas, no dia 11 de julho de 1972.

No trimestre mais quente - dezembro, janeiro e fevereiro - as temperaturas médias mensais na Área de Influência variam entre 22 °C e 23 °C. A máxima temperatura do período foi de 39,8 °C e ocorreu na estação de Planalto, no dia 11 de dezembro de 1985.

A amplitude térmica anual média para o período em estudo foi de 11 °C, tanto para a Área de Influência quanto para a Área Diretamente Afetada.

Geologia:

A região estudada faz parte do chamado Altiplano Basáltico Paranaense, constituída por rochas predominantemente vulcânicas (basaltos). Estas rochas ocorrem sob a forma de camadas, com espessuras que podem variar de cerca de 5 metros a mais de 50 metros. Os principais divisores de água da região, formados por cristas elevadas e relativamente planas, suavemente inclinadas no sentido do rio Paraná e do rio Iguaçu, são os restos de uma extensa superfície aplainada, formada há menos de dois milhões de anos.

Ao se examinar o mapa da região, observa-se que a drenagem é controlada pelas fraturas das rochas, ou seja, os rios e seus afluentes escoam através de grandes rachaduras formadas nos terrenos, ao longo de milhares de anos. Nos rios principais, como o Iguaçu, o fenômeno de erosão foi responsável pelo arredondamento das curvas. Os rios menores ainda mantêm uma conformação angulosa, estreitamente relacionada com o padrão local de fraturas. Os saltos e cachoeiras, muito comuns na região, também resultam destas fases erosivas. As cachoeiras, esculpidas em basalto, em geral mostram quedas verticais devido às camadas de basalto em forma de colunas.

Os levantamentos efetuados indicam poucos locais com problemas de erosão natural, tanto na Área Diretamente Afetada como na Área de Influência. Com exceção das épocas muito chuvosas, o carreamento de sólidos para os rios é, em geral, de pequeno a moderado. Naturalmente, este quadro é diferente onde o homem removeu a vegetação, como ocorre nas áreas de cultura, de maior risco à erosão.

Solos:

As rochas basálticas, como fator de formação de solos, dão origem a solos argilosos e muito argilosos, com mais de 40% de argila. O relevo, também como fator de formação de solos, atua principalmente na quantidade de água que passa através do solo. Nas áreas mais planas da Área Diretamente Afetada ocorrem solos profundos devido à maior quantidade de água que penetra no terreno, favorecendo a decomposição das rochas que os originam - são os chamados latossolo roxo e terra roxa estruturada latossólica. As terras roxas estruturadas encontram-se

ocupando áreas com relevo ondulado. Nas áreas de relevo escarpado e montanhoso encontram-se os solos litólicos, que são muito rasos. devido à pouca quantidade de água que penetra no terreno.

Na área diretamente afetada e proximidades (até a elevação 380 m) predominam as terras roxas estruturadas: 26.225 ha, correspondendo a 75% da área total. Foram também identificados solos litólicos (6.957 ha - 12% do total), latossolos roxos (1.265 ha - 4% do total) e cambissolos (286 ha - 1% do total). Ainda na área diretamente afetada e entorno, verifica-se que 64% da área apresenta relevo que passa de ondulado e forte ondulado a forte ondulado e montanhoso. Sob o ponto de vista de utilização agrícola. este tipo de terreno apresenta restrições severas por ter maior facilidade de erosão.

Uso atual do solo:

As áreas de influência e diretamente afetada apresentam uma certa semelhança entre a ocupação próxima ao vale do rio Iguaçu e o planalto. onde as áreas de cultura e pastagens se distribuem em forma de mosaico, com manchas de capoeiras em diversos estágios. além de áreas parcialmente exploradas de formações florestais anteriormente encontradas nesta região. O domínio das atividades agropastoris é bastante evidente em ambas as áreas, porém pode-se destacar o planalto próximo à região de Palmas e Clevelândia, onde predominam os campos, cuja ocupação se dá quase que unicamente pelas pastagens, ficando a agricultura restrita a uma ocupação recente, onde o trigo e a soja começam a ser plantados, conforme a estação do ano.

A agricultura é o principal uso na área de influência (62,50%). seguido de pastagem (22,45%), mata (4,39%), capoeira (4,26%), campo sujo (3,16%), capoeirinha (1,69%), reflorestamento (1,28%) e suinocultura (0,28%).

O mapeamento da área diretamente afetada não se deu unicamente na área que sofrerá inundação com a formação do reservatório. Estabeleceu-se o nível 380 metros como limite, de modo a facilitar a comparação entre as formas de uso e ocupação do solo inundadas, e aquelas que se localizam no entorno do futuro lago. Dentre os usos a serem inundados. destacam-se as pastagens (54,45%) como o uso mais atingido. Os pastos ocupam não só áreas mais planas, como também encostas com altas inclinações. A agricultura (27,78%) é o segundo uso mais atingido. Sua ocorrência principal dá-se ao longo dos rios Tormenta e Adelaide, onde o vale mais aberto propicia a ocorrência de uma planície própria para o desenvolvimento de culturas, e também na margem direita do rio Iguaçu, entre a foz do rio Adelaide e a foz do rio Jacutinga.

As matas parcialmente exploradas ocupam 12% da área inundada. Esta vegetação encontra-se distribuída na área diretamente afetada em pequenas manchas localizadas em encostas íngremes ou, em maior escala, ao longo do rio Guarani e próximo à usina Júlio de Mesquita Filho.

As capoeiras e capoeirinhas (3,70% e 1,85%), da mesma forma que na área de influência, estão dispersas na área em manchas de dimensões reduzidas, associadas às terras em descanso, para posterior utilização agrícola ou pastoril.

Os demais usos, reflorestamento (proximidades da usina Júlio de Mesquita Filho) e áreas urbanizadas (Barra Bonita e Foz do Chopim) somam apenas 0,20% do futuro reservatório.

Qualidade e usos da água:

Os afluentes que deságuam no rio Iguaçu, no trecho em que será formado o reservatório de Salto Caxias, têm declividades acentuadas, fazendo com que a velocidade de suas águas seja bastante grande. São estas declividades relativamente altas do rio Iguaçu e de seus afluentes, principalmente abaixo de União da Vitória, somadas à baixa capacidade do basalto de reter água, além da topografia de vale encaixado, que criam condições favoráveis à ocorrência de enchentes no médio e baixo Iguaçu.

Em se tratando da área de influência, verificou-se serem cinco os usos da água: abastecimento doméstico, consumo por animais de criação, abastecimento industrial, diluição de esgotos urbanos e geração de energia.

Estimativa das necessidades de água na área de Influência (Intertechne[a], 1993):

Abastecimento Doméstico..... 60.355 m^3/dia
Abastecimento Industrial..... 10.680 m^3/dia
Criação Animal..... 31.907 m^3/dia

A maior parte da demanda para abastecimento doméstico urbano é suprida por sistemas operados pela SANEPAR. Das sedes e distritos municipais pertencentes à área de influência, a SANEPAR abastece, através de seus sistemas, aproximadamente 233.104 habitantes. De acordo com dados do IPARDES/SANEPAR, o valor médio do fornecimento de água tratada para a região gira em torno de 115 litros por habitante. Onde existem sistemas operados pela SANEPAR. tem-se praticamente entre 80% e 100% da população abastecida.

A utilização de água para abastecimento na área rural é feita através da captação em nascentes ou poços localizados nas proximidades das residências e, algumas vezes, através de poços tubulares, cuja profundidade média na região é de aproximadamente 140 metros. De modo geral, as vazões dessas fontes são pequenas, limitando o abastecimento a duas ou, no máximo, três casas. Para as criações, é muito comum a construção de pequenos açudes, além da utilização das águas dos córregos e rios.

Quanto ao uso da água para a geração de energia, foram identificadas cinco usinas hidrelétricas em operação na área de influência, quatro delas no rio Chopim (Júlio de Mesquita Filho, Salto Alemão, Salto Claudelino e Chopim) e a quinta no rio Iguaçu (Salto Osório).

Na área diretamente afetada, as águas correntes são mais utilizadas para consumo de animais, com 36% da população pesquisada indicando este uso, 26% não utiliza águas correntes, 19% utiliza os rios para pesca amadora, 2% utiliza para consumo, 16% para outros usos e 1% não respondeu esta pergunta, de acordo com o censo socioeconômico realizado quando da elaboração do RIMA. A utilização destas águas para pesca comercial, geração de energia, movimentação de equipamentos (moinhos, olaria, etc) e irrigação não foi constatada. A água para abastecimento da população é proveniente, em sua maior parte, de nascentes localizadas nas propriedades, sendo levada até as residências por gravidade, através de mangueiras.

Sobre os sistemas de esgotamento sanitário, são poucas as informações disponíveis, o que não quer dizer que várias das cidades da área de influência não possuam rede de esgoto. Pode-se afirmar, entretanto, que na grande maioria delas há deficiência no atendimento à população. Além disso, acrescenta-se a falta de estações de tratamento dos esgotos domésticos na maioria das cidades. Os esgotos, quando há rede coletora, normalmente são dispostos na drenagem superficial (córregos) que corta a localidade.

A poluição oriunda das áreas urbanas da área de influência é assimilada pelos corpos de água durante o percurso. No caso das áreas agrícolas, não foram identificados, de acordo com o Estudo de Impacto Ambiental da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, problemas de relevância com relação à poluição das águas por resíduos ou agrotóxicos.

O esgoto doméstico gerado pela população da área diretamente afetada é, na maioria da vezes, conduzido até fossas negras instaladas nas proximidades da residência. Normalmente, a instalação sanitária é uma "casinha" em cima da fossa. As águas servidas (banho e cozinha) geralmente correm a céu aberto.

Com respeito à poluição industrial, existem na Área de Influência, de acordo com o IAP, doze indústrias consideradas potencialmente poluidoras da água, a maioria delas de produção de alimentos e possuidoras de sistemas de tratamento de efluentes líquidos. As demais indústrias localizadas na Área de Influência foram agrupadas por tipo. Para estas indústrias as informações obtidas se restringem à tipologia industrial, nome e município de instalação. Outras informações ainda não estão disponíveis no banco de dados do IAP. De acordo com este instituto, estas indústrias foram consideradas como sendo de baixo potencial poluidor. Assim, a estimativa da demanda de água industrial restringe-se às indústrias consideradas potencialmente poluidoras.

Na área diretamente afetada não existem instalações industriais de qualquer tipo, e conseqüentemente, efluentes líquidos poluidores.

Para a análise da qualidade da água do rio Iguaçu e seus principais afluentes na região em estudo para a elaboração do EIA dimensionou-se uma rede com doze estações de amostragem, operada no período compreendido entre julho e outubro de 1993. Apesar dos resultados obtidos, com várias amostras apresentando valores acima do permitido para águas de classe 2 - como por exemplo, cobre, mercúrio e nitritos - a conclusão, aparentemente leviana, apresentada no Estudo de Impacto Ambiental da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, volume II é de que a água da região apresenta "....boas condições de qualidade sob os vários aspectos analisados e são passíveis de qualquer utilização."

No item seguinte será definida a matriz de fontes de poluição da região em estudo, isto é, serão localizadas e quantificadas as cargas poluidoras.

8 . MATRIZ DE FONTES DE POLUIÇÃO

Como matriz de fontes de poluição entende-se a definição da localização e quantificação das cargas das fontes poluidoras decorrentes dos processos de uso e ocupação do solo. Neste estudo serão consideradas apenas a poluição industrial e a doméstica, não sendo incluída aquela de origem agrícola.

8 . 1 POLUIÇÃO INDUSTRIAL

Como já citado anteriormente, são doze as indústrias consideradas potencialmente poluidoras da água. Suas características, bem como corpo receptor, encontram-se na tabela 03 (Intertechne[b], 1993).

Na tabela 03 são adotados as seguintes abreviaturas:

Pt..... Pré Tratamento

LAn..... Lagoa Anaeróbia

LAr ..... Lagoa Aerada

LF ..... Lagoa Facultativa

LP ..... Lagoa de Polimento

LE ..... Lagoa de Estabilização

LAt..... Lodo Ativado

LS ..... Leito de Secagem

CG ..... Caixa de Gordura

TABELA 03

- Poluição Industrial -

	Tipo de Indústria	Vazão Efluente (m3/dia)	Carga de DBO potencial (kg DBO/dia)	Carga de DBO remanescente (kg DBO/dia)	Carga de DBO reduzida (%)	Tratamento	Município	Corpo Receptor
1	Laticínio	40,00	138,00	24,36	82,12%	LAn, LF	Coronel Vivida	Rio Barro Preto
2	Alimentícia	9,00	19,17	5,47	71,47%	Pt, LAn, LF	Coronel Vivida	Rio Barro Preto
3	Frigorífico	13,00	56,60	5,01	91,20%	Pt, LE	Coronel Vivida	Rio Barro Preto
4	Papel	120,00	0,00	0,00	0,00%	sem	Coronel Vivida	Rio Chopim
5	Abatedouro	5.750,00	12,42	241,50	98,06%	Pt, LAn, LF	Dois Vizinhos	Rio Dois Vizinhos
6	Bebidas	24,00	28,80	0,26	99,10%	Pt, LAt, LS	Francisco Beltrão	Rio Marrecas
7	Abatedouro	3.700,00	4.400,00	255,30	94,25%	Pt, LAn, LAr	Francisco Beltrão	Rio Santa Rosa
8	Laticínio	20,00	24,00	0,65	97,30%	Pt, LF	Guaraniaçu	Rio Isolina
9	Laticínio	24,00	71,68	20,83	70,94%	Lt, LF	Nova Prata	Rio Águas da Prata
10	Frigorífico	90,00	74,79	1,20	98,40%	Pt, LAn, LF	Palmas	Rio das Caldeiras
11	Laticínio	50,00	60,00	32,34	46,10%	CG	Palmas	Rio das Caldeiras
12	Laticínio	75,00	18,35	11,17	31,65%	não consta	Pato Branco	não consta (adotado o Rio Ligeiro)

fonte: Estudo de Impacto Ambiental da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, volume II

Com respeito à tabela 03, as seguintes observações são necessárias:

- Na quarta indústria listada, os valores nulos das cargas são os constantes no EIA. No entanto a indústria produz 50 t/dia de papel kraft, usando como matéria prima aparas e pasta mecânica. Como não se dispõe de outros dados, serão considerados os valores nulos das cargas;

- O valor da carga de DBO potencial da quinta indústria listada, 12,42 kg DBO/dia, deve estar errado, uma vez que a carga de DBO remanescente é de 241,50 kg de DBO/dia e a carga de DBO reduzida é de 98,06 %, o que corresponderia a um valor de aproximadamente 12.448,50 kg de DBO/dia para a carga de DBO potencial.

Com base nestes dados foram determinadas as cargas provenientes da poluição industrial no ponto de lançamento no rio Iguaçu, na região em estudo.

Procedimento:

- Nas cartas topográficas do Ministério do Exército, escala 1:50.000, foram determinados os pontos de lançamento das cargas, arbitrando-se um ponto no corpo receptor de cada indústria, o mais próximo possível da sede do município. Este recurso se fez necessário uma vez que não se dispõe da localização precisa da indústria;

- Foram então determinados os percursos de cada carga poluente, identificando-se os rios atingidos e as distâncias percorridas. Estas distâncias foram medidas diretamente nos mapas, com auxílio de um curvímetro;

- As declividades adotadas foram medidas diretamente nos mapas, medindo-se a distância entre as curvas de nível com o auxílio do curvímetro. Quando não foi possível determinar a declividade do trecho desejado, adotou-se uma declividade média de um trecho mais longo do rio;

- A concentração final (afluente ao rio Iguaçu) foi obtida com a utilização da equação:

$$C = C_0 e^{-kt} \qquad (8.1)$$

onde: C = concentração que atinge o rio Iguaçu;

C_0 = concentração no ponto de lançamento;

t = tempo de percurso (= tempo de concentração);

k = taxa de decaimento de DBO, adotado igual a 0,23 dia^{-1}.

- Foram efetuados os cálculos com os três valores de tempo de concentração calculados, conforme item 4.2.3, adotando-se na seqüência dos cálculos o valor obtido através da equação de Kirpich, por ser esta considerada a que mais se adapta às condições locais (zona agrícola).

Os cálculos efetuados e os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 04 e 05.

TABELA 04

- Cargas Industriais -

Indústria/Município	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)					Distância Total	Tempo de concentração (min)		
							Picking	Califórnia	Kirpich
Laticínio/Coronel Vivida	R. Barro Preto	R. Chopim							
Distância	17,00	165,50				182,50			
Declividade	0,01205	0,00115					1.678	2.954	2.944
Alimentícia/Coronel Vivida	R. Barro Preto	R. Chopim							
Distância	17,00	165,50				182,50			
Declividade	0,01205	0,00115					1678	2954	2944
Frigorífico/Coronel Vivida	R. Barro Preto	R. Chopim							
Distância	17,00	165,50				182,50			
Declividade	0,01205	0,00115					1678	2954	2944
Papel/Coronel Vivida	R. Chopim								
Distância	165,50					165,50			
Declividade	0,00115						1525	2760	2751
Abatedouro/Dois Vizinhos	R. D. Vizinhos	R. Chopim							
Distância	19,00	49,00000				68,00			
Declividade	0,00444	0,00167					828	1247	1242
Bebidas/Francisco Beltrão	R. Marrecas	R. Santana	R. Chopim						
Distância	64,00	32,00	105,50			201,50			
Declividade	0,00103	0,00125	0,00111				2480	4121	4107
Abatedouro/Francisco Beltrão	R. Santa Rosa	R. Marrecas	R. Santana	R. Chopim					
Distância	13,00	54,50	32,00	104,50		204,00			
Declividade	0,00342	0,00103	0,00125	0,00111			2582	4201	4187
Laticínio/Guaraniaçu	R. Isolina	R. Guarani							
Distância	66,50	58,00							
Declividade	0,00827	0,00172					1093	1695	1689
Laticínio/Nova Prata	R. da Prata	R. Jaracatiá							
Distância	7,00	8,00							
Declividade	0,01875	0,00313					218	265	264
Frigorífico/Palmas	R. Caldeiras	R. Chopim							
Distância	18,00	363,50				381,50			
Declividade	0,00455	0,00161					2523	4739	4722
Laticínio/Palmas	R. Caldeiras	R. Chopim							
Distância	18,00	363,50				381,50			
Declividade	0,00455	0,00161					2523	4739	4722
Laticínio/Pato Branco	R. Ligeiro	R. Chopim							
Distância	50,50	161,00				211,50			
Declividade	0,00583	0,00115					1899	3295	3283

TABELA 05

- Cargas Industriais no rio Iguaçu -

Indústria	Município	Carga Inicial (kg/dia)	Vazão (m3/dia)	Carga (mg/l)	Carga de DBO (kg/dia)			Ponto de Lançamento
					Picking	California	Kirpich	
Laticínio	Coronel Vivida	24,36	40,00	609,000	18,634	15,197	15,222	Chopim
Alimentícia	Coronel Vivida	5,47	9,00	607,778	4,184	3,412	3,418	Chopim
Frigorífico	Coronel Vivida	5,01	13,00	385,385	3,832	3,125	3,131	Chopim
Papel	Coronel Vivida	não consta	120,00	-	-	-	-	Chopim
Abatedouro	Dois Vizinhos	241,50	5.750,00	42,000	211,591	197,900	198,039	Chopim
Bebidas	Franc. Beltrão	0,26	24,00	10,833	0,175	0,135	0,135	Chopim
Abatedouro	Franc. Beltrão	255,30	3.700,00	69,000	169,028	130,501	130,811	Chopim
Laticínio	Guaraniaçu	0,65	20,00	32,500	0,546	0,496	0,496	Guarani
Laticínio	Nova Prata	20,83	24,00	867,917	20,117	19,968	19,971	Jaracatiá
Frigorífico	Palmas	1,20	90,00	13,333	0,802	0,563	0,564	Chopim
Laticínio	Palmas	32,34	50,00	646,800	21,614	15,171	15,211	Chopim
Laticínio	Pato Branco	11,17	75,00	148,933	8,247	6,599	6,612	Chopim

8 . 2 POLUIÇÃO DOMÉSTICA

Com base em dados fornecidos pela BPUB, determinou-se a população a ser considerada para o cálculo (tabela 06) da carga poluente proveniente de esgoto doméstico.

Os dados constantes na tabela são os valores projetados para 1.997, com base nos dados do censo de 1.991.

Para a população urbana, considerou-se toda a população contribuindo para a carga de esgoto doméstico, desde que a sede do município localize-se dentro da bacia.

Para a população rural adotou-se o seguinte procedimento: com base nas cartas topográficas estimou-se a área de cada município que se situa dentro da bacia; considerou-se a população como sendo uniformemente distribuída na área do município, adotando-se a percentagem de área do município dentro da bacia como sendo a percentagem de população situada dentro da bacia hidrográfica.

Alguns municípios, como Boa Vista da Aparecida, por exemplo, situam-se parte a montante de Salto Caxias e parte a jusante, sendo que na tabela 06 estas áreas estão separadas.

Além dos dados de população, na tabela 07 encontra-se a área e a altitude de cada um dos municípios, segundo dados fornecidos pela BPUB.

Tabela 06

- População -

Município	População Total		Pop. na bacia hid.		Observação
	urbana	rural	urbana	rural	
Ampére	6.346	5.937	0%	35%	jusante de Salto Caxias
Boa Esperança do Iguaçu	658	2.674	100%	100%	
Boa Vista da Aparecida	3.090	6.849	100%	75%	montante de Salto Caxias
Boa Vista da Aparecida	3.090	6.849	0%	3%	jusante de Salto Caxias
Bom Sucesso do Sul	1.140	2.691	100%	100%	
Capitão Leônidas Marques	5.897	4.420	0%	10%	montante de Salto Caxias
Capitão Leônidas Marques	5.897	4.420	0%	5%	jusante de Salto Caxias
Cascavel	208.714	12.271	0%	15%	montante de Salto Caxias
Cascavel	208.714	12.271	0%	5%	jusante de Salto Caxias
Catanduvas	4.104	4.990	100%	90%	
Chopinzinho	8.994	9.992	0%	10%	
Clevelândia	13.429	4.629	100%	100%	
Coronel Vivida	13.200	11.143	100%	60%	
Cruzeiro do Iguaçu	2.477	2.677	100%	100%	
Dois Vizinhos	25.824	8.603	100%	100%	
Enéas Marques	1.490	5.330	100%	100%	
Flor da Serra do Sul	334	4.719	0%	60%	
Francisco Beltrão	55.939	13.656	100%	80%	montante de Salto Caxias
Francisco Beltrão	55.939	13.656	0%	16%	jusante de Salto Caxias
Guaraniaçu	8.562	11.649	100%	50%	
Honório Serpa	1.046	7.283	100%	80%	
Ibema	4.504	2.198	100%	95%	
Itapejara do Oeste	4.203	4.420	100%	100%	
Mariópolis	2.014	2.615	100%	100%	
Marmeleiro	7.430	9.336	100%	100%	
Nova Esperança do Sudoeste	761	4.591	100%	60%	montante de Salto Caxias
Nova Esperança do Sudoeste	761	4.591	0%	40%	jusante de Salto Caxias
Nova Laranjeiras	316	11.120	0%	10%	
Nova Prata do Iguaçu	4.224	5.610	100%	90%	montante de Salto Caxias
Nova Prata do Iguaçu	4.224	5.610	0%	10%	jusante de Salto Caxias
Palmas	28.930	8.729	100%	50%	
Pato Branco	48.039	8.620	100%	100%	
Quedas do Iguaçu	17.271	13.909	0%	60%	
Realeza	9.254	6.101	100%	50%	jusante de Salto Caxias
Renascença	2.115	5.172	100%	100%	
Salto do Lontra	5.359	7.463	100%	70%	montante de Salto Caxias
Salto do Lontra	5.359	7.463	0%	30%	jusante de Salto Caxias
Santa Izabel do Oeste	4.614	6.490	100%	100%	jusante de Salto Caxias
São João	5.313	7.247	100%	60%	
São Jorge do Oeste	3.648	5.344	100%	50%	
Três Barras do Paraná	4.112	8.585	100%	100%	
Verê	3.118	6.421	100%	100%	
Vitorino	2.815	3.498	100%	100%	

Tabela 07

- Características Físicas dos Municípios -

Município	Área (km2)	Altitude (m)
Ampére	272,189	600
Boa Esperança do Iguaçu	148,583	n.c.
Boa Vista da Aparecida	247,030	550
Bom Sucesso do Sul	194,703	n.c.
Capitão Leônidas Marques	250,057	360
Cascavel	2.016,305	800
Catanduvas	553,278	680
Chopinzinho	899,137	760
Clevelândia	717,668	923
Coronel Vivida	701,016	718
Cruzeiro do Iguaçu	161,071	n.c.
Dois Vizinhos	419,229	520
Enéas Marques	193,090	569
Flor da Serra do Sul	256,602	n.c.
Francisco Beltrão	706,778	600
Guaraniaçu	1.645,017	920
Honório Serpa	503,648	n.c.
Ibema	138,547	910
Itapejara do Oeste	288,902	632
Mariópolis	238,719	800
Marmeleiro	387,197	726
Nova Esperança do Sudoeste	198,809	n.c.
Nova Laranjeiras	1.056,250	n.c.
Nova Prata do Iguaçu	288,000	320
Palmas	3.245,152	1.160
Pato Branco	577,684	760
Quedas do Iguaçu	1.199,049	630
Realeza	352,643	480
Renascença	434,069	600
Salto do Lontra	316,293	620
Santa Izabel do Oeste	318,439	525
São João	391,455	680
São Jorge do Oeste	382,364	520
Três Barras do Paraná	507,431	657
Verê	361,127	500
Vitorino	306,238	756

Exemplos:

a) Município de Boa Esperança do Iguaçu

População Urbana = 658 habitantes

População Rural = 2.674 habitantes

Como toda a área do município situa-se dentro da região em estudo, considerou-se 100% da população, tanto urbana quanto rural:

100% da população urbana = 658 habitantes

100% da população rural = 2.674 habitantes

b) Município de Coronel Vivida

População Urbana = 13.200 habitantes

População Rural = 11.143 habitantes

Apenas uma parte do município situa-se- dentro da região em estudo (aproximadamente 60% da área), sendo que a sede do município situa-se dentro da região em estudo:

100% da população urbana = 13.200 habitantes

60% da população rural = 0,6 x 11.143 = 6.686 habitantes

c) Município de Nova Laranjeiras

População Urbana = 316 habitantes

População Rural = 11.120 habitantes

Apenas uma parte do município situa- dentro da região em estudo (aproximadamente 10% da área), sendo que a sede do município situa-se fora da região em estudo:

0% da população urbana = 0 habitantes

10% da população rural = 0,1 x 11.120 = 1.112 habitantes

Na seqüência foram determinadas as cargas de cada município, considerando-se valores constantes em literatura (Fernandes, 1997) para o cálculo:

DBO = 54 g/hab.dia

Coliformes = 2 x 10^9 NMP/hab.dia

Nitrogênio Total = 9,8 g/hab.dia

Fósforo Total = 2,7 g/hab.dia

Sólidos em Suspensão = 54 g/hab.dia

Nas tabelas 08 e 09 seguintes pode ser visto a atual situação de cada município com relação ao abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto.

Tabela 08

- Abastecimento de Água -

Município	Economias						Ligações	Extensão da
	residen-ciais	Comer-ciais	Indus-triais	Utilidade pública	poder público	TOTAL	Cadastrad.	Rede (m)
Ampére	2.050	180	62	18	29	2.339	2.114	38,002
Boa Esperança do Iguaçu	207	12	1	6	9	235	221	5,046
Boa Vista da Aparecida	1.231	73	6	11	27	1.348	1.294	36.028
Bom Sucesso do Sul	322	22	5	7	16	372	357	9,161
Capitão Leônidas Marques	2.486	269	16	26	43	2.840	2.620	67,863
Cascavel	50.580	4.173	180	278	435	55.646	46.389	803.085
Catanduvas	1.121	83	1	15	30	1.250	1.182	39,790
Chopinzinho	2.068	215	21	16	38	2.358	2.173	42,930
Clevelândia	3.691	234	35	30	42	4.032	3.590	73,521
Coronel Vivida	3.380	309	39	35	39	3.802	3.443	73,467
Cruzeiro do Iguaçu	338	20	1	4	10	373	359	10,707
Dois Vizinhos	6.116	673	29	44	58	6.920	5.727	121,926
Enéas Marques	410	56	2	8	15	491	429	8,711
Flor da Serra do Sul	188	20	2	5	11	226	207	7,890
Francisco Beltrão	13.833	1.261	117	103	114	15.428	12.774	229,748
Guaraniaçu	2.008	171	8	16	48	2.251	2.043	48,001
Honório Serpa	466	30	4	9	13	522	492	11,785
Ibema	1.047	60	3	13	19	1.142	1.032	30,477
Itapejara do Oeste	1.152	131	5	15	24	1.327	1.221	28,762
Mariópolis	908	60	9	12	22	1.011	936	21,575
Marmeleiro	1.694	167	24	15	21	1.921	1.663	41,609
Nova Esperan. do Sudoeste	262	27	-	5	8	302	266	5,375
Nova Laranjeiras								
Nova Prata do Iguaçu	1.281	121	9	13	24	1.448	1.345	35.172
Palmas	6.088	542	75	46	59	6.810	5.790	126.631
Pato Branco	13.981	1.657	97	103	126	15.964	12.327	243,221
Quedas do Iguaçu	4.913	274	38	26	59	5.310	5.016	97,749
Realeza	2.615	261	20	34	47	2.977	2.703	67,153
Renascença	721	73	10	12	15	831	729	24,954
Salto do Lontra	1.388	116	10	18	27	1.559	1.454	29,146
Santa Izabel do Oeste	1.240	82	3	12	11	1.348	1.299	31.358,000
São João	1.125	100	6	19	23	1.273	1.190	30,563
São Jorge do Oeste	1.069	125	6	13	27	1.240	1.083	36,953
Três Barras do Paraná	1.317	116	4	14	31	1.482	1.443	32,068
Verê	747	78	4	10	24	863	768	18,943
Vitorino	736	69	4	13	14	836	776	17,877

fonte: Base Pública do Estado - BPUB

Tabela 09

- Atendimento de Esgoto -

Município	(1)			(2)		
	Ligações Cadastradas	Economias Existentes	Extensão da Rede (km)	População Urb. Atendida	Tipo de Tratamento	Eficiência
Ampére						
Boa Esperança do Iguaçu						
Boa Vista da Aparecida						
Bom Sucesso do Sul						
Capitão Leônidas Marques						
Cascavel	12.403	20.793	319,244	82.689	Ralf e lagoa	80%
Catanduvas						
Chopinzinho	81	81	-	255	Ralf/sediment.	80%
Clevelândia	302	422	9,538	1.275	bruto	0%
Coronel Vivida	850	1.053	27,767	3.110	Ralf	80%
Cruzeiro do Iguaçu						
Dois Vizinhos						
Enéas Marques						
Flor da Serra do Sul						
Francisco Beltrão	1.626	2.782	44,236	8.480	Ralf	80%
Guaraniaçu	706	840	19,308	2.866	Reator e lagoa	70%
Honório Serpa						
Ibema						
Itapejara do Oeste						
Mariópolis						
Marmeleiro	453	567	1,221	1.668	Ralf	80%
Nova Esperança do Sudoeste						
Nova Laranjeiras						
Nova Prata do Iguaçu						
Palmas	369	571	10,378	2.424	Reat./desaren.	80%
Pato Branco	2.691	5.057	59,024	18.542	Ralf	80%
Quedas do Iguaçu						
Realeza						
Renascença						
Salto do Lontra						
Santa Izabel do Oeste						
São João	339	379	14,889	1.150	Ralf e lagoa	80%
São Jorge do Oeste						
Três Barras do Paraná						
Verê						
Vitorino						

Conforme pode ser visto na tabela 09, poucos municípios da área em estudo contam com tratamento de esgoto, com apenas uma pequena parcela da população (urbana) sendo atendida.

A destinação do esgoto da população rural na área diretamente afetada está relacionada abaixo, conforme o Estudo de Impacto Ambiental:

destinação do esgoto:
- a céu aberto 12,64%
- lançado em córrego 5,45%
- fossas rudimentares 64,70%
- fossas sépticas 3,59%
- outro 0,12%
- sem declaração 13,50%

Como grande parte da população rural utiliza o sistema de fossas rudimentares (casinhas), é necessário determinar a parcela de esgoto a ser considerada nos cálculos como carga poluidora. A partir dos dados referentes à área diretamente afetada, considerando-os representativos também do restante da área da bacia hidrográfica, foi estimada a percentagem de esgoto proveniente da população rural que chega ao rio Iguaçu.

Portanto, foi considerado o esgoto lançado a céu aberto, o lançado em córregos e uma parte (20%) do esgoto cuja destinação não foi declarada (sem declaração):

100% a céu aberto
100% lançado em córrego
20% sem declaração

Assim: (1,00 x 12,64) + (1,00 x 5,45) + (0,20 x 13,50) = 20,79%

Valor adotado: **21%**

O valor de 20% adotado para o esgoto sem declaração de destino foi obtido considerando que esta parcela também possua 12,64% de esgoto lançado a céu aberto e 5,45% lançado em córrego:

a céu aberto + lançado em córrego = 12,64% + 5,45% = 18,09% ≈ 20%

Exemplos:

a) Município de Boa Esperança do Iguaçu

População Urbana = 658 habitantes
População Rural = 2.674 habitantes

cálculo da DBO:

população urbana = 658 habitantes x 54 g/hab.dia = 35.532 g/dia ou 35,53 kg/dia

população rural = 2.674 habitantes x 21% x 54 g/hab.dia = 30.323 g/dia = 30,32 kg/dia

a) Município de Marmeleiro

População Urbana = 7.430 habitantes

População Rural = 9.336 habitantes

Observação: parte da população urbana (1.668 habitantes) conta com tratamento de esgoto, com 80% de eficiência.

cálculo da DBO:

população urbana = (1.668 habitantes x 54 g/hab.dia x 20%) + [(7.430 habitantes - 1.668 habitantes) x 54 g/hab.dia]

= 329.162 g/dia ou 329,16 kg/dia

população rural = 9.336 habitantes x 21% x 54 g/hab.dia = 105.870 g/dia = 105,87 kg/dia

Nas tabelas 10 e 11 seguintes encontram-se os valores das cargas consideradas para cada município. O símbolo j constante na tabela indica os municípios situados entre Salto Caxias e a foz do rio Andrada, e o símbolo * indica as cidades onde parte da população urbana conta com tratamento de esgoto.

Tabela 10

- Cálculo das Cargas, População Urbana -

Município	DBO (kg/dia)	Coliformes (nmp*10^11/dia)	Nitrog. Total (kg/dia)	Fósforo Total (kg/dia)	Sól.em Susp. (kg/dia)	Obs.
Ampére	0,00	0,00	0,00	0,00	0.00	j
Boa Esperança do Iguaçu	35,53	2.632,00	6,45	1,78	35.53	
Boa Vista da Aparecida	166,86	12.360,00	30,28	8,34	166,86	
Boa Vista da Aparecida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Bom Sucesso do Sul	61,56	4.560,00	11,17	3,08	61.56	
Capitão Leônidas Marques	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Capitão Leônidas Marques	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Cascavel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cascavel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Catanduvas	221,62	16.416,00	40,22	11,08	221,62	
Chopinzinho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Clevelândia	725,17	53.716,00	131,60	36,26	725.17	
Coronel Vivida	578,45	42.848,00	104,98	28,92	578,45	*
Cruzeiro do Iguaçu	133,76	9.908,00	24,27	6,69	133.76	
Dois Vizinhos	1.394,50	103.296,00	253,08	69,72	1.394.50	
Enéas Marques	80,46	5.960,00	14,60	4,02	80.46	
Flor da Serra do Sul	0,00	0,00	0,00	0,00	0.00	
Francisco Beltrão	2.654,37	196.620,00	481,72	132,72	2.654.37	*
Francisco Beltrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0.00	j
Guaraniaçu	354,01	26.223,20	64,25	17,70	354.01	*
Honório Serpa	56,48	4.184,00	10,25	2,82	56,48	
Ibema	243,22	18.016,00	44,14	12,16	243.22	
Itapejara do Oeste	226,96	16.812,00	41,19	11,35	226,96	
Mariópolis	108,76	8.056,00	19,74	5,44	108.76	
Marmeleiro	329,16	24.382,40	59,74	16,46	329.16	*
Nova Esperança do Sudoeste	41,09	3.044,00	7,46	2,05	41,09	
Nova Esperança do Sudoeste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Nova Laranjeiras	0,00	0,00	0,00	0,00	0.00	
Nova Prata do Iguaçu	228,10	16.896,00	41,40	11,40	228,10	
Nova Prata do Iguaçu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Palmas	1.457,50	107.963,20	264,51	72,88	1.457,50	*
Pato Branco	1.793,09	132.821,60	325,41	89,65	1.793,09	*
Quedas do Iguaçu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Realeza	499,72	37.016,00	90,69	24,99	499,72	j
Renascença	114,21	8.460,00	20,73	5,71	114,21	
Salto do Lontra	289,39	21.436,00	52,52	14,47	289,39	
Salto do Lontra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	j
Santa Izabel do Oeste	249,16	18.456,00	45,22	12,46	249,16	j
São João	237,22	17.572,00	43,05	11,86	237,22	*
São Jorge do Oeste	196,99	14.592,00	35,75	9,85	196,99	
Três Barras do Paraná	222,05	16.448,00	40,30	11,10	222,05	
Verê	168,37	12.472.00	30,56	8,42	168,37	
Vitorino	152,01	11.260,00	27,59	7,60	152,01	

Tabela 11

- Cálculo das Cargas, População Rural -

Município	DBO (kg/dia)	Coliformes (nmp*10^11/dia)	Nitrog. Total (kg/dia)	Fósforo Total (kg/dia)	Sól.em Susp. (kg/dia)	Obs.
Ampére	23,56	1.745,48	4,28	1,18	23,56	j
Boa Esperança do Iguaçu	30,32	2.246,16	5,50	1,52	30,32	
Boa Vista da Aparecida	58,25	4.314,87	10,57	2,91	58,25	
Boa Vista da Aparecida	2,33	172,59	0,42	0,12	2,33	j
Bom Sucesso do Sul	30,52	2.260,44	5,54	1,53	30,52	
Capitão Leônidas Marques	5,01	371,28	0,91	0,25	5,01	
Capitão Leônidas Marques	2,51	185,64	0,45	0,13	2,51	j
Cascavel	20,87	1.546,15	3,79	1,04	20,87	
Cascavel	6,96	515,38	1,26	0,35	6,96	j
Catanduvas	50,93	3.772,44	9,24	2,55	50,93	
Chopinzinho	11,33	839,33	2,06	0,57	11,33	
Clevelândia	52,49	3.888,36	9,53	2,62	52,49	
Coronel Vivida	75,82	5.616,07	13,76	3,79	75,82	
Cruzeiro do Iguaçu	30,36	2.248,68	5,51	1,52	30,36	
Dois Vizinhos	97,56	7.226,52	17,70	4,88	97,56	
Enéas Marques	60,44	4.477,20	10,97	3,02	60,44	
Flor da Serra do Sul	32,11	2.378,38	5,83	1,61	32,11	
Francisco Beltrão	123,89	9.176,83	22,48	6,19	123,89	
Francisco Beltrão	24,78	1.835,37	4,50	1,24	24,78	j
Guaraniaçu	66,05	4.892,58	11,99	3,30	66,05	
Honório Serpa	66,07	4.894,18	11,99	3,30	66,07	
Ibema	23,68	1.754,00	4,30	1,18	23,68	
Itapejara do Oeste	50,12	3.712,80	9,10	2,51	50,12	
Mariópolis	29,65	2.196,60	5,38	1,48	29,65	
Marmeleiro	105,87	7.842,24	19,21	5,29	105,87	
Nova Esperança do Sudoeste	31,24	2.313,86	5,67	1,56	31,24	
Nova Esperança do Sudoeste	20,82	1.542,58	3,78	1,04	20,82	j
Nova Laranjeiras	12,61	934,08	2,29	0,63	12,61	
Nova Prata do Iguaçu	57,26	4.241,16	10,39	2,86	57,26	
Nova Prata do Iguaçu	6,36	471,24	1,15	0,32	6,36	j
Palmas	49,49	3.666,18	8,98	2,47	49,49	
Pato Branco	97,75	7.240,80	17,74	4,89	97,75	
Quedas do Iguaçu	94,64	7.010,14	17,17	4,73	94,64	
Realeza	34,59	2.562,42	6,28	1,73	34,59	j
Renascença	58,65	4.344,48	10,64	2,93	58,65	
Salto do Lontra	59,24	4.388,24	10,75	2,96	59,24	
Salto do Lontra	25,39	1.880,68	4,61	1,27	25,39	j
Santa Izabel do Oeste	73,60	5.451,60	13,36	3,68	73,60	j
São João	49,31	3.652,49	8,95	2,47	49,31	
São Jorge do Oeste	30,30	2.244,48	5,50	1,52	30,30	
Três Barras do Paraná	97,35	7.211,40	17,67	4,87	97,35	
Verê	72,81	5.393,64	13,21	3,64	72,81	
Vitorino	39,67	2.938,32	7,20	1,98	39,67	

Em uma primeira etapa, realizou-se a simulação apenas de temperatura, OD e DBO, sendo que o valor da concentração de DBO afluente ao rio Iguaçu foi determinada da seguinte forma:

- Uma vez determinadas as cargas nos pontos de lançamento, utilizou-se o seguinte procedimento para a determinação das cargas que chegam ao rio Iguaçu:

a) Determinação dos Pontos de Lançamento: Como não foram encontradas referências da destinação do esgoto, nem mesmo da parte urbana, arbitrou-se o rio ou córrego mais próximo da sede do município como sendo o corpo receptor. Este ponto de lançamento foi determinado com o auxílio das cartas topográficas da região. Para os casos em que a sede do município não se encontra dentro da região em estudo, identificou-se, também com auxílio das cartas topográficas, um rio principal na região (ver tabela 12).

b) Percurso Entre o Ponto de Lançamento e o Rio Iguaçu: A partir do ponto de lançamento arbitrado determinou-se qual o caminho percorrido pelas cargas poluentes, medindo-se distâncias e declividades, procedendo-se de maneira análoga ao que foi feito com as cargas industriais (ver tabela 12).

Nas tabelas também se encontram os valores dos tempos de percurso para o esgoto de cada um dos municípios. Estes tempos foram calculados através das equações para determinação do tempo de concentração (Picking, Califórinia e Kirpich), sendo adotados os valores obtidos através da utilização da equação de Kirpich.

Os valores finais das cargas afluentes ao rio Iguaçu encontram-se na tabela 13.

O valor adotado para a taxa de decaimento de DBO foi de 0,23/dia, conforme item 4.2.2.

TABELA 12

- Pontos de Lançamento e Percurso do Esgoto Doméstico -

Município	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)					Distância Total	Observação	Tempo de concentração (min)			Obs.
								Picking	California	Kirpich	
Ampére	R. Sarandi	R. Cotejipe									
Distância	71,00	4,00				75,00					j
Declividade	0,00423	0,00500						640	961	958	
Boa Esperança do Iguaçu	R. dos Micos						17,5 km a jusante				
Distância	11,50					11,50	do rio Guarani				
Declividade	0,01217							117	143	142	
Boa Vista da Aparecida	Sanga Aparecida	R. Tormenta									
Distância	4,50	7,00				11,50					
Declividade	0,03220	0,00214						196	238	237	
Boa Vista da Aparecida	Sanga Ag. Bonita	R. Andrada									
Distância	5,00	34,00				39,00					j
Declividade	0,02400	0,00088						634	962	958	
Bom Sucesso do Sul	córr. s/ nome	R. Vitorino	R. Chopim								
Distância	1,00	28,00	129,50			158,50					
Declividade	0,02000	0,00286	0,00108					1686	2854	2844	
Capitão Leônidas Marques	córrego Luciana						4 km a montante				
Distância	4,00					4,00	da foz do rio				
Declividade	0,02000						Cotejipe	49	52	52	
Capitão Leônidas Marques	Sanga dos Porcos						5 km a montante				
Distância	3,50					3,50	da foz do rio				j
Declividade	0,04000						Andrada	36	36	36	
Cascavel	Arroio Castelo	R. Tormenta									
Distância	4,00	70,00				74,00					
Declividade	0,02500	0,00400						613	929	925	
Cascavel	R. Cascavel	R. Andrada									
Distância	49,00	89,00				138,00					j
Declividade	0,00367	0,00146						1391	2253	2245	
Catanduvas	córrego s/ nome	R. Adelaide									
Distância	4,50	72,00				76,50					
Declividade	0,02220	0,00431						615	930	926	
Chopinzinho	R. Mirim	R. Gaspar	R. Chopim								
Distância	32,00	7,00	118,50			157,50					
Declividade	0,01063	0,00429	0,00101					1636	2718	2708	
Clevelância	córrego s/ nome	Arroio do Brinco	R. do Banho	R. Chopim							
Distância	3,00	5,00	21,00	272,50		301,50					
Declividade	0,02500	0,00100	0,00548	0,00221				2132	3696	3682	

TABELA 12

- Pontos de Lançamento e Percurso do Esgoto Doméstico -

Município	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)					Distância Total	Observação	Tempo de concentração (min)			Obs.
								Picking	California	Kirpich	
Coronel Vivida	R. Barro Preto	R. Chopim									
Distância	17,00	165,50				182,50					
Declividade	0,01205	0,00115						1678	2954	2944	
Cruzeiro do Iguaçu	Córrego Divisor	R. Chopim									
Distância	5,50	9,00				14,50					
Declividade	0,02300	0,00167						251	317	316	
Dois Vizinhos	R. Dois Vizinhos	R. Chopim									
Distância	19,00	49,00				68,00					
Declividade	0,00444	0,00092						959	1488	1483	
Enéas Marques	córrego s/ nome	R. Jaracatiá									
Distância	1,00	102,50				103,50					
Declividade	0,04500	0,00278						840	1372	1367	
Flor da Serra do Sul	R. Verde	R. Marrecas	R. Santana	R. Chopim							
Distância	8,00	118,00	32,00	104,50		262,50					
Declividade	0,01	0,00119	0,00125	0,00115				2.938	4.934	4.917	
Francisco Beltrão	R. Marrecas	R. Santana	R. Chopim								
Distância	58,50	32,00	104,00			194,50					
Declividade	0,00103	0,00125	0,001106					2420	4007	3993	
Francisco Beltrão	R. Cotejipe										
Distância	156,00					156,00					j
Declividade	0,00276							1095	1884	1877	
Guaraniaçu	R. Isolina	R. Guarani									
Distância	66,50	58,00				124,50					
Declividade	0,00827	0,00172						1093	1695	1689	
Honório Serpa	R. Passa Quatro	R. Chopim									
Distância	13,50	223,00				236,50					
Declividade	0,01407	0,00132						1901	3446	3434	
Ibema	córrego s/ nome	R. Formiga	R. Adelaide								
Distância	5,00	9,00	121,00			135,00					
Declividade	0,02000	0,02000	0,02000					619	882	879	
Itapejara do Oeste	córrego s/ nome	R. Vitorino	R. Chopim								
Distância	2,50	2,50	129,50			134,50					
Declividade	0,04000	0,00500	0,00097					1456	2530	2521	
Mariópolis	Laj. Lambedor	R. do Poço Preto	R. Pinheiro	R. Pato Branco	R. Chopim						
Distância	3,00	15,00	12,50	7,50	207,00	245,00					
Declividade	0,02167	0,00800	0,00360	0,00667	0,00111			2286	3944	3930	

TABELA 12

- Pontos de Lançamento e Percurso do Esgoto Doméstico -

Município	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)					Distância Total	Observação	Tempo de concentração (min)			Obs.
								Picking	California	Kirpich	
Marmeleiro	R. Marmeleiro	R. Santana	R. Chopim								
Distância	24,00	146,00	104,50			274,50					
Declividade	0,00167	0,00096	0,00110					3001	5199	5181	
Nova Esperança do Sudoeste	R. Lontras	R. Jaracatiá									
Distância	21,00	34,00				55,00					
Declividade	0,00548	0,00132						736	1083	1079	
Nova Esperança do Sudoeste	R. Cotejipe										
Distância	127,00					127,00	.				j
Declividade	0,00276							955	1608	1602	
Nova Laranjeiras	R. Guarani										
Distância	151,00					151,00					
Declividade	0,00404							944	1586	1580	
Nova Prata do Iguaçu	R. da Prata	R. Jaracatiá									
Distância	7,00	8,00				15,00					
Declividade	0,01875	0,00313						218	265	264	
Nova Prata do Iguaçu	Córrego da Arara	R. Cotejipe									
Distância	5,00	31,00				36,00					j
Declividade	0,02600	0,00129						533	783	781	
Palmas	Córrego Lajeado	R. das Caldeiras	R. Chopim								
Distância	4,00	11,00	363,50			378,50					
Declividade	0,02500	0,00455	0,00161					2507	4694	4678	
Pato Branco	Ligeiro	Rio Chopim									
Distância	50,50	161,00				211,50					
Declividade	0,00583	0,00115						1899	3295	3283	
Quedas do Iguaçu	R. Perdido						6 km a jusante				
Distância	41,00					41,00	da foz do rio				
Declividade	0,00829						Chopim	311	441	439	
Realeza	córrego s/ nome	R. Sarandi	R. Cotejipe								
Distância	1,00	43,00	4,00			48,00					j
Declividade	0,03000	0,00314	0,00375					547	779	777	
Renascença	R. Cascalhau	R. Marmeleiro	R. Santana	R. Chopim							
Distância	8,00	3,00	146,00	104,50		261,50					
Declividade	0,01375	0,00167	0,00092	0,01100				2221	3756	3742	
Salto do Lontra	R. Lontras	R. Jaracatiá									
Distância	16,5	34				50,50					
Declividade	0,01390	0,00132						650	953	950	

TABELA 12

- Pontos de Lançamento e Percurso do Esgoto Doméstico -

Município	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)					Distância Total	Observação	Tempo de concentração (min)			Obs.
								Picking	Califórnia	Kirpich	
Salto do Lontra	R. Cotejipe										
Distância	100,00					100,00					j
Declividade	0,00340							759	1234	1229	
Santa Isabel do Oeste	R. das Antas	R. Sarandi	R. Cotejipe								
Distância	3,50	53,00	4,00			60,50					j
Declividade	0,00428	0,00538	0,00375					588	819	816	
São João	R. São João	R. Dois Irmãos	R. Chopim								
Distância	12,00	14,00	108,00			134,00					
Declividade	0,00958	0,00428	0,00120					1450	2363	2354	
São Jorge do Oeste	R. Faxina	R. Chopim									
Distância	15,00	57,00				72,00					
Declividade	0,00933	0,00114						905	1413	1408	
Três Barras do Paraná	Córrego T. Barras	R. Guarani									
Distância	9,50	10,00				19,50					
Declividade	0,02632	0,00200						275	349	347	
Verê	córrego s/ nome	R. Viri	R. Chopim								
Distância	1,50	11,00	93,50			106,00					
Declividade	0,02000	0,00450	0,00112					1236	2024	2016	
Vitorino	R. Vitorino	R. Chopim									
Distância	84,00	129,50				213,50					
Declividade	0,00277	0,00104						2063	3543	3530	

OBSERVAÇÕES:

j = jusante de Salto Caxias

Córrego sem nome: nas cartas em escala 1:50.000 não aparece o nome do córrego

Na carta em escala 1:50.000 consta Cruzeiro do Canoas, e não Cruzeiro do Iguaçu

Na seqüência é apresentado um exemplo da obtenção dos valores listados na tabela 12:

Exemplo:

Município de Marmeleiro

O ponto de lançamento do esgoto, tanto o proveniente da população urbana quanto da população rural, é o rio Marmeleiro, que passa junto à sede do município. Depois de um percurso de 24 quilômetros, o rio Marmeleiro deságua no rio Santana. O esgoto segue então por este rio numa extensão de 146 quilômetros, até atingir o rio Chopim. Segue, na seqüência, por mais 104,5 quilômetros pelo rio Chopim, até atingir o rio Iguaçu, totalizando um percurso de 274,5 quilômetros (ver figura 14):

Carga de DBO total = 329,16 (população urbana) + 105,87 (população rural)

= 435,03 kg/dia (no ponto de lançamento)

Distância total entre o ponto de lançamento e o rio Iguaçu = 24 + 146 + 104,5 = 274,5 km.

Determinação do Tempo de Concentração:

a) Equação de Picking:

$$t_c = 5{,}3\left(\frac{L^2}{I}\right)^{1/3}$$

Rio Marmeleiro: $t_c = 5{,}3\left(\frac{24^2}{0{,}00167}\right)^{1/3} = 371{,}69 \text{ min}$

Rio Santana: $t_c = 5{,}3\left(\frac{146^2}{0{,}00096}\right)^{1/3} = 1.489{,}66 \text{ min}$

Rio Chopim: $t_c = 5{,}3\left(\frac{104{,}5^2}{0{,}00110}\right)^{1/3} = 1.139{,}08 \text{ min}$

Tempo Total = 3.001 minutos

b) Califórnia

$$t_c = 57\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0{,}385}$$

Rio Marmeleiro: $H = 0{,}00167 \times 24 = 0{,}04008$ km $= 40{,}08$ m

$L = (0.04008^2 + 24^2)^{1/2} = 24.000033 \approx 24$ km

$$t_c = 57\left(\frac{24^3}{40{,}08}\right)^{0{,}385} = 40{,}62 \text{ min}$$

Rio Santana: $H = 0{,}00096 \times 146 = 0{,}14016$ km $= 140.16$ m

$L = (0{,}14016^2 + 146^2)^{1/2} = 146.000067 \approx 146$ km

$$t_c = 57\left(\frac{146^3}{140{,}16}\right)^{0{,}385} = 2.686.90 \text{ min}$$

Rio Chopim: $H = 0{,}00110 \times 104{,}5 = 0{,}11495$ km $= 114{,}95$ m

$L = (0{,}11495^2 + 104{,}5^2)^{1/2} = 104{,}50006 \approx 104{,}5$ km

$$t_c = 57\left(\frac{104{,}5^3}{114.95}\right)^{0{,}385} = 1.970.87 \text{ min}$$

Tempo Total = 5.199 minutos

c) Equação de Kirpich:

$$t_c = 0{,}01947\left(\frac{L^{0{,}77}}{S^{0{,}385}}\right)$$

Rio Marmeleiro: $$t_c = 0{,}01947\left(\frac{24.000{,}033^{0{,}77}}{0{,}00167^{0{,}385}}\right) = 538{,}74 \text{ min}$$

Rio Santana: $$t_c = 0{,}01947\left(\frac{146.000{,}06^{0{,}77}}{0{,}00096^{0{,}385}}\right) = 2.677{,}59 \text{ min}$$

Rio Chopim: $$t_c = 0{,}01947\left(\frac{104.500{,}06^{0{,}77}}{0{,}00110^{0{,}385}}\right) = 1.964{,}74 \text{ min}$$

Tempo Total = 5.181 minutos

Determinação da Carga que Chega ao Rio Iguaçu:

$C_0 = 435{,}03$ kg/dia

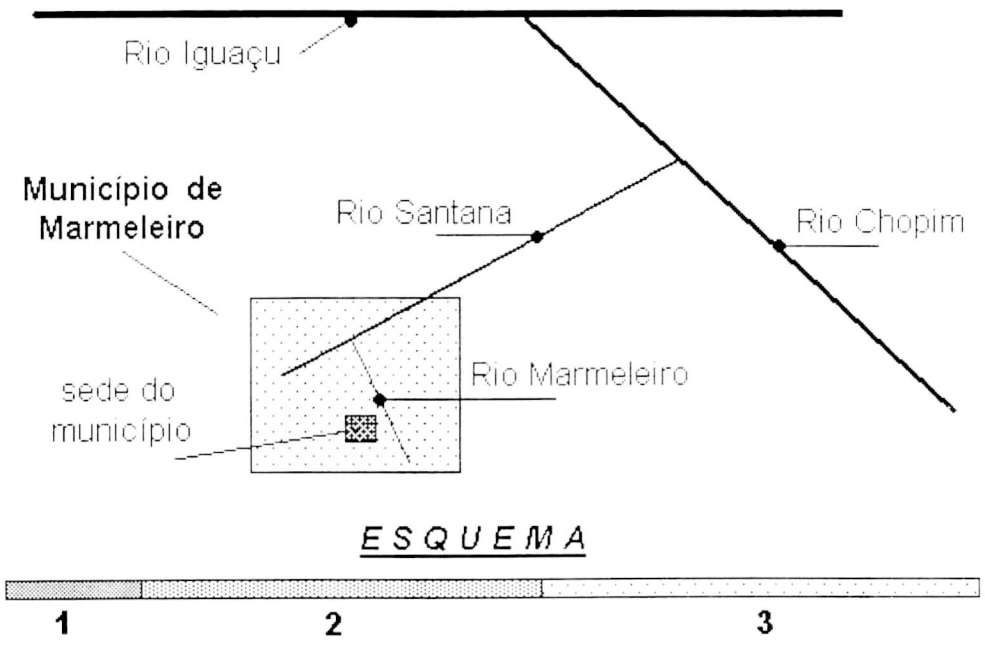
t = 5.181 minutos (adotando a equação de Kirpich)

k = 0,23/dia ou (1/ 6.261)/minuto

$$C = C_0 e^{-kt}$$

$$C = 435,03\ e^{-(1/6.261)5.181}$$

$$\Rightarrow \mathbf{C = 190,16\ kg/dia} \Leftarrow$$



1 ⇒ Rio Marmeleiro, L = 24,00 km, S = 0,00167 m/m;

2 ⇒ Rio Santana, L = 146 km, S = 0,00096 m/m;

3 ⇒ Rio Chopim, L = 104,50 km, S = 0,00110 m/m.

Figura 14

- Percurso Percorrido Pelo Esgoto, Município de Marmeleiro -

Tabela 13

- Concentração de DBO afluente ao rio Iguaçu (mg/l) -

Município	Concentração			Ponto de Lançamento	Obs.
	Picking	California	Kirpich		
Ampére	21,273	20,211	20,222	R. Cotejipe	j
Boa Esperança do Iguaçu	64,632	64,370	64,375	R. dos Micos	
Boa Vista da Aparecida	218,176	216,714	216,744	R. Tormenta	
Boa Vista da Aparecida	2,106	1,998	1,999	R. Andrada	j
Bom Sucesso do Sul	70,337	58,365	58,459	R. Chopim	
Capitão Leônidas Marques	4,973	4,971	4,971	Cór. Luciana	
Capitão Leônidas Marques	2,492	2,492	2,492	S. dos Porcos	j
Cascavel	18,927	17,996	18,005	R. Tormenta	
Cascavel	5,571	4,855	4,861	R. Andrada	j
Catanduvas	247,043	234,941	235,065	R. Adelaide	
Chopinzinho	8,726	7,340	7,352	R. Chopim	
Clevelândia	553,246	430,967	431,868	R. Chopim	
Coronel Vivida	500,466	408,162	408,844	R. Chopim	
Cruzeiro do Iguaçu	157,657	156,003	156,031	R. Chopim	
Dois Vizinhos	1.280,091	1.176,382	1.177,371	R. Chopim	
Enéas Marques	123,202	113,173	113,261	R. Jaracatiá	
Flor da Serra do Sul	20,081	14,599	14,640	R. Chopim	
Francisco Beltrão	1.887,531	1.464,966	1.468,283	R. Chopim	
Francisco Beltrão	20,800	18,339	18,359	R. Cotejipe	j
Guaraniaçu	352,775	320,457	320,764	R. Guarani	
Honório Serpa	90,459	70,677	70,815	R. Chopim	
Ibema	241,761	231,814	231,932	R. Adelaide	
Itapejara do Oeste	219,588	184,971	185,235	R. Chopim	
Mariópolis	96,071	73,720	73,884	R. Chopim	
Marmeleiro	269,375	189,606	190,164	R. Chopim	
Nova Esperança do Sudoeste	64,310	60,845	60,883	R. Jaracatiá	
Nova Esperança do Sudoeste	17,878	16,108	16,122	R. Cotejipe	j
Nova Laranjeiras	10,846	9,789	9,797	R. Guarani	
Nova Prata do Iguaçu	275,590	273,539	273,580	R. Jaracatiá	
Nova Prata do Iguaçu	5,843	5,614	5,616	R. Cotejipe	j
Palmas	1.009,726	712,018	713,908	R. Chopim	
Pato Branco	1.396,035	1.117,118	1.119,199	R. Chopim	
Quedas do Iguaçu	90,046	88,206	88,228	R. Perdido	
Realeza	489,589	471,776	471,984	R. Cotejipe	j
Renascença	121,235	94,882	95,083	R. Chopim	
Salto do Lontra	314,252	299,397	299,559	R. Jaracatiá	
Salto do Lontra	22,489	20,848	20,862	R. Cotejipe	j
Santa Izabel do Oeste	293,821	283,164	283,295	R. Cotejipe	j
São João	227,286	196,462	196,725	R. Chopim	
São Jorge do Oeste	196,716	181,369	181,514	R. Chopim	
Três Barras do Paraná	305,668	302,101	302,161	R. Guarani	
Verê	197,986	174,575	174,774	R. Chopim	
Vitorino	137,873	108,845	109,063	R. Chopim	

Além da população urbana e rural existe na região população indígena, residente na Reserva Indígena Rio das Cobras. Desta reserva, as aldeias Jacutinga e Caçador situam-se dentro da região em estudo. Foi adotado o mesmo processo de cálculo usado para a população rural (considerando-se também apenas 21% da carga, ou seja, de todo o esgoto produzido por esta parcela da população, apenas 21% atinge o sistema hídrico), conforme pode ser visto nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14

- Cálculo das Cargas, População Indígena -

Aldeia	População	Carga Inicial (kg/dia)	Vazão (l/hab.dia)	Carga (mg/l)	Carga de DBO (kg/dia)			Ponto de Lançamento
					Picking	California	Kirpich	
Jacutinga	30	1,62	615,83	2,631	1,346	1,196	1,197	Guarani
Caçador	63	3,40	1.293,23	2,631	2,842	2,525	2,528	Guarani

Tabela 15

- Pontos de Lançamento e Percurso do Esgoto, População Indígena -

Aldeia	Corpo(s) Receptor(es) distância (km)			Distância Total	Tempo de concentração (min)		
					Picking	Califórnia	Kirpich
Jacutinga	R. Jacutinga	Córr. Caçador	R. Guarani				
Distância	10,00	2,00	125,00	137.00			
Declividade	0,01400	0,01500	0,00216		1161	1901	1894
Caçador	Córr. Caçador	R. Guarani					
Distância	10,00	125.00		135.00			
Declividade	0,01400	0,00216			1127	1866	1860

Tabela 16

- Concentração de DBO nos afluentes (kg/dia) -

Ponto de Lançamento	distância até SC (km)	DBO (kg/dia)			
		doméstico	res. indígena	industrial	**TOTAL**
Rio Chopim	86,5	6.833,212		373,143	7.206,355
Rio Tormenta	27,5	234,748			234,748
Rio Adelaide	29,5	466,996			466,996
Rio Jaracatiá	49,0	747,282		19,970	767,253
Rio Guarani	67,0	632,722	3,724	0,496	636,943
Rio Andrada	9,0	6,860			6,860
Rio Cotejipe	1,0	836,460			836,460
Rio dos Micos	49,5	64,375			64,375
Rio Perdido	86,5	88,227			88,227
Córrego Luciana	3,5	4,970			4,970
Sanga dos Porcos	5,0	2,491			2,491

9 . APLICAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL QUAL-2E À REGIÃO EM ESTUDO

Uma vez reunidos os dados necessários para a simulação computacional do sistema hídrico na fase rio, será feita uma descrição dos dados necessários para utilização do modelo QUAL-2E, bem como o modo pelo qual estes dados foram obtidos, incluindo as hipóteses adotadas.

Dentre estas hipóteses, convém ressaltar a adoção forçosa de aproximações temporais para a simulação do sistema (Dziedzic[a], 1997). Isso se deve ao fato de que as coletas de amostras para análise de qualidade da água são efetuadas em campanhas integradas com investigações ictiológicas, que duram em torno de dez dias. Logo, os dados obtidos não se referem a um mesmo instante, e são adotadas algumas hipóteses: toma-se a vazão média durante o período de coleta e considera-se os parâmetros de qualidade da água constantes no período. Além disso, a modelagem do sistema requer vários parâmetros característicos dos processos de transporte e das reações químicas mais importantes que, na grande maioria, não são determinados ou conhecidos para a região em estudo. É necessário, portanto, adotar modelos teóricos, quando disponíveis, ou, na sua ausência, utilizar valores recomendados na literatura.

É importante, também, frisar a importância dos critérios de definição de locais para pontos de coleta de amostras para monitoramento de qualidade da água. É essencial o conhecimento da vazão nesses pontos, assim como a existência de mistura homogênea na seção transversal das substâncias transportadas pelo escoamento. Logo, pontos favoráveis são aqueles onde existem estações linimétricas ou fluviométricas, e aqueles não muito próximos da foz de afluentes importantes ou de pontos de descarga substancial de efluentes.

No presente estudo o rio Iguaçu foi dividido em 33 tramos, sendo cada um destes subdividido em elementos computacionais de igual comprimento (adotado igual a 500 m). Como não se dispõe de dados suficientes a respeito dos afluentes, estes não foram explicitamente modelados na presente dissertação. Suas vazões, bem como suas cargas, foram incluídas no sistema como fontes pontuais. Procurou-se dividir o rio em tramos que apresentassem características hidrogeométricas o mais próximas possíveis, para minimizar erros.

Na seqüência será apresentada uma descrição, organizada na seqüência das telas do QUAL-2E, dos dados levantados e das hipóteses adotadas para sua adaptação às necessidades do modelo numérico. Numa primeira etapa foram simulados apenas temperatura, OD (oxigênio dissolvido) e DBO (demanda bioquímica de oxigênio), sendo os outros parâmetros modelados na seqüência.

9 . 1 SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA, OD E DBO

Tela 01 - Descrição Básica do Problema

Descrição da Simulação: Rio Iguaçu - Junho/1997

Tipo de Simulação: Escoamento Permanente (steady state)

Unidades: Métricas

Canais: Trapezoidais

Número de Tramos: 33 (ver figura 15)

Tela 02 - Discretização do Sistema

Na tabela 17 e figura 15 seguintes encontra-se a sub-divisão em tramos do trecho do rio Iguaçu entre Salto Osório e a foz do rio Andrada. A primeira coluna identifica o tramo, utilizando as seções transversais definidas no relatório de viabilidade e demarcadas no anexo 01, e o nome dos principais afluentes. A segunda e terceira colunas indicam, respectivamente, o início e o final de cada tramo, onde a distância, em quilômetros, é computada para montante, a partir da foz do rio Andrada.

Como pode ser observado, cada tramo está dividido em elementos computacionais de comprimento, Δx, de 500 metros.

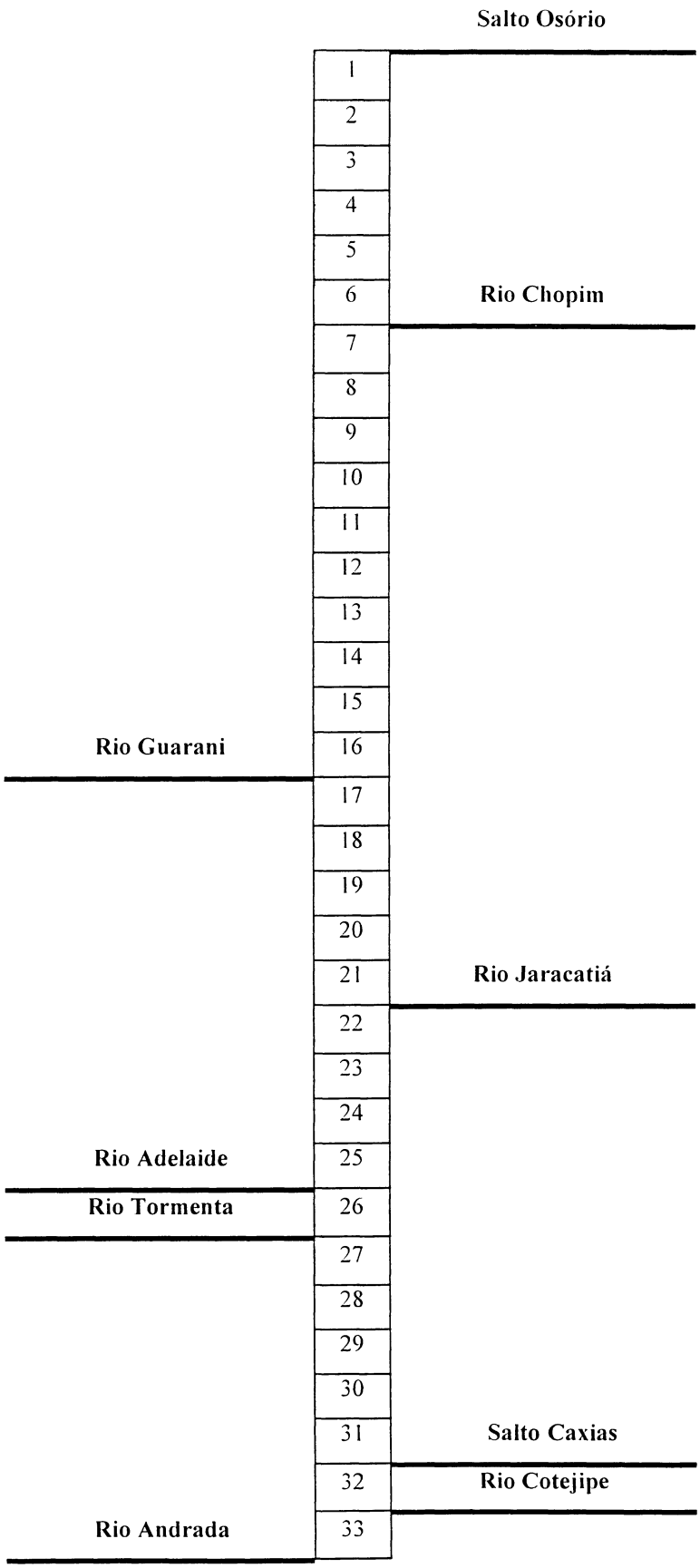


Figura 15

- Representação Esquemática dos Tramos Utilizados na Simulação do Rio Iguaçu na Região em Estudo -

Tabela 17

- Tela 02 - Discretização do Sistema (Stream Reach System) -

N.º do Tramo	Descrição do Tramo	Início (km)	Final (km)	Delta x (km)
1*	SCAX32-SCAX33	103,00	101,50	0,5
2	SCAX31-SCAX32	101,50	100,00	0,5
3	SCAX25-SCAX31	100,00	99,00	0,5
4	SCAX30-SCAX25	99,00	97,00	0,5
5	SCAX24-SCAX30	97,00	96,00	0,5
6	Chopim-SCAX24	96,00	95,50	0,5
7	SCAX23-Chopim	95,50	95,00	0,5
8	SCAX28-SCAX23	95,00	92,00	0,5
9	SCAX27-SCAX28	92,00	90,50	0,5
10	SCAX26-SCAX27	90,50	89,00	0,5
11	SCAX13-SCAX26	89,00	88,00	0,5
12	SCAX15-SCAX13	88,00	84,50	0,5
13	SCAX16-SCAX15	84,50	83,00	0,5
14	SCAX17-SCAX16	83,00	81,00	0,5
15	SCAX12-SCAX17	81,00	78,00	0,5
16	Guarani-SCAX12	78,00	76,00	0,5
17	SCAX11-Guarani	76,00	72,50	0,5
18	SCAX10-SCAX11	72,50	66,00	0,5
19	SCAX09-SCAX10	66,00	62,50	0,5
20	SCAX08-SCAX09	62,50	59,50	0,5
21	Jaracatiá-SCAX08	59,50	58,00	0,5
22	SCAX07-Jaracatiá	58,00	54,50	0,5
23	SCAX06-SCAX07	54,50	50,00	0,5
24	SCAX05-SCAX06	50,00	43,50	0,5
25	Adelaide-SCAX05	43,50	38,50	0,5
26	Tormenta-Adelaide	38,50	36,50	0,5
27	SCAX04-Tormenta	36,50	30,00	0,5
28	SCAX03-SCAX04	30,00	24,50	0,5
29	SCAX02-SCAX03	24,50	20,50	0,5
30	SCAX01-SCAX02	20,50	14,50	0,5
31	SCAX00-SCAX01	14,50	9,00	0,5
32	Cotejipe-SCAX00	9,00	8,00	0,5
33	Andrada-Cotejipe	8,00	0,00	0,5

* : elemento de cabeceira

Como exemplo de como foi efetuada esta divisão, os tramos 01 (figura 16) e 17 (figura 17) são descritos abaixo:

Tramo 01

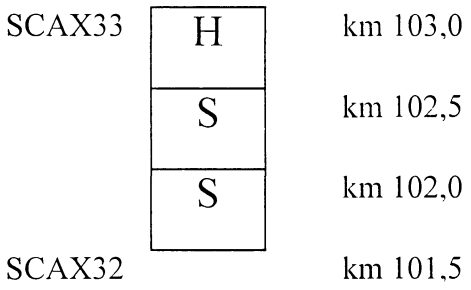


Figura 16

- Exemplo de Divisão dos Tramos (tramo 01) -

Como pode ser observado, o tramo 01 é dividido em três elementos computacionais, cada um com comprimento igual a 500 metros. O primeiro elemento do tramo é também o primeiro elemento do trecho simulado, ou seja, é um elemento de cabeceira (H = Headwater). Os outros dois são elementos padrão (S = Standard).

Tramo 17

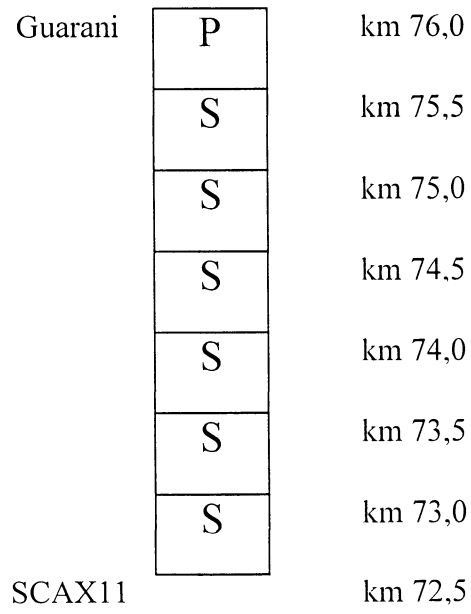


Figura 17

- Exemplo de Divisão dos Tramos (tramo 17) -

Este tramo está dividido em sete elementos computacionais, compreendendo uma distância de 3.500 metros. O primeiro elemento corresponde à entrada da vazão do rio Guarani (P = Point Source).

Tela 03 - Definição de tipos de elementos computacionais

Cada um dos elementos computacionais precisa ser definido quanto ao tipo (elemento de cabeceira, elemento padrão, etc):

Tabela 18

- Tela 03 - Definição dos Tipos de Elementos Computacionais -

N.° do Tramo	N.° de Elem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	3	H	S	S													
2	3	S	S	S													
3	2	S	S														
4	4	S	S	S	S												
5	2	S	S														
6	1	S															
7	1	P															
8	6	S	S	S	S	S	S										
9	3	S	S	S													
10	3	S	S	P													
11	2	S	S														
12	7	S	S	S	S	S	S	S									
13	3	S	S	S													
14	4	S	S	S	S												
15	6	S	S	S	S	S	S										
16	4	S	S	S	S												
17	7	P	S	S	S	S	S	S									
18	13	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			
19	7	S	S	S	S	S	S	S									
20	6	S	S	S	S	S	S										
21	3	S	S	P													
22	7	P	S	S	S	S	S	S									
23	9	S	S	S	S	S	S	S	S	S							
24	13	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			
25	10	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S						
26	4	P	S	S	S												
27	13	P	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			
28	11	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					
29	8	S	S	S	S	S	S	S	S								
30	12	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S				
31	11	S	S	S	S	P	S	S	S	S	S	S					
32	2	S	S														
33	16	P	S	S	S	S	S	P	S	S	S	S	S	S	S	S	E

Como pode ser observado acima, os elementos denominados P (point source/ carga pontual) correspondem às entradas dos afluentes principais, descritos mais adiante.

Tela 04 - Definição de parâmetros a simular

Nesta tela são indicados os parâmetros e processos que se deseja modelar. Estes incluem: temperatura, DBO, algas, ciclo do fósforo, nitrogênio, OD, coliformes fecais, até três elementos conservativos e um elemento não conservativo. Nesta primeira simulação serão modelados apenas temperatura, OD e DBO.

Tela 05 - Localização Geográfica e Informações Climatológicas Básicas

Latitude: 26°

Longitude: 53°

Meridiano Padrão: 45°

Elevação: 324 m (altitude média dos pontos de coleta)

Coeficiente de atenuação de poeira: 0,06 (utilizado o valor padrão do programa)

Coeficientes de evaporação: para o cálculo das constantes de evaporação (AE e BE) foi adotado o procedimento descrito na seqüência, onde a = AE e b = BE.

$$E = (a + b \cdot V) \cdot (e_s - e_a) \qquad (9.1.1)$$

onde: a e b = constantes;

e_s = pressão de vapor de saturação do ar (in Hg) [L]

e_a = pressão de vapor a uma altura de seis pés sobre a superfície da água (in Hg) [L]

E = taxa de evaporação (ft/hr) [LT^{-1}]

V = velocidade do vento, medida a 6 pés sobre a superfície da água [LT^{-1}]

$$e_s = 0{,}1001 \cdot e^{(0{,}03Ts)} - 0.0837 \qquad (9.1.2)$$

onde: $T_s = T_{média}$ em °F

$$e_a = e_{wb} - 0{,}000367 \cdot pa(T_a - T_{wb}) \qquad (9.1.3)$$

onde: e_{wb} = pressão de vapor de saturação (in Hg) [L]

pa = pressão barométrica local (in Hg) [L]

T_a = temperatura de bulbo seco (°F)

T_{wb} = temperatura de bulbo úmido (°F).

Os valores de "a" e "b" são obtidos por ajuste de curva aos dados disponíveis das outras variáveis para as estações meteorológicas da região em estudo. Estas estações situam-se em Cascavel e Quedas do Iguaçu.

Os valores aceitos pelo programa situam-se entre 0,0 e 9,1 E-05.

Fatores de correção de temperatura: adotados valores padrões do programa, tradicionalmente utilizados na literatura especializada a partir de determinações em laboratório).

Tela 06 - Tramos Para a Visualização de OD e DBO

Definição de tramos para a visualização de OD e DBO.

Tela 07 - Dados Observados de OD

São os valores observados de OD (pontos de monitoramento).

Tela 08 - Coeficientes Globais de Reações Cinéticas

São os coeficientes globais de reações cinéticas, como por exemplo, consumo de oxigênio para oxidação de amônia e nitritos e coeficientes representativos dos processos devido à presença de algas. Estes valores não são utilizados nesta primeira simulação.

Tela 09 - Fatores de Correção de Temperatura

Foram utilizados os valores padrões do programa, determinados em laboratório por diversos pesquisadores.

Tela 10 - Opção de Aumento de Vazão

Opção de aumento de vazão para preencher requisitos pré-estabelecidos para os parâmetros de qualidade da água. Consiste em indicar fontes adicionais de água que podem ser injetadas em cada tramo a fim de modificar concentrações. Para as simulações realizadas, esta opção não foi utilizada.

Tela 11 - Parâmetros Hidráulicos

Nesta tela são fornecidos os parâmetros hidráulicos: coeficiente de dispersão, declividade dos taludes das seções transversais, coeficiente de rugosidade de Manning (n), declividade e largura do fundo do canal.

O coeficiente de dispersão longitudinal pode ser expresso como (Fischer et al, 1979):

$$D_L = 0{,}011 \frac{\bar{u}^2 W^2}{y_0 u_*} \qquad (9.1.1)$$

onde: $\bar{u}$ = velocidade média do escoamento [LT^{-1}]

W = largura do canal [L]

y_0 = profundidade do escoamento [L]

u_* = velocidade de corte [LT^{-1}]

g = aceleração da gravidade [LT^{-2}]

R = raio hidráulico [L]

onde R = A/P, sendo A = área da seção transversal

P = perímetro molhado

S' = declividade da linha de energia.

A expressão genérica adotada no manual do QUAL-2E para o coeficiente de dispersão longitudinal é:

$$D_L = K\, y_0\, u_* \qquad (9.1.2)$$

onde: K = quantidade que deve ser fornecida pelo usuário do programa.

Das duas equações acima pode-se escrever:

$$K = 0{,}011 \frac{\bar{u}^2 W^2}{y_0^2 g R S'} \qquad (9.1.3)$$

Pode-se ainda utilizar a equação de Manning-Strickler para escoamento em canais:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} R^{2/3} S'^{1/2} \qquad (9.1.4)$$

onde: n = coeficiente de rugosidade de Manning

Isolando-se S'' e substituindo na equação 9.1.3, obtém-se a expressão utilizada para o cálculo de K:

$$K = 0{,}011 \frac{W^2 R^{1/3}}{y_0^2 g n^2} \qquad (9.1.5)$$

Os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning (Revisão do Estudo de Viabilidade da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias) correspondem aos valores de K_s (K_s = 1/n):

- K_s = 27 entre Salto Caxias e Salto Capanema;
- K_s = 25 entre Salto Caxias e o canal de fuga da usina JMF;
- K_s = 29 entre JMF e Salto Osório.

Estes valores, assim como os referentes à geometria da seção transversal foram obtidos junto à Divisão de Hidrologia do CEHPAR (Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza) - COPEL, a partir dos estudos de remanso.

Os valores adotados para a declividade média do trecho correspondem àqueles recomendados na Revisão do Estudo de Viabilidade, iguais a 0,0005 m/m. É importante ressaltar que o programa impõe um valor limite de 6.000,00 para o coeficiente de dispersão, sendo este o valor utilizado nos tramos 26 a 33.

Para a obtenção dos valores de profundidade (y_0) para a determinação de K, primeiramente arbitrou-se um valor qualquer para K no programa QUAL2E, conseguindo-se então, através do programa, os valores da profundidade para cada tramo (adotou-se uma média dos elementos computacionais de cada tramo). Estes valores foram então utilizados no cálculo definitivo do valor de K.

Tabela 19

- Tela 11 - Parâmetros Hidráulicos -

N.º do Tramo	Coeficiente de Dispersão	n (Manning)	Declividade dos taludes (m/m)		Largura do fundo (m)	Declivid. do canal (m/m)
1	728,405	0,034	2,85	3,31	218,78	0,0005
2	1.109,361	0,034	3,15	2,73	265,75	0,0005
3	1.044,620	0,034	2,97	3,30	253,75	0,0005
4	1.383,675	0,034	1,93	2,91	286,35	0,0005
5	1.135,321	0,034	8,51	2,50	256,25	0,0005
6	828,997	0,034	9,47	4,58	215,80	0,0005
7	5.346,975	0,034	10,17	4,43	537,40	0,0005
8	6.000,000	0,034	9,62	5,03	690,55	0,0005
9	4.769,439	0,034	2,10	5,57	487,65	0,0005
10	3.984,335	0,034	2,09	5,55	437,10	0,0005
11	2.646,866	0,034	3,34	5,70	349,80	0,0005
12	1.539,746	0,034	3,18	8,12	261,55	0,0005
13	1.599,354	0,034	5,21	7,08	261,45	0,0005
14	1.321,564	0,040	8,44	2,72	232,25	0,0005
15	1.086,988	0,040	6,62	2,58	205,90	0,0005
16	1.483,704	0,040	4,69	2,29	234,90	0,0005
17	2.486,752	0,040	3,63	2,89	297,35	0,0005
18	5.252,012	0,040	2,89	3,93	422,20	0,0005
19	4.436,957	0,040	4,11	4,19	379,00	0,0005
20	2.535,882	0,040	4,31	4,03	279,40	0,0005
21	2.789,555	0,040	3,60	4,06	285,40	0,0005
22	3.445,009	0,040	4,09	4,66	308,95	0,0005
23	2.669,879	0,040	4,80	5,15	264,70	0,0005
24	1.168,022	0,040	5,46	3,80	170,10	0,0005
25	3.529,710	0,040	5,28	2,91	286,78	0,0005
26	6.000,000	0,040	4,67	3,26	430,25	0,0005
27	6.000,000	0,040	4,06	3,60	537,73	0,0005
28	6.000,000	0,040	3,57	4,39	637,30	0,0005
29	6.000,000	0,040	5,61	4,76	517,50	0,0005
30	6.000,000	0,040	6,01	2,84	570,30	0,0005
31	6.000,000	0,040	5,10	1,06	584,63	0,0005
32	6.000,000	0,037	5,70	1,12	506,25	0,0005
33	6.000,000	0,037	5,70	1,12	506,25	0,0005

As declividades dos taludes das margens e larguras do fundo são baseadas em médias das características hidrogeométricas das seções transversais que delimitam o tramo, e em alguns casos de tramos próximos ou intermediários. As médias foram determinadas de acordo com a tabela 20:

Tabela 20

- Obtenção das Características Hidrogeométricas -

Tramo	Obtenção dos Dados
1	média aritmética das seções 33, 14 e 32
2	média aritmética das seções 31 e 32
3	média aritmética das seções 25 e 31
4	média aritmética das seções 25 e 30
5	média aritmética das seções 24 e 30
6	média aritmética das seções 24 e 29
7	média aritmética das seções 29 e 23
8	média aritmética das seções 28 e 23
9	média aritmética das seções 27 e 28
10	média aritmética das seções 26 e 27
11	média aritmética das seções 13 e 26
12	média aritmética das seções 13 e 15
13	média aritmética das seções 15 e 16
14	média aritmética das seções 16 e 17
15	média aritmética das seções 12 e 17
16	seção 12
17	média aritmética das seções 11 e 12
18	média aritmética das seções 10 e 11
19	média aritmética das seções 9 e 10
20	média aritmética das seções 8 e 9
21	seção 8
22	média aritmética das seções 7 e 8
23	média aritmética das seções 6 e 7
24	média aritmética das seções 5 e 6
25	média aritmética da média entre as seções 4 e 5 e seção 5
26	média aritmética das seções 4 e 5
27	média aritmética da média entre as seções 4 e 5 e seção 4
28	média aritmética das seções 3 e 4
29	média aritmética das seções 2 e 3
30	média aritmética das seções 1 e 2
31	média aritmética das seções 00 e1
32	seção 00
33	seção 00

Observação: a localização das seções encontra-se no anexo 01

Tela 12 - Coeficientes de Reação de OD e DBO

Os coeficientes definidos nesta tela necessitam de determinação experimental em campo ou em laboratório com amostras coletadas em campo. Como inicialmente não se dispunha destes dados, optou-se por adotar valores de literatura:

- Variação de DBO (BOD Decay): é a taxa de decaimento de DBO, definida no capítulo 4, item 4.2.2, de valor igual a 0,23/dia;

- Diminuição de DBO devido a assentamento de partículas (BOD Settling): adotado igual a zero;

- Demanda de Oxigênio do Sedimento (SOD Rate): adotado igual a zero;

- Coeficiente de Reaeração (k_2): também requer determinação experimental em campo, de custo relativamente alto. Foi feita uma análise teórica das várias expressões empíricas disponíveis para o cálculo de k_2 nos dois pontos do trecho em estudo do rio Iguaçu onde se dispõe de curvas de descarga, Salto Caxias e Salto Osório sendo os resultados indicados nas figuras 18 e 19, respectivamente. Verificou-se que a equação de Bennet (31%) poderia ser adotada. Entretanto, esta equação não é uma das opções pré-programadas do QUAL2E. Como alternativa poderia ajustada uma equação da forma $k_2 = aQ^b$. Esta tentativa, porém, não resultou em coeficientes de correlação aceitáveis, e seria de difícil generalização para os tramos onde ainda não se dispõe de dados. Decidiu-se, então, adotar a equação de Thackston-Krenkel, uma das opções pré-programadas do QUAL-2E, por ser a que melhor se ajusta às características da região.

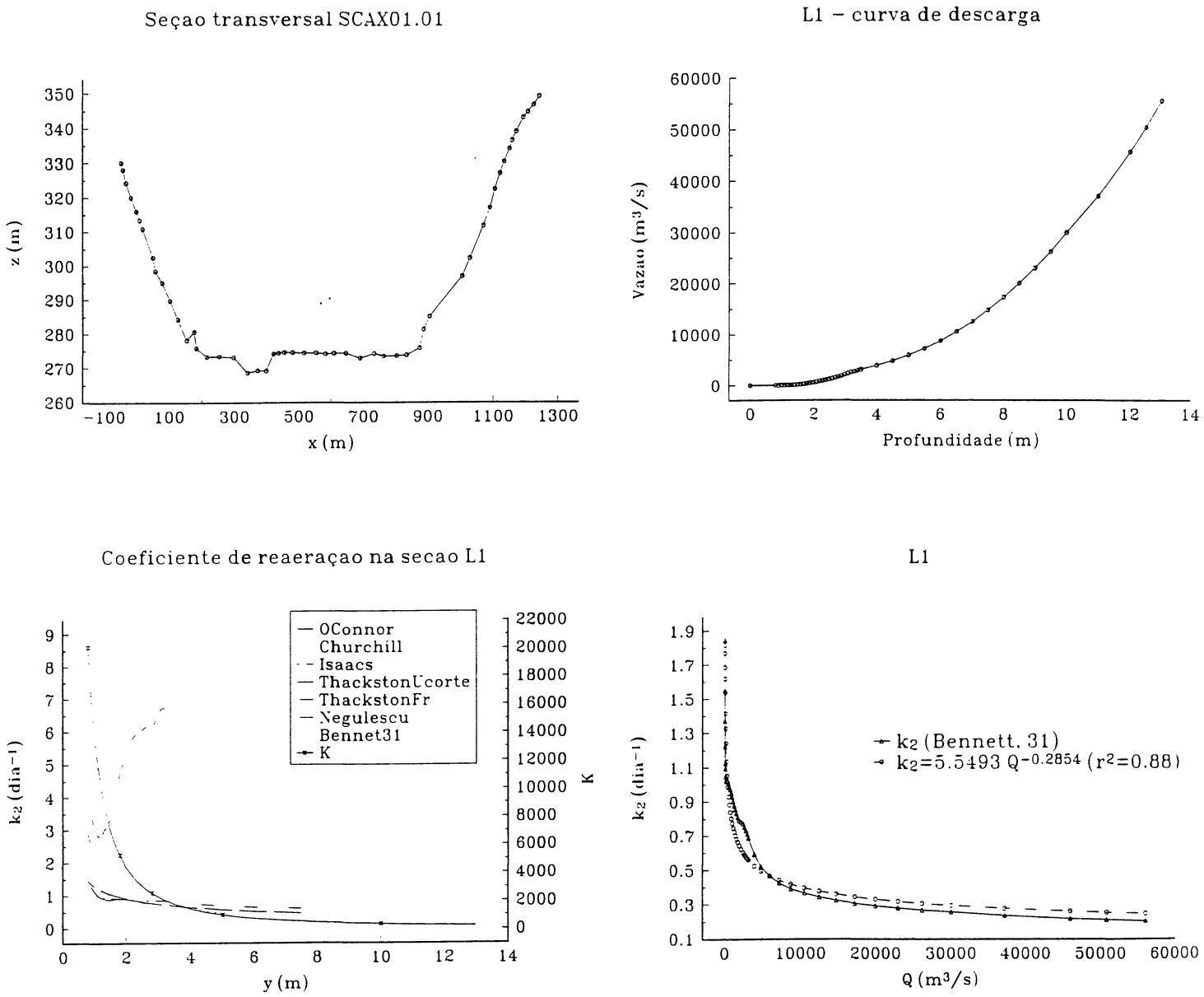


Figura 18

- Coeficiente de Reaeração em Salto Caxias -

(Dziedzic[a], 1997)

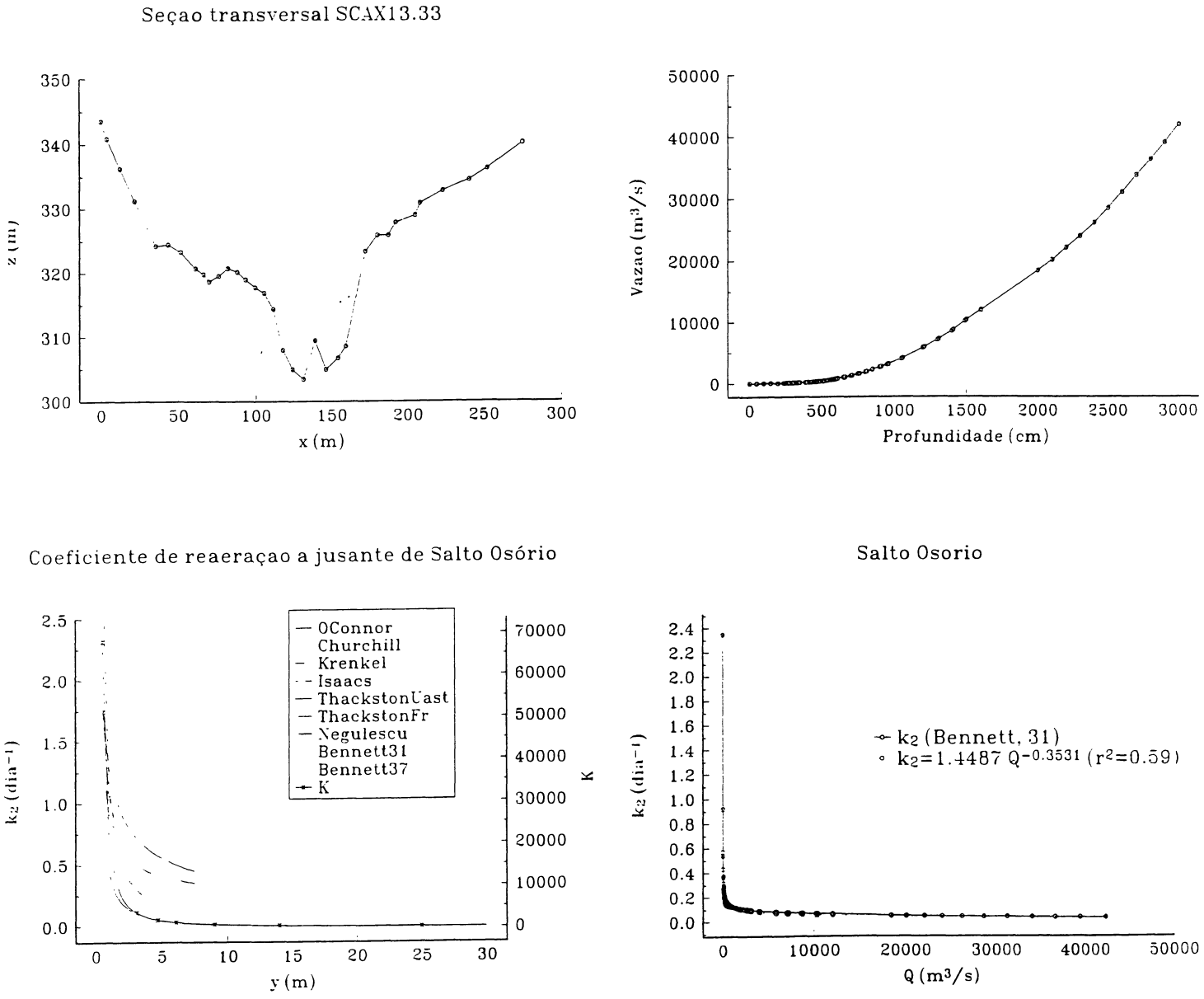


Figura 19

- Coeficiente de Reaeração em Salto Osório -

(Dziedzic[a], 1997)

Tela 13 - Coeficientes de Reação de N, P e algas

Estes dados não são necessários para esta primeira simulação.

Tela 14 - Condições Iniciais Estimadas do Rio

Nesta tela especificam-se as condições iniciais do rio para temperatura, OD e DBO, além de concentrações das substâncias incluídas na modelagem, que não estão sendo simuladas no presente estudo. O sistema utiliza estes dados apenas como uma aproximação inicial. Os dados foram obtidos através das campanhas de coleta de amostras de água, utilizando-se os pontos P01, P03, P07, P13 e P14.

Os dados entre estes pontos foram obtidos através de interpolação, enquanto que o ponto do tramo inicial foi obtido através de uma equação de balanço de massa. O valor de OD foi adotado como sendo igual a 80 % do valor de saturação de oxigênio, obtido através da seguinte expressão (Chapra, 1994):

$$O_s = e^{(-139{,}3441 + \frac{1{,}575701 \times 10^5}{T} - \frac{16{,}642308 \times 10^7}{T^2} + \frac{1{,}243800 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{8{,}621949 \times 10^{11}}{T^4})} \qquad (9.1.6)$$

onde: T = temperatura absoluta (K) da água.

Dados do mês de junho de 1.997:

Tabela 21

- Dados da Campanha de Coleta de Amostras de Junho de 1997 -

	P01	P03	P07	P13	P14
Temperatura	19,00	17,60	19,00	18,00	13,70
DBO	0,90	1,40	0,73	1,08	1,04

Os valores de temperatura do tramo 01 foram obtidos através de uma média ponderada, da seguinte forma:

$T_{tramo\ 01} = [(Q_{tramo\ 13} * T_{tramo\ 13}) - (Q_{P14} * T_{P14})] / Q_{tramo\ 01}$

$T_{tramo\ 01} = [(1.266,199 * 18,00) - (175,8592 * 13,70)] / 1.084,2423$

$T_{tramo\ 01} = 18,799\ °C$

Foi adotado um processo semelhante para a determinação de DBO deste tramo.

Tabela 22

- Dados Utilizados na Tela 14 e Maneira Pela Qual Foram Obtidos -

Tramo	Temperatura (°C)	Observação	Saturação de Oxigênio	OD (mg/l)	DBO (mg/l)
1	18,799	balanço	9,314	7,451	1,093
2	18,739	interpolação	9,326	7,460	1,092
3	18,679	interpolação	9,337	7,470	1,091
4	18,639	interpolação	9,344	7,476	1,090
5	18,559	interpolação	9,360	7,488	1,089
6	18,519	interpolação	9,367	7,494	1,088
7	18,499	interpolação	9,371	7,497	1,088
8	18,479	interpolação	9,375	7,500	1,088
9	18,359	interpolação	9,398	7,518	1,086
10	18,300	interpolação	9,409	7,527	1,085
11	18,240	interpolação	9,421	7,537	1,084
12	18,200	interpolação	9,428	7,543	1,083
13	18,060	interpolação	9,455	7,564	1,081
14	18,000	P13	9,467	7,574	1,080
15	18,061	interpolação	9,455	7,564	1,059
16	18,152	interpolação	9,438	7,550	1,027
17	18,212	interpolação	9,426	7,541	1,006
18	18,318	interpolação	9,406	7,525	0,969
19	18,515	interpolação	9,368	7,494	0,900
20	18,621	interpolação	9,348	7,478	0,863
21	18,712	interpolação	9,331	7,464	0,831
22	18,758	interpolação	9,322	7,458	0,815
23	18,864	interpolação	9,302	7,442	0,778
24	19,000	P7	9,276	7,421	0,730
25	18,744	interpolação	9,325	7,460	0,853
26	18,546	interpolação	9,362	7,490	0,947
27	18,468	interpolação	9,377	7,502	0,985
28	18,211	interpolação	9,426	7,541	1,107
29	17,994	interpolação	9,468	7,575	1,211
30	17,837	interpolação	9,499	7,599	1,287
31	17,600	P3	9,545	7,636	1,400
32	19,000	P1	9,276	7,421	0,900
33	19,000	P1	9,276	7,421	0,900

Tela 15 - Vazões Incrementais por Tramo

Estas vazões são consideradas uniformemente distribuídas ao longo do tramo, sendo compostas basicamente de escoamento subterrâneo ou superficial ao longo do tempo. Os valores de temperatura e OD adotados são os mesmos das condições iniciais (tela 14 do QUAL2E). Como o valor da carga orgânica já está sendo computado nos afluentes, este dado permanece com valor zero.

O valor da vazão incremental foi obtido através da vazão em Salto Caxias, distância entre os tramos e um coeficiente de proporcionalidade:

- Determinação do Coeficiente de Proporcionalidade:

área de drenagem em Salto Caxias = 57.000 km^2 .....(a)

área de drenagem em Salto Osório = 45.800 km^2 .....(b)

área de drenagem dos afluentes = 385 km^2 (Tormenta)
508 km^2 (Adelaide)
629 km^2 (Jaracatiá)
1.315 km^2 (Guarani)
7.431 km^2 (Chopim)
63 km^2 (Rio dos Micos)
98 km^2 (Rio Perdido)
18 km^2 (Córrego Luciana)
10.447 km^2 (total).....(c)

distância entre Salto Osório e Salto Caxias = 94.800 m.....(d)

área de drenagem a ser considerada = (a)-(b)-(c) = 753 km^2.....(e)

Coeficiente de Proporcionalidade = (e) / (d) = 0,00794304

Exemplos de cálculo da vazão incremental:

Tramo 31:

vazão no tramo 31 = vazão em Salto Caxias = 1.348,94 m^3/s (dado utilizado para fins de exemplo)

Tramo 30:

vazão no tramo 30 = vazão no tramo 31 - vazão dos afluentes - vazão incremental

- vazão incremental:
  - distância entre o tramo 31 e o tramo 30 = 5.600 m
  - área de drenagem corrigida = coef. de proporcionalidade*distância
    = 0.00794304 * 5.600 = 44,4810 km^2
  - área de drenagem total = 57.000 - 44,4810 = 56.955,52 km^2
  - vazão específica = vazão em Salto Caxias / área de drenagem em Salto Caxias
    = 1.348,94 / 57.000 = 0.02366561 $m^3/s.km2$
  - vazão incremental = 44,4810 * 0,02366561 = 1,0527 m^3/s
- vazão dos afluentes:
  - afluente existente entre os dois tramos = Córrego Luciana
  - vazão adotada = área de drenagem do afluente * vazão específica
    = 0.02366561 * 18 = 0.426 m^3/s
- vazão no tramo 30 = 1.348,94 - 1,0527 - 0,426 = 1.347,4613 m^3/s

Tabela 23

- Cálculo da Vazão Incremental (Tela 15 do QUAL2E) -

Tramo	Área de Dren. Incremental	Junho - Final			
		Vazão (m3/s)	V. Incremental	V. Afluente	Total
1	45.815,092	1.084,242	0,357		1.084,242
2	45.823,829	1.084,449	0,207		1.084,449
3	45.831,772	1.084,637	0,188		1.084,637
4	45.847,658	1.085,013	0,376		1.085,013
5	45.855,601	1.085,201	0,188		1.085,201
6	45.861,559	1.085,342	0,141		1.085,342
7	45.863,544	1.085,389	0,047	175,859	1.261,248
8	45.887,373	1.085,953	0,564		1.261,812
9	45.899,288	1.086,235	0,282		1.262,094
10	45.911,203	1.086,517	0,282	2,319	1.264,695
11	45.921,528	1.086,761	0,244		1.264,940
12	45.947,741	1.087,381	0,620		1.265,560
13	45.958,861	1.087,645	0,263		1.265,823
14	45.974,747	1.088,021	0,376		1.266,199
15	45.998,576	1.088,585	0,564		1.266,763
16	46.005,367	1.088,745	0,161		1.266,924
17	46.043,851	1.089,656	0,911	31,120	1.298,955
18	46.095,481	1.090,878	1,222		1.300,177
19	46.124,870	1.091,573	0,696		1.300,872
20	46.147,905	1.092,119	0,545		1.301,417
21	46.154,339	1.092,271	0,152	1,491	1.303,060
22	46.190,797	1.093,134	0,863	14,886	1.318,809
23	46.227,335	1.093,998	0,865		1.319,674
24	46.280,554	1.095,258	1,259		1.320,933
25	46.312,723	1.096,019	0,761		1.321,694
26	46.334,169	1.096,527	0,508	12,022	1.334,224
27	46.387,785	1.097,795	1,269	9,111	1.344,604
28	46.428,294	1.098,754	0,959		1.345,563
29	46.463,244	1.099,581	0,827		1.346,390
30	46.508,519	1.100,653	1,071		1.347,461
31	46.553,000	1.101,705	1,053	0,426	1.348,940
32	46.560,943	1.101,893	0,191		1.349,128
33	46.624,487	1.103,397	1,531	19,808	1.370,440

Tela 16 - Dados das Cabeceiras dos Rios

As "cabeceiras" devem ser interpretadas como sendo as extremidades de montante dos trechos de rios modelados. Nesta simulação existe apenas um elemento de cabeceira, uma vez que nenhum dos afluentes está sendo simulado.

Vazão: 1.084, 242 m3/s (tramo 01 - SCAX32-SCAX33)

Temperatura: 18,799 °C

OD: 7,451 mg/l

DBO: 1,093 mg/l

Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes

Aqui são especificadas, além das vazões efluentes, as cargas pontuais afluentes, incluindo vazão, percentual de tratamento, OD, DBO e as concentrações de substâncias sendo modeladas. Os valores das cargas de DBO são aqueles obtidos através do cálculo de esgoto doméstico e industrial.

Por exemplo, a carga de DBO (mg/l) para o rio dos Micos foi obtida da seguinte forma:

Carga de DBO (kg/dia) = 64,3751 kg/dia (ver tabela 16)

Vazão no rio dos Micos, junho de 1997 = 1,4909 m^3/s

Carga (mg/l) = 64,3751/1,4909 * (1/86.400) * (1/1.000) * (1.000 * 1.000) = 0,4997 mg/l

É importante notar que a maioria dos afluentes possuem cargas oriundas de diversos pontos, sendo necessária a soma de todas estas cargas antes de fazer a divisão pela vazão do rio correspondente.

Tabela 24

- Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes -

Tramo	N.° do Elemento	Tipo de Elemento	Nome do Afluente	% de Tratamento	Vazão (m3/s)	Temperatura °C	OD mg/l	DBO na foz mg/l
7	1	P	Chopim	0,0	175,859	13,7	8,299	0,4743
10	3	P	Perdido	0,0	2,319	14.0	8,245	0.4403
17	1	P	Guarani	0,0	31,120	15,4	7,998	0,2369
21	3	P	Micos	0,0	1,491	13,5	8,336	0,4997
22	1	P	Jaracatiá	0,0	14,886	14,3	8,191	0,5966
26	1	P	Adelaide	0,0	12,022	16,8	7,764	0.4496
27	1	P	Tormenta	0,0	9,111	15,9	7,913	0,2982
31	5	P	Luciana	0,0	0,426	13,0	8,429	0.1351
33	1	P	Cotejipe	0,0	19,666	16,2	7,833	0,4023
33	7	P	dos Porcos	0,0	0,142	12.0	8.622	0.2031

Tela 18 - Reaeração devido a estruturas hidráulicas

Nesta tela são fornecidas as características de estruturas hidráulicas existentes nos tramos simulados. Esta opção não foi utilizada.

Tela 19 - Concentrações na extremidade de jusante

Nesta tela são fornecidos valores de concentração conhecidas das substâncias sendo modeladas para a extremidade de jusante do modelo. A princípio esta opção não será utilizada.

Tela 20 - Parâmetros climatológicos globais

Nesta tela podem ser fornecidos valores globais para as variáveis climatológicas, ou seja, valores constantes para o período de simulação para todos os tramos do sistema. Valores diferentes para cada tramo podem ser especificados na tela 11 (valores fornecidos pelo IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná).

Tela 21 - Definição do tipo de análise de incerteza

Nesta tela define-se o tipo de análise de incerteza que se deseja efetuar:

- análise de sensibilidade;
- análise de erro de primeira ordem;
- simulação de Monte Carlo.

Tela 22 - Definição de variáveis e níveis de perturbação

As variáveis para as quais deve ser efetuada análise de sensibilidade e os respectivos níveis de perturbação devem ser especificados nesta tela.

Tela 23 - Definição de coeficientes de variação e funções de distribuição de probabilidades

Especificam-se aqui as variáveis para as quais deve ser efetuada análise de erro de primeira ordem ou simulação de Monte Carlo, e os respectivos níveis de perturbação e funções distribuição de probabilidades.

Tela 24 - Definição de elementos para visualização de resultados

Escolha de elementos computacionais para visualização de resultados.

9 . 1 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de temperatura, OD e DBO obtidos nas campanhas de coleta encontram-se nas tabelas 25, 26 e 27 seguintes.

Tabela 25

- Dados das campanhas de coleta → Temperatura -

Ano	Mês	Vazão (m3/s)	Temperatura (° C)			
			P1	P3	P7	P13
1.997	Fevereiro	4.061,37	24,0	24,2	23,0	24,8
	Março	2.175,93	26,2	24,9	24,3	26,0
	Abril	1.227,20	25,0	24,3	24,1	23,5
	Maio	827,53	24,5	23,1	23,3	22,3
	Junho	1.082,15	19,0	17,6	19,0	18,0
	Julho	1.774,01	18,0	17,8	18,3	18,0
	Agosto	4.624,81	17,1	17,8	16,0	17,7
	Setembro	1.738,84	19,2	18,5	18,1	18,5
	Outubro	3.462,22	20,0	19,5	19,7	18,8
	Novembro	5.060,78	21,0	21,3	20,8	20,8
	Dezembro	2.528,61	23,5	22,5	23,2	23,0
1.998	Janeiro	2.561,48	26,5	24,1	24,6	24,2
	Fevereiro	3.512,70	25,5	-	24,8	-

Tabela 26

- Dados das campanhas de coleta → OD -

Ano	Mês	OD (mg/l)			
		P1	P3	P7	P13
1.997	Fevereiro	8,9	7,6	7,9	8,0
	Março	7,5	6,8	7,2	7,3
	Abril	8,2	6,8	6,9	6,9
	Maio	8,3	7,3	7,6	7,5
	Junho	9,3	8,5	8,2	8,1
	Julho	9,1	8,4	8,3	8,4
	Agosto	8,1	8,7	8,3	9,2
	Setembro	8,8	7,8	8,3	8,0
	Outubro	9,5	7,7	8,3	8,6
	Novembro	8,7	7,8	8,3	8,1
	Dezembro	8,3	7,6	8,0	7,7
1.998	Janeiro	7,7	7,7	7,9	7,7
	Fevereiro	8,0	-	7,6	-

Tabela 27

- Dados das campanhas de coleta → DBO -

Ano	Mês	DBO (mg/l)			
		P1	P3	P7	P13
1.997	Junho	0,90	1,40	0,73	1,08
	Julho	-	-	-	-
	Agosto	-	-	-	-
	Setembro	-	-	-	-
	Outubro	3,70	3,30	1,00	1,70
	Novembro	-	-	-	-
	Dezembro	-	-	-	-
1.998	Janeiro	1,0	1,10	1,00	1,00
	Fevereiro	-	-	-	-

Como pode ser observado na tabela 27 apenas os meses de junho/97, outubro/97 e janeiro/98 apresentam dados da demanda bioquímica de oxigênio. O valor da DBO para comparação com os resultados do modelo para os outros meses foi determinado proporcionalmente, em função da vazão. Para isto, foram usados os valores de DBO de junho/97.

Nos gráficos encontram-se registrados, além do valor da DBO calculado com base nos dados de junho/97, também os valores de DBO calculados proporcionalmente com base nos valores de outubro/97 (para valores de vazão superiores a Q = 2.000,00 m^3/s). Os dois valores, como pode ser observado, são significativamente diferentes. Como o mês de junho foi um mês de vazão baixa (1.082,15 m^3/s), uma das possíveis causas desta diferença é a existência, no mês de outubro (vazão de 3.462,22 m^3/s), de carga difusa, isto é, aquela decorrente do escoamento superficial, enquanto que no mês de junho a carga pode ser considerada predominantemente decorrente do lançamento de esgoto nos cursos de água.

Nas figuras 20 a 71 encontram-se os dados de vazão (gráficos distância x vazão), temperatura (gráficos distância x temperatura), oxigênio dissolvido (gráficos distância x oxigênio dissolvido), e demanda bioquímica de oxigênio (gráficos demanda bioquímica de oxigênio x distância) obtidos para os diversos meses simulados.

Observações: com relação aos dados de temperatura e oxigênio dissolvido, o mês de fevereiro/98 não possui dados para os pontos 03 e 13.

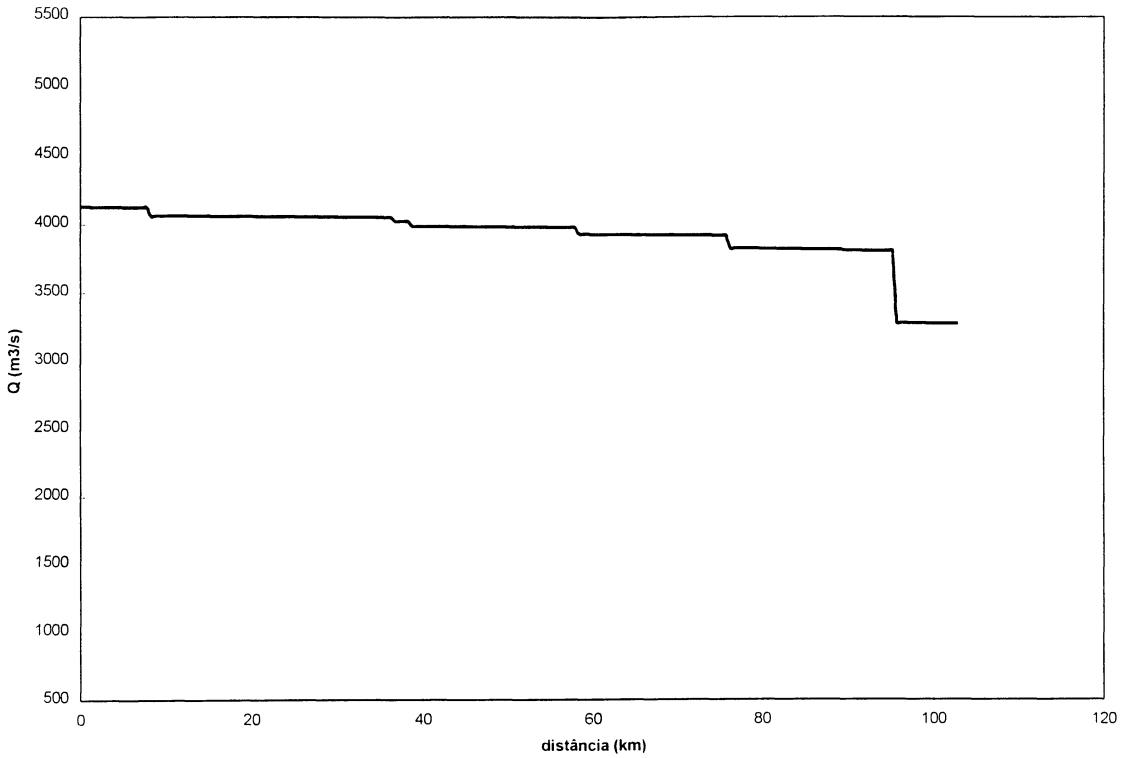


Figura 20

- Gráfico Vazão x Distância (Fevereiro/1997) -

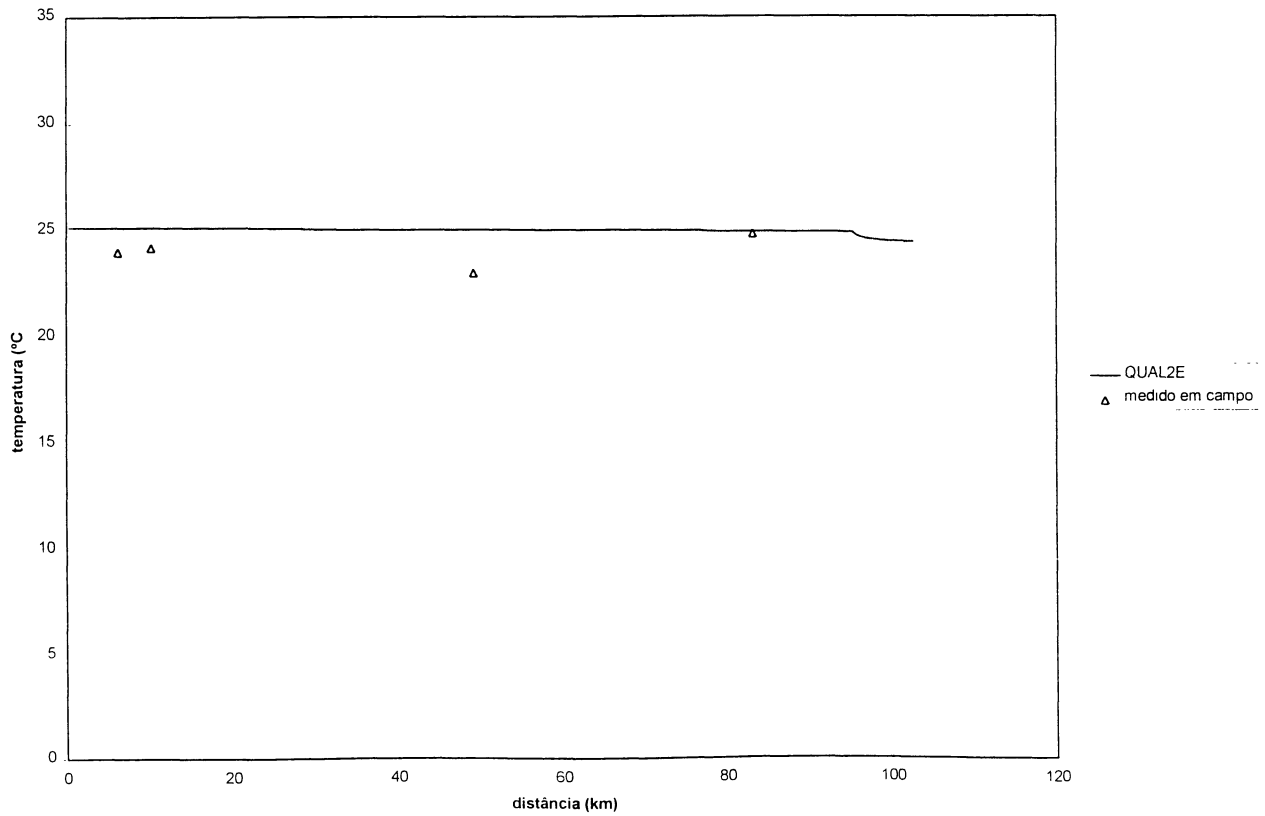


Figura 21

- Gráfico Temperatura x Distância (Fevereiro/1997) -

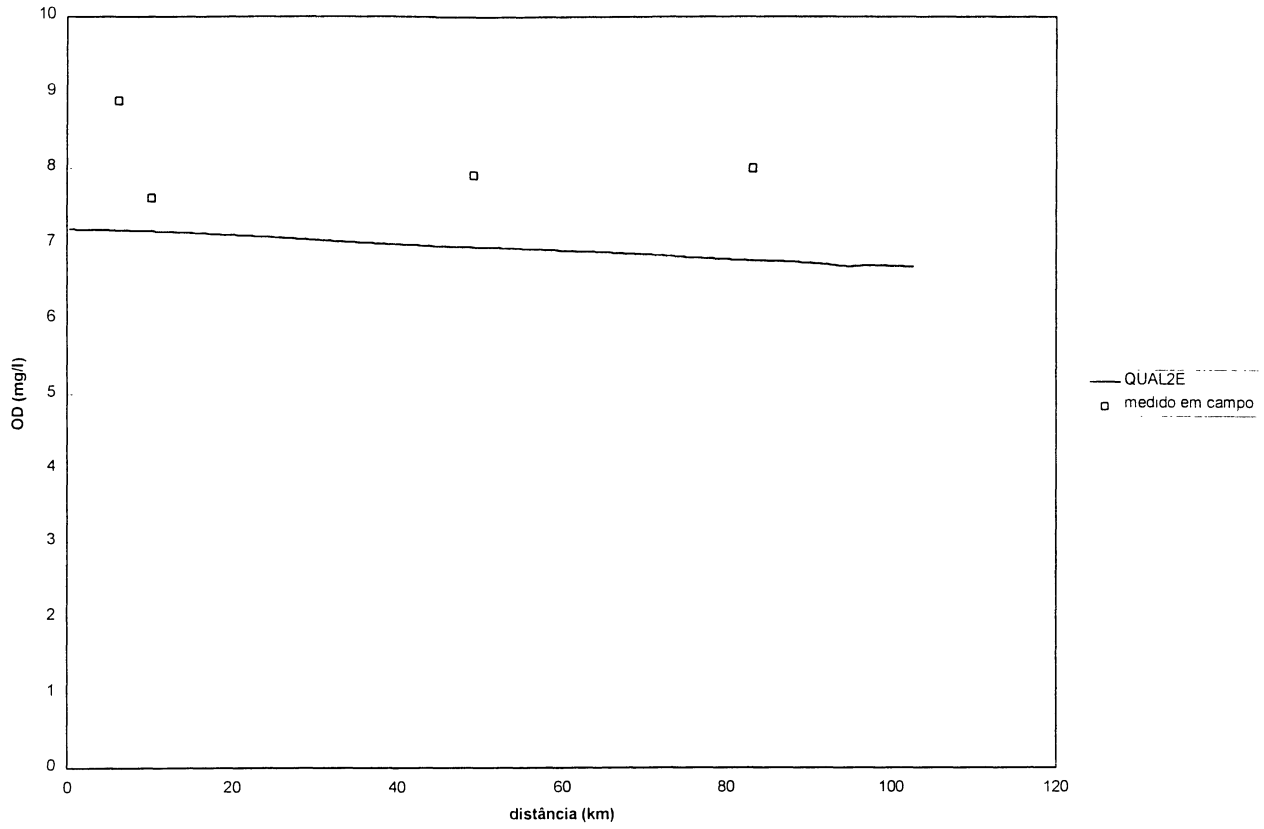


Figura 22

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Fevereiro/1997) -

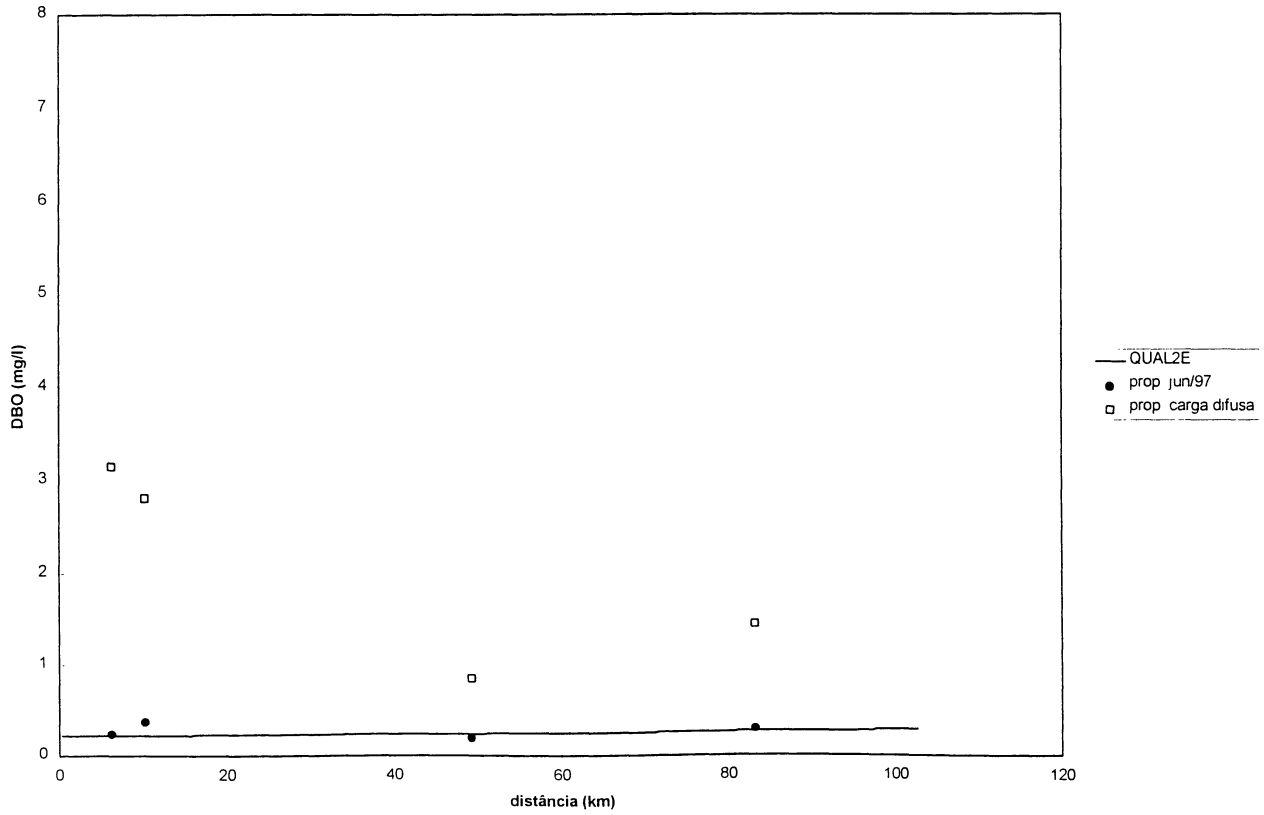


Figura 23

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Fevereiro/1997) -

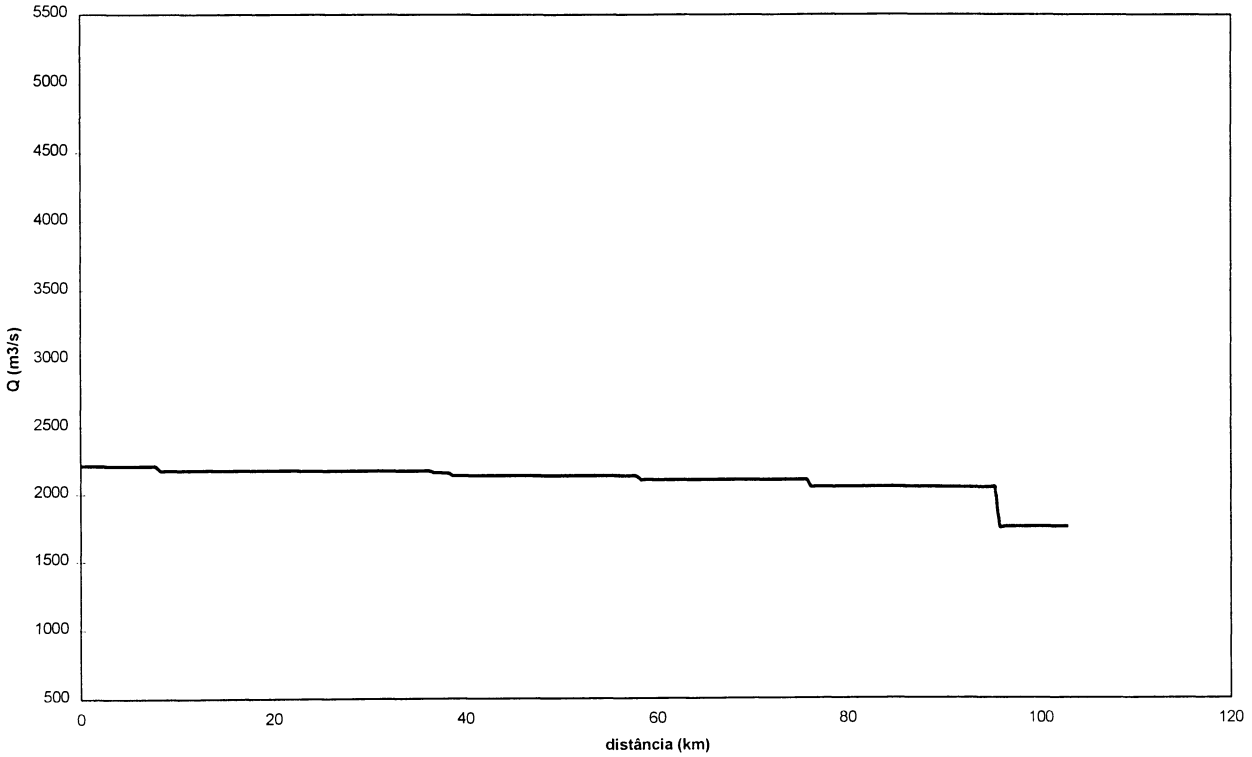


Figura 24

- Gráfico Vazão x Distância (Março/1997) -

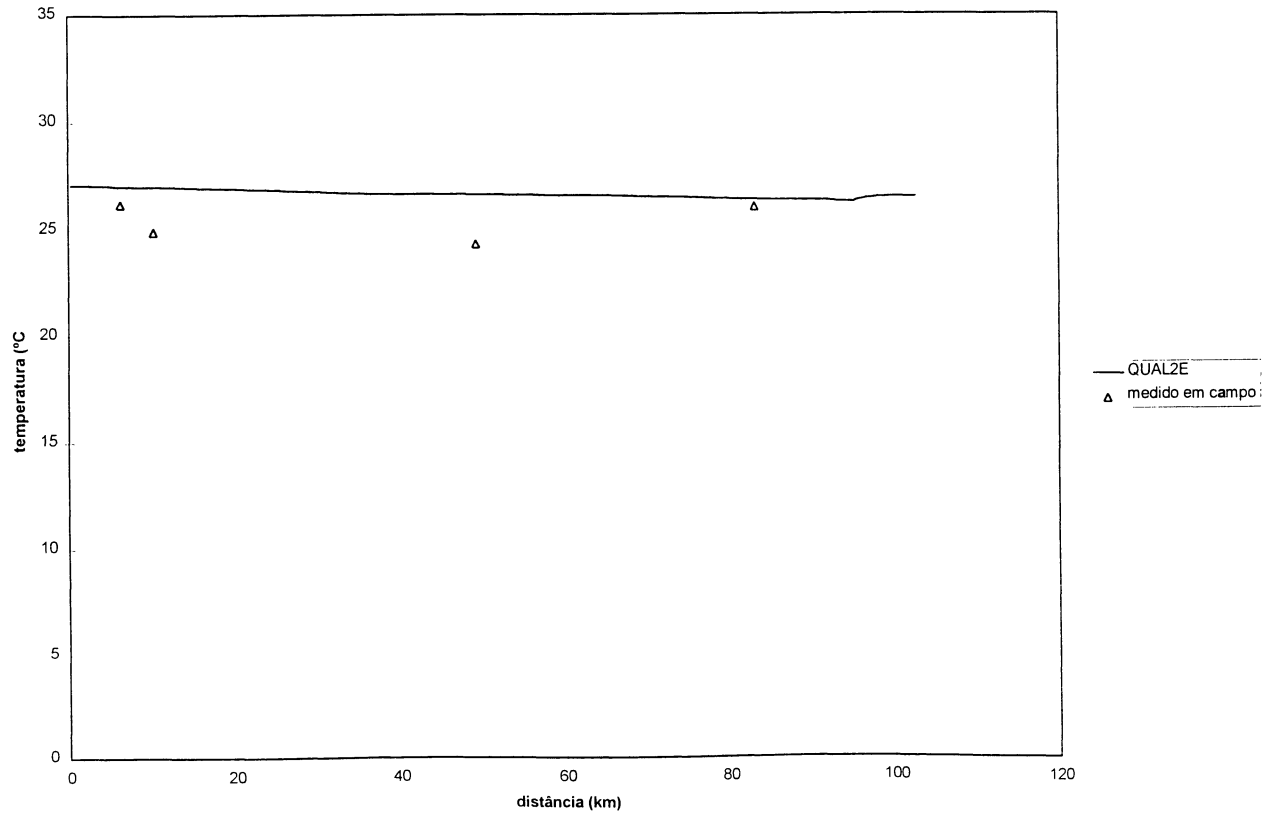


Figura 25

- Gráfico Temperatura x Distância (Março/1997) -

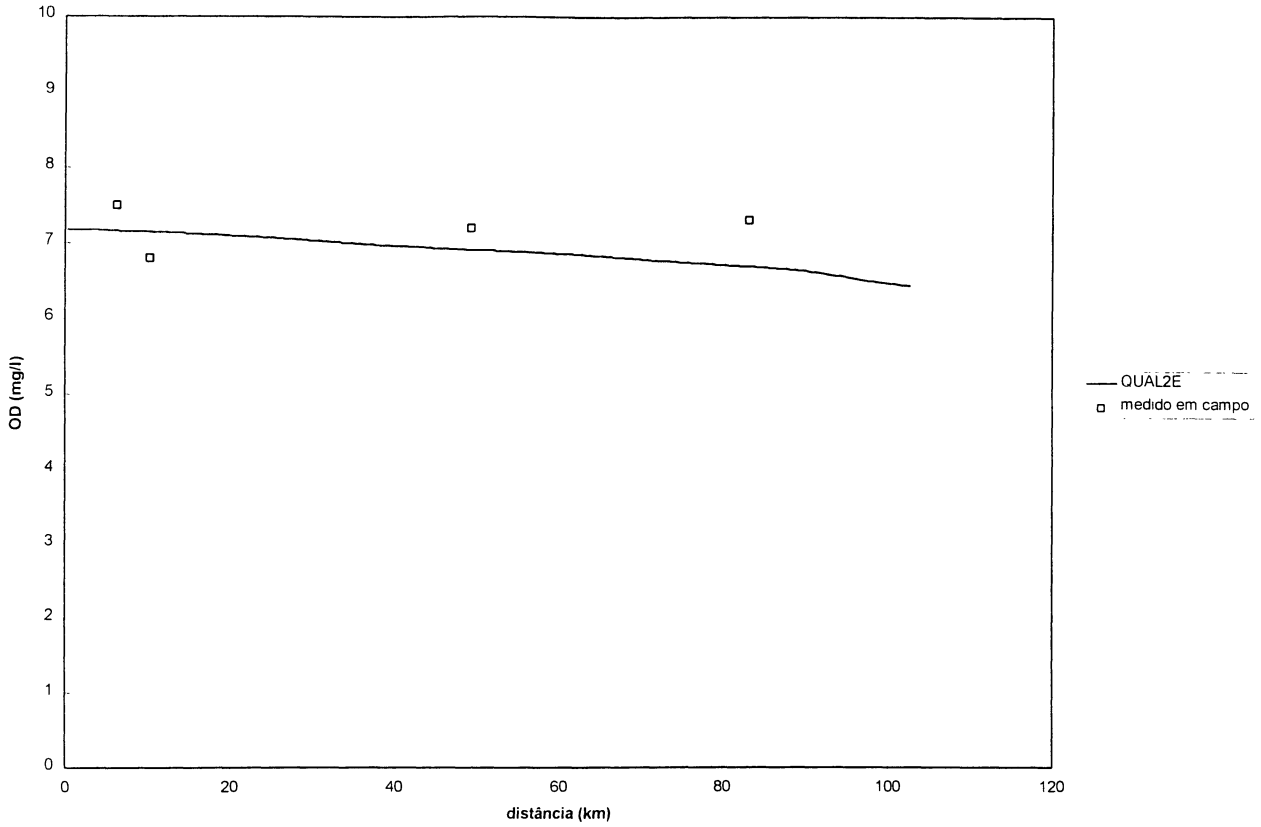


Figura 26

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Março/1997) -

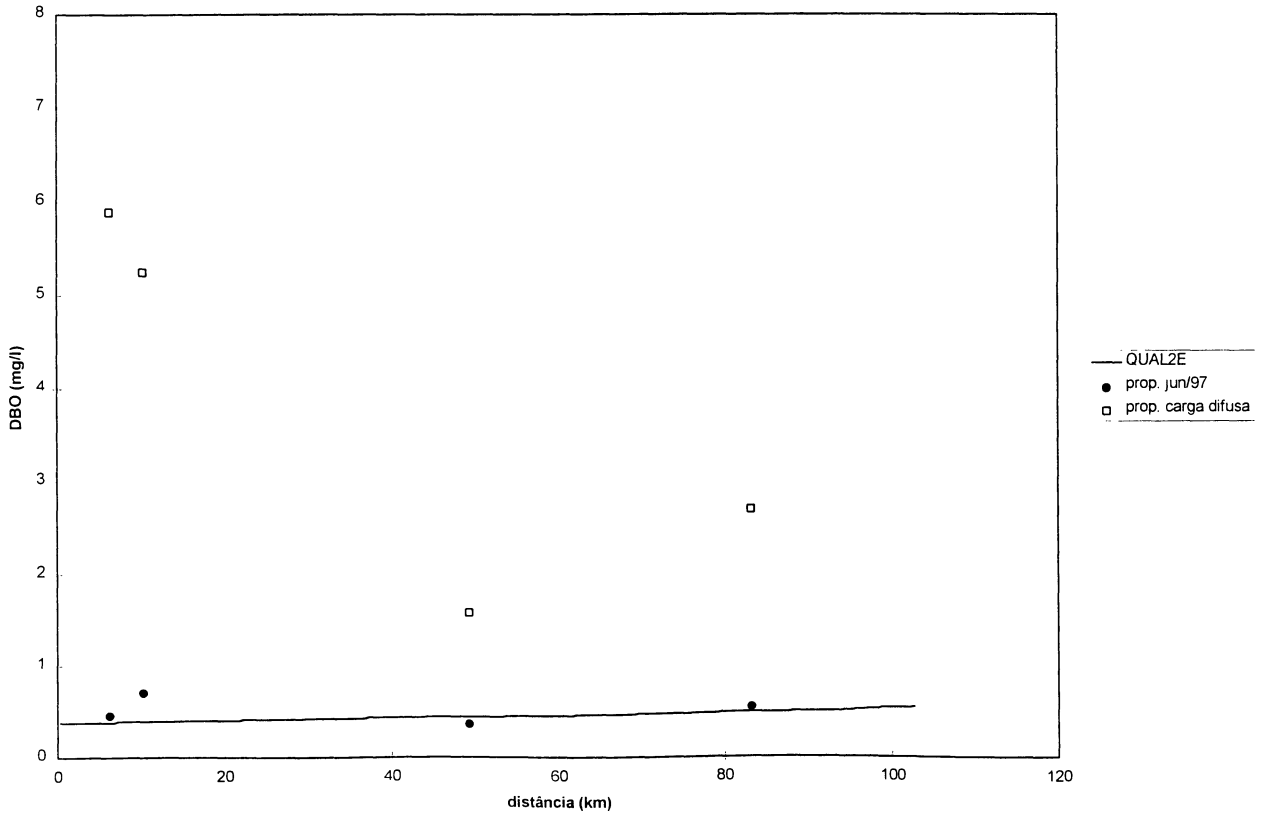


Figura 27

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Março/1997) -

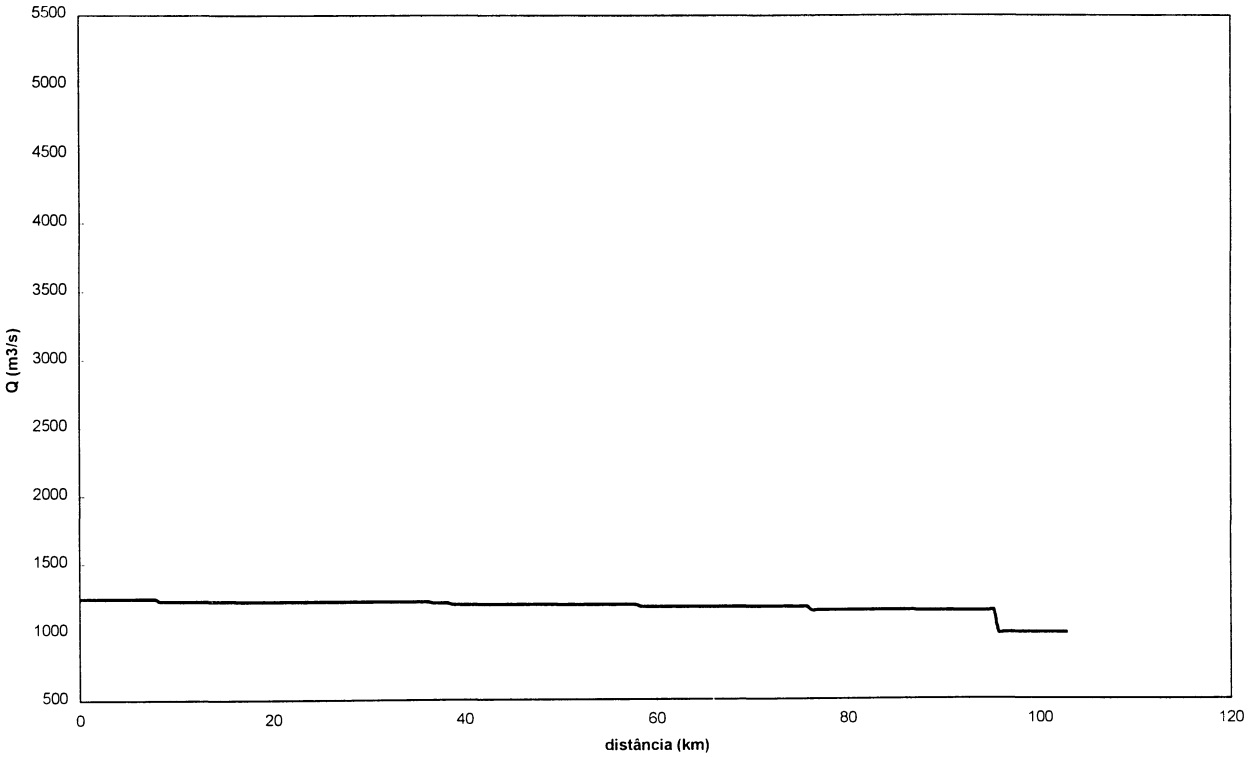


Figura 28

- Gráfico Vazão x Distância (Abril/1997) -

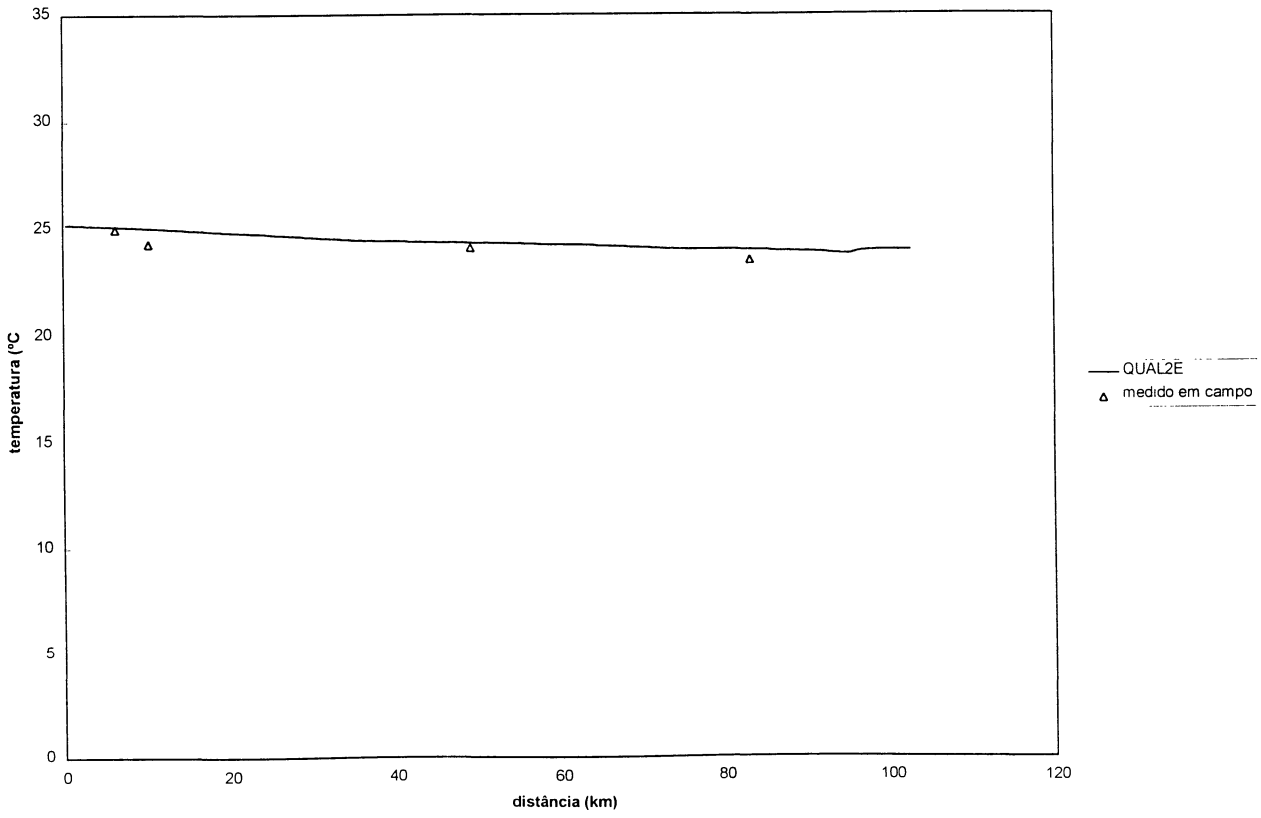


Figura 29

- Gráfico Temperatura x Distância (Abril/1997) -

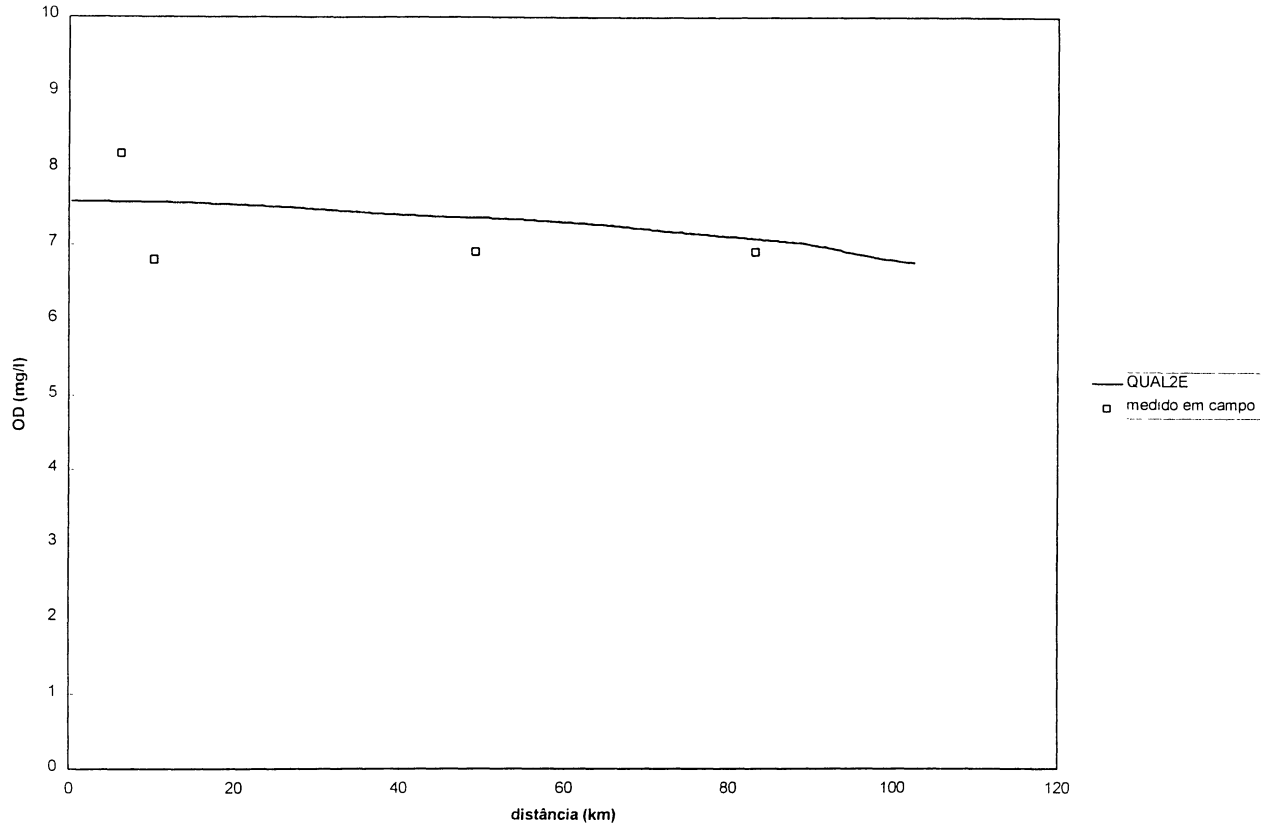


Figura 30

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Abril/1997) -

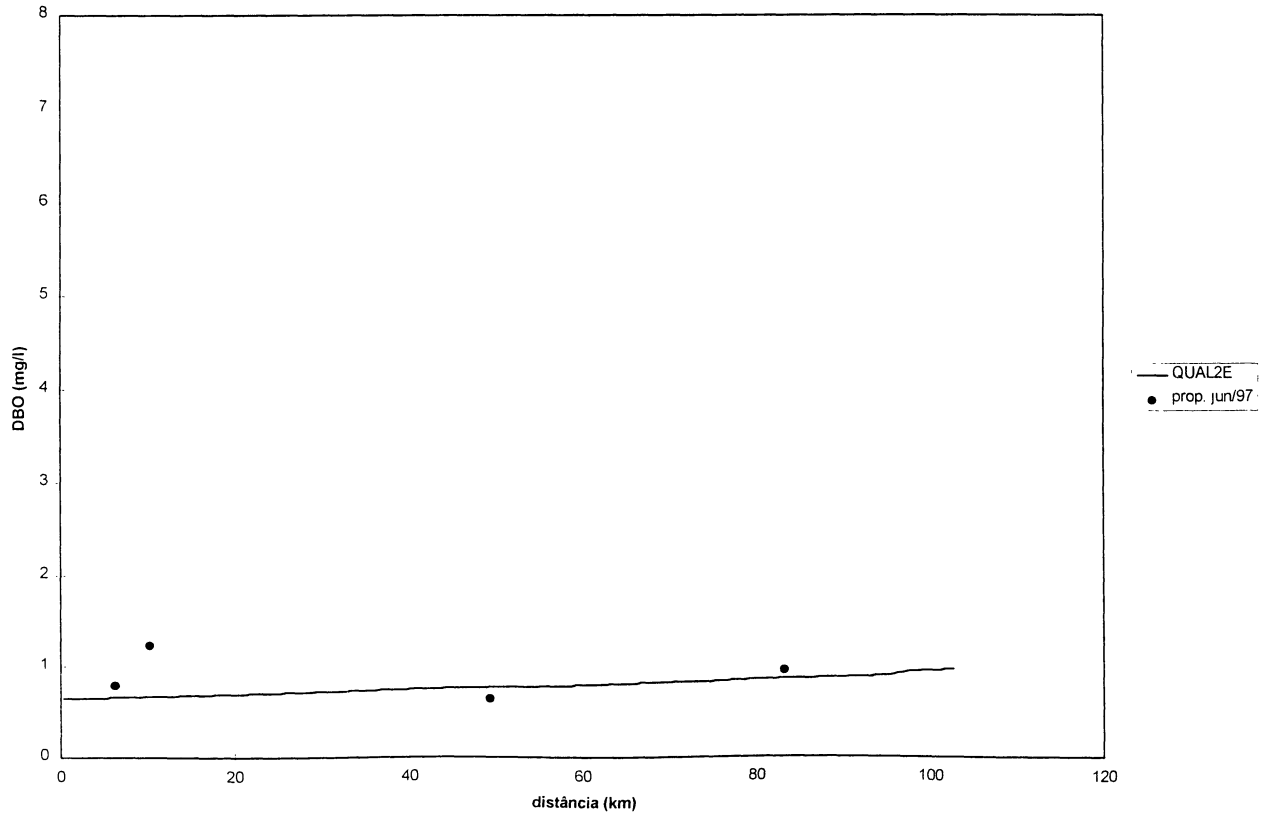


Figura 31

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Abril/1997) -

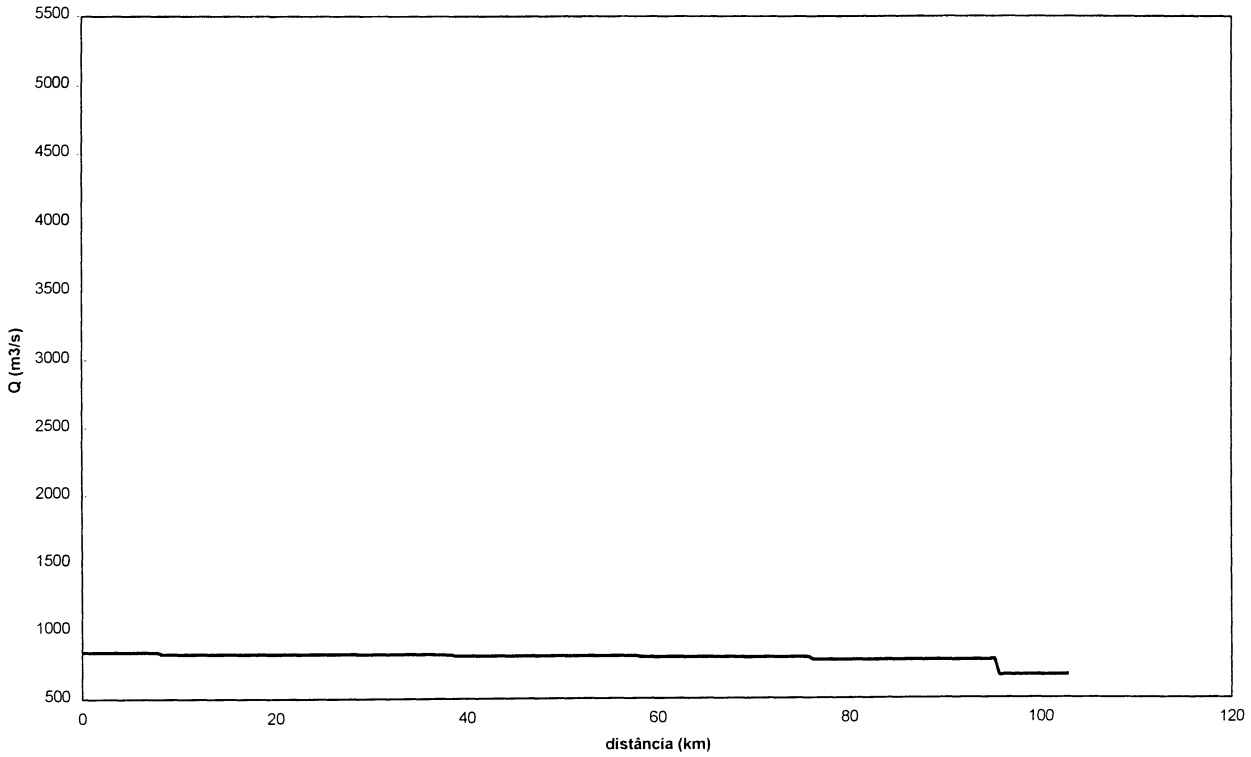


Figura 32

- Gráfico Vazão x Distância (Maio/1997) -

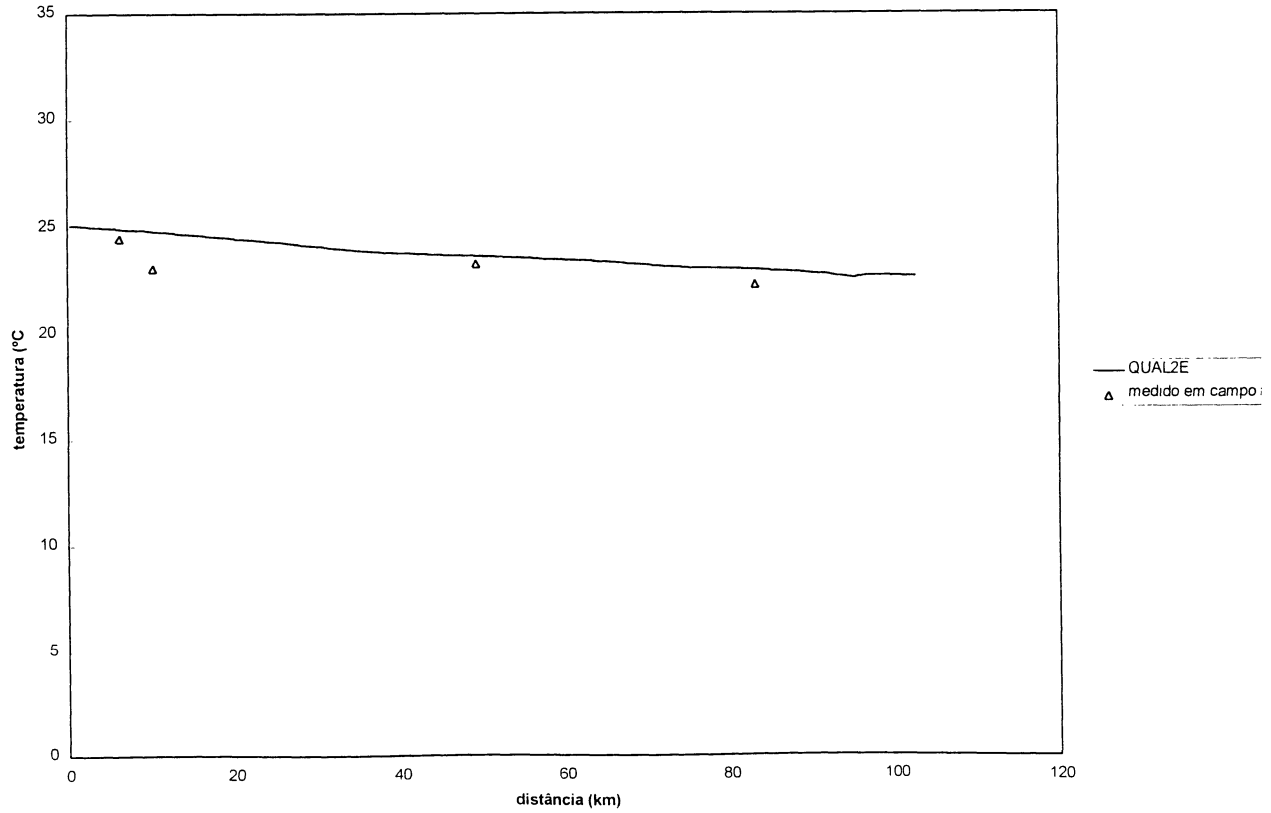


Figura 33

- Gráfico Temperatura x Distância (Maio/1997) -

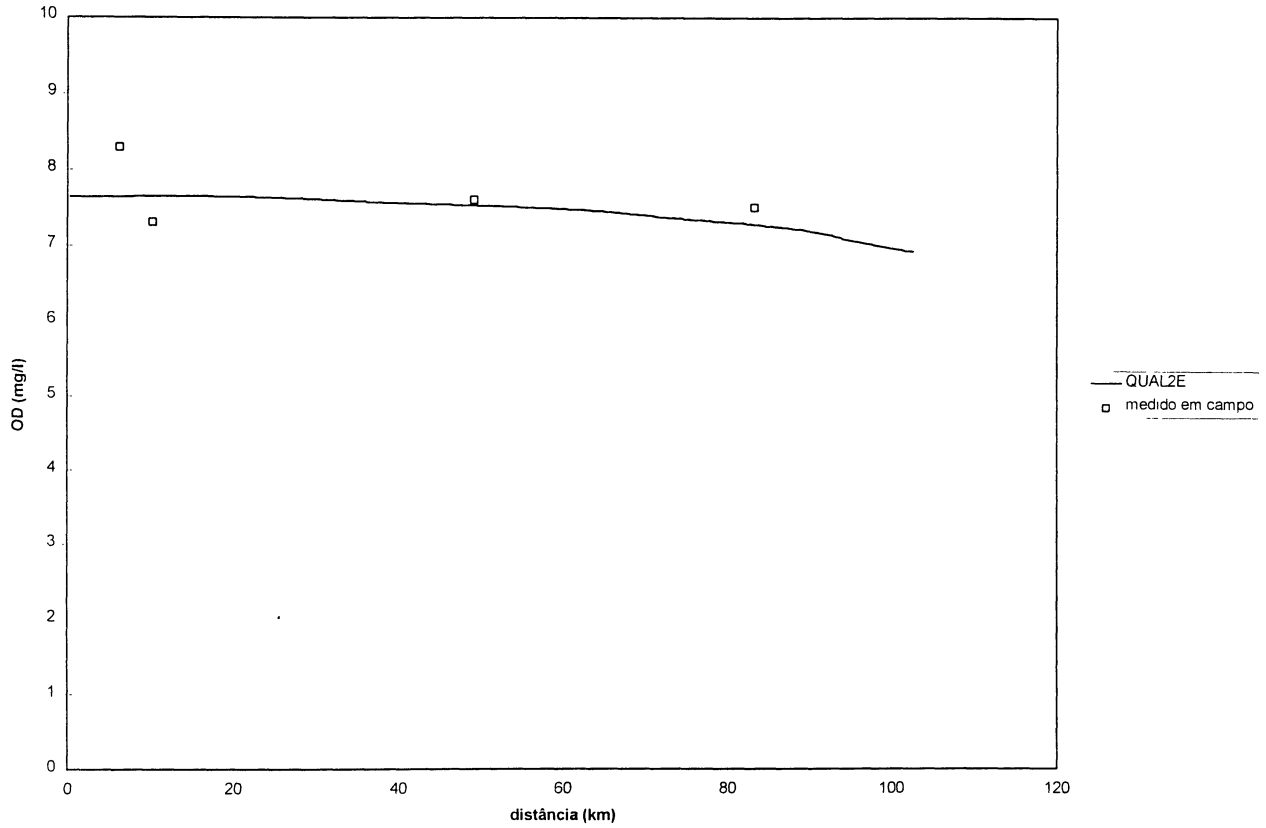


Figura 34

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Maio/1997) -

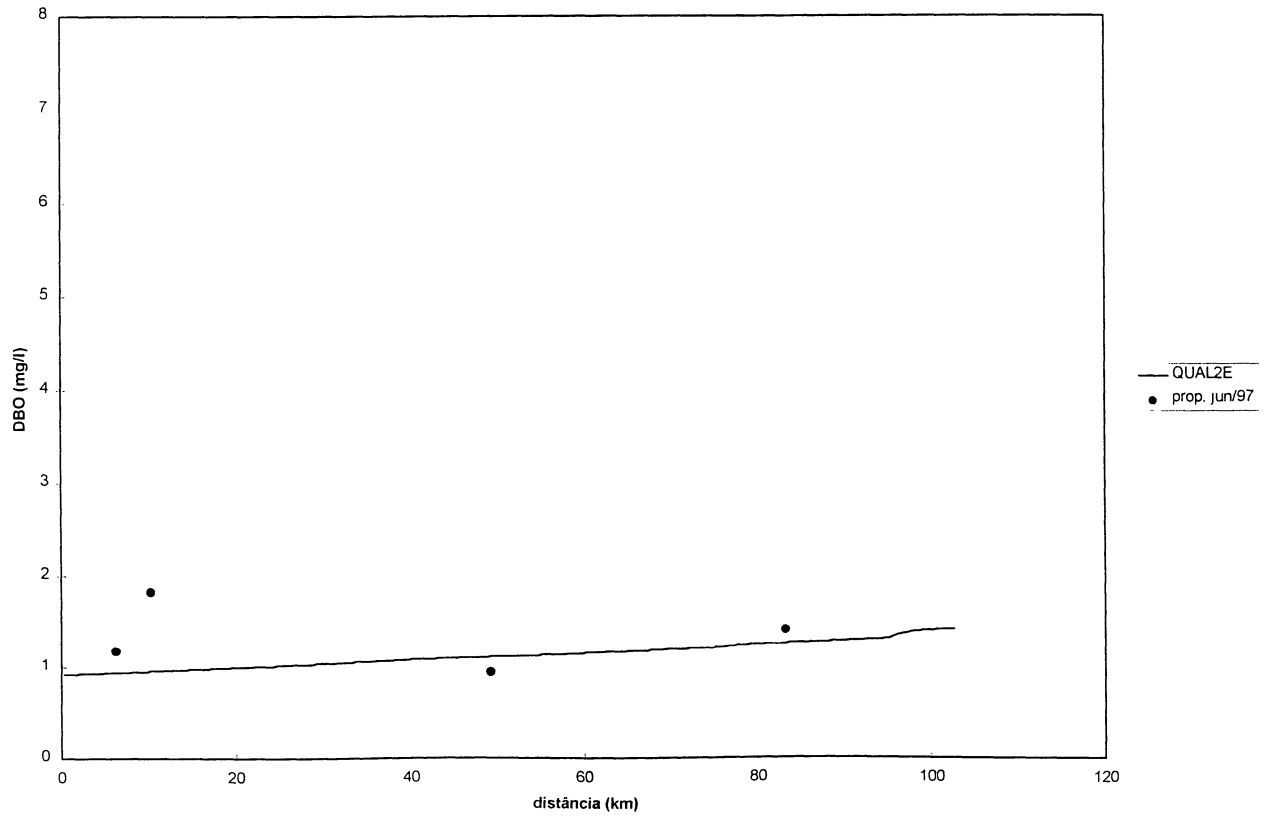


Figura 35

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Maio/1997) -

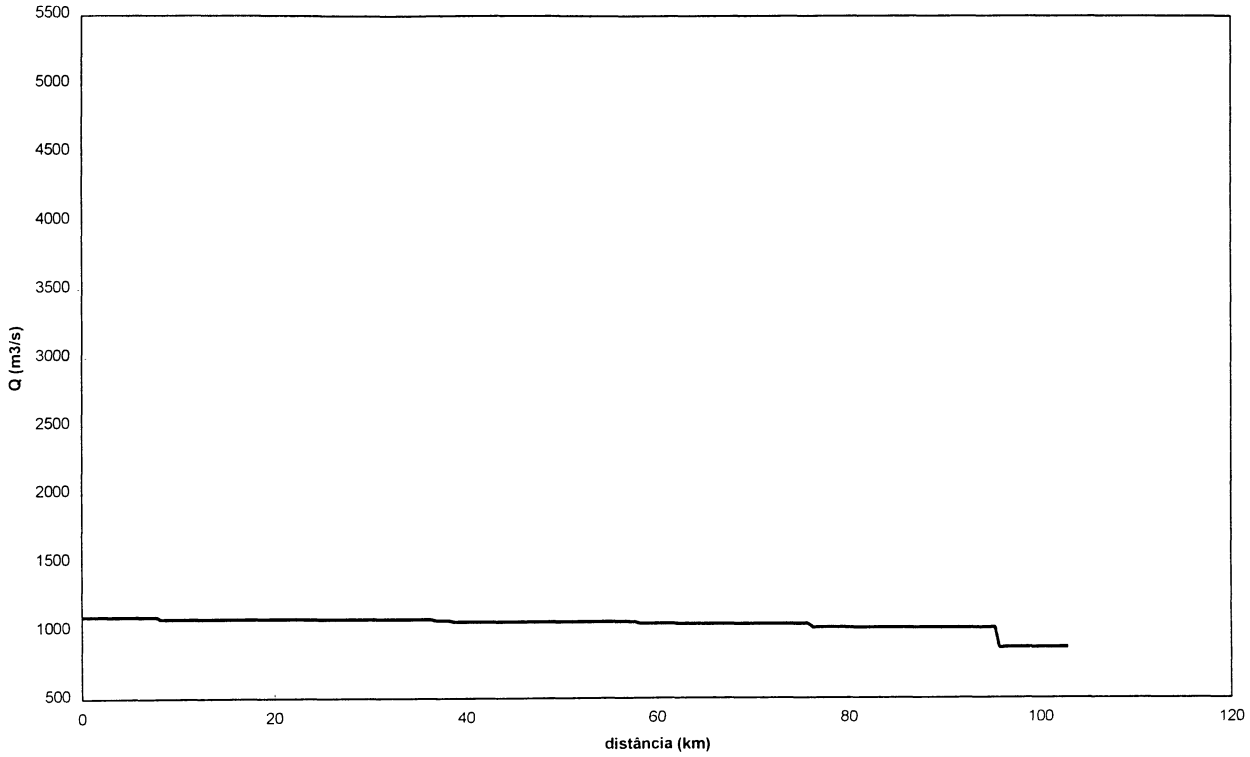


Figura 36

- Gráfico Vazão x Distância (Junho/1997) -

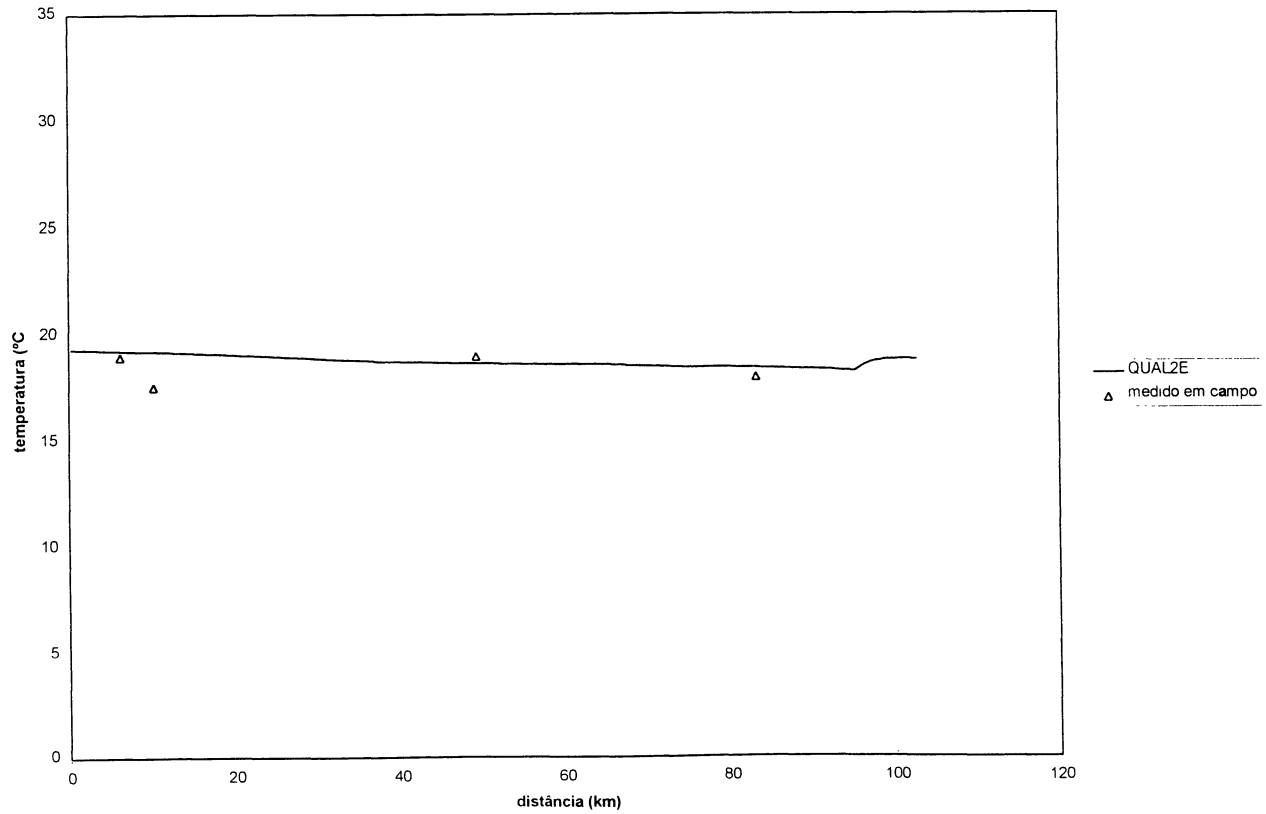


Figura 37

- Gráfico Temperatura x Distância (Junho/1997) -

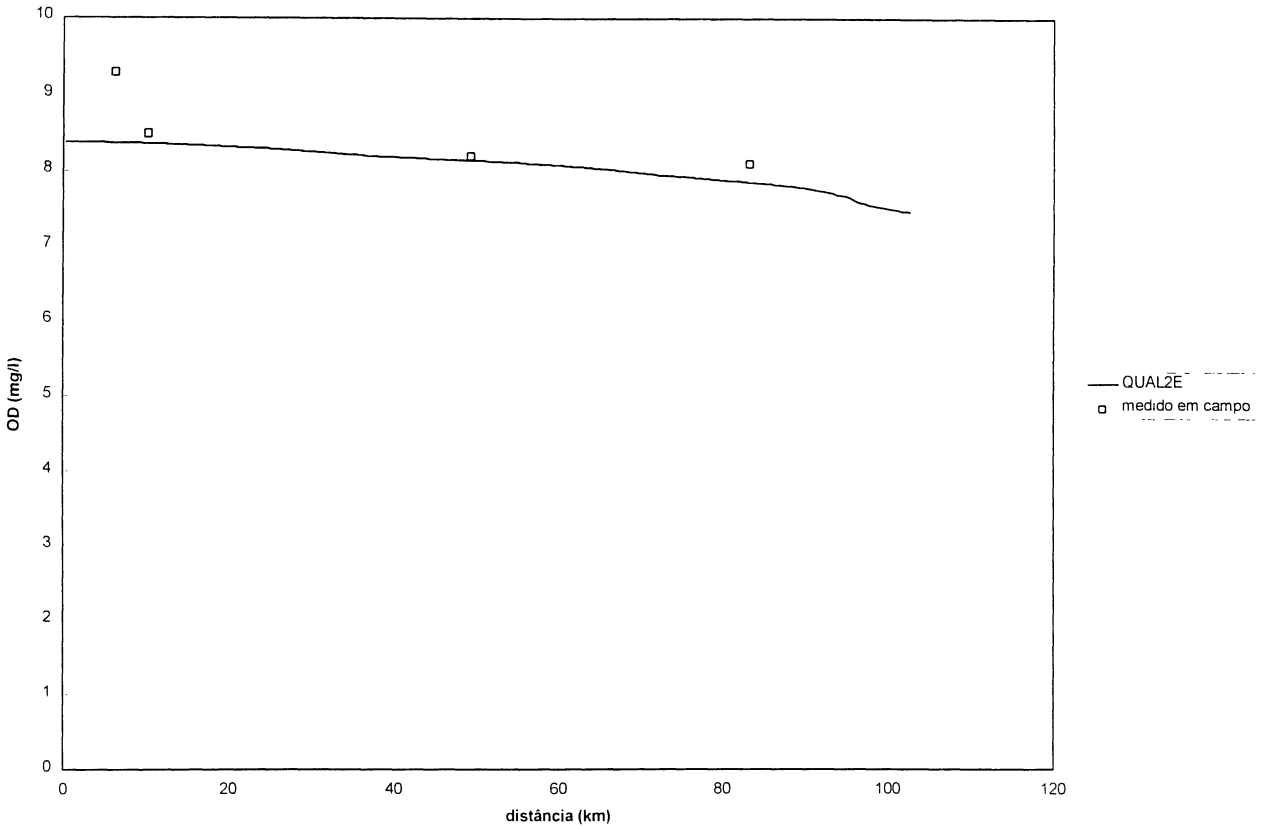


Figura 38

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Junho/1997) -

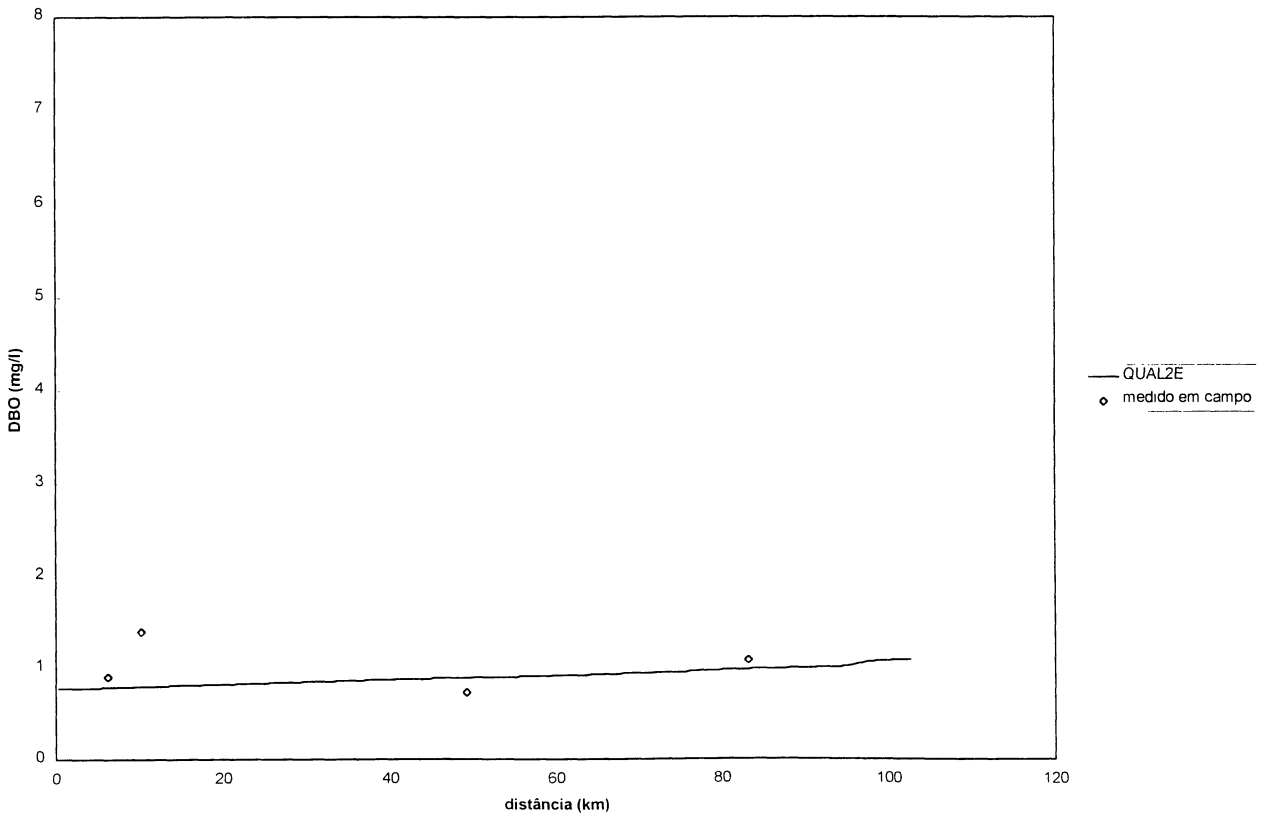


Figura 39

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Junho/1997) -

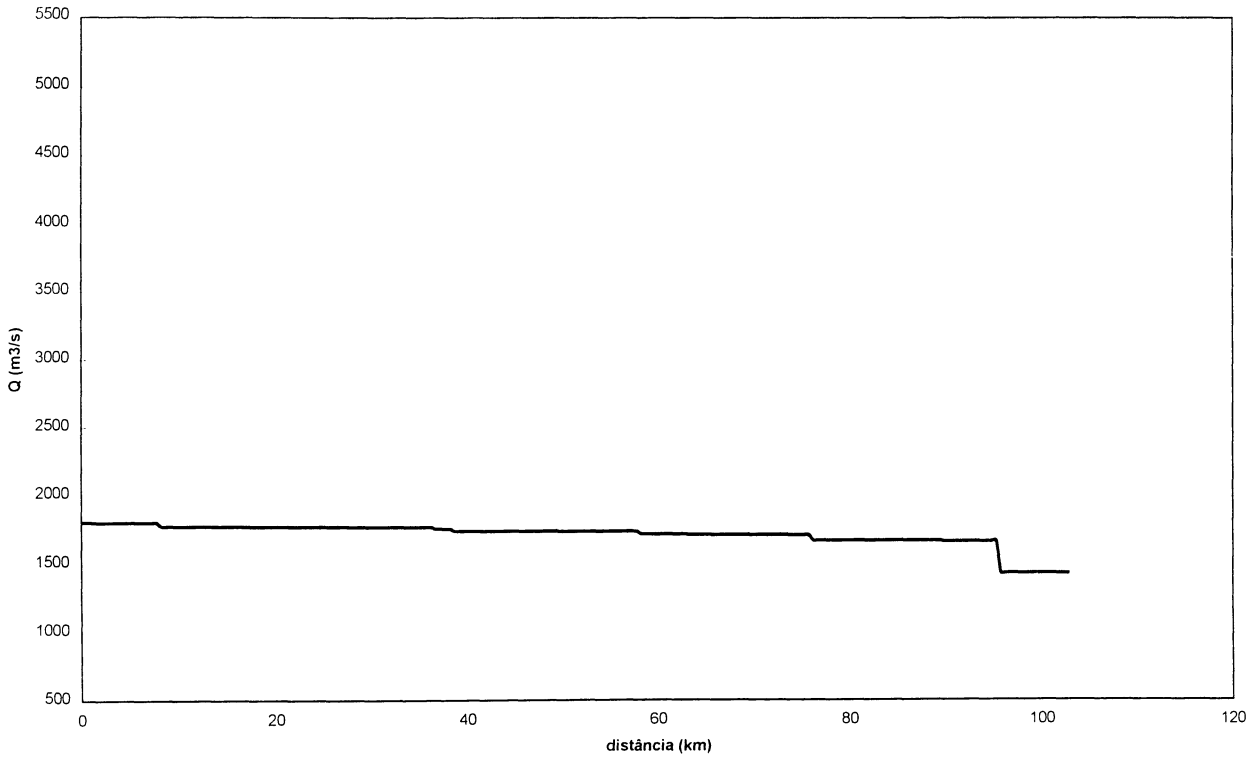


Figura 40

- Gráfico Vazão x Distância (Julho/1997) -

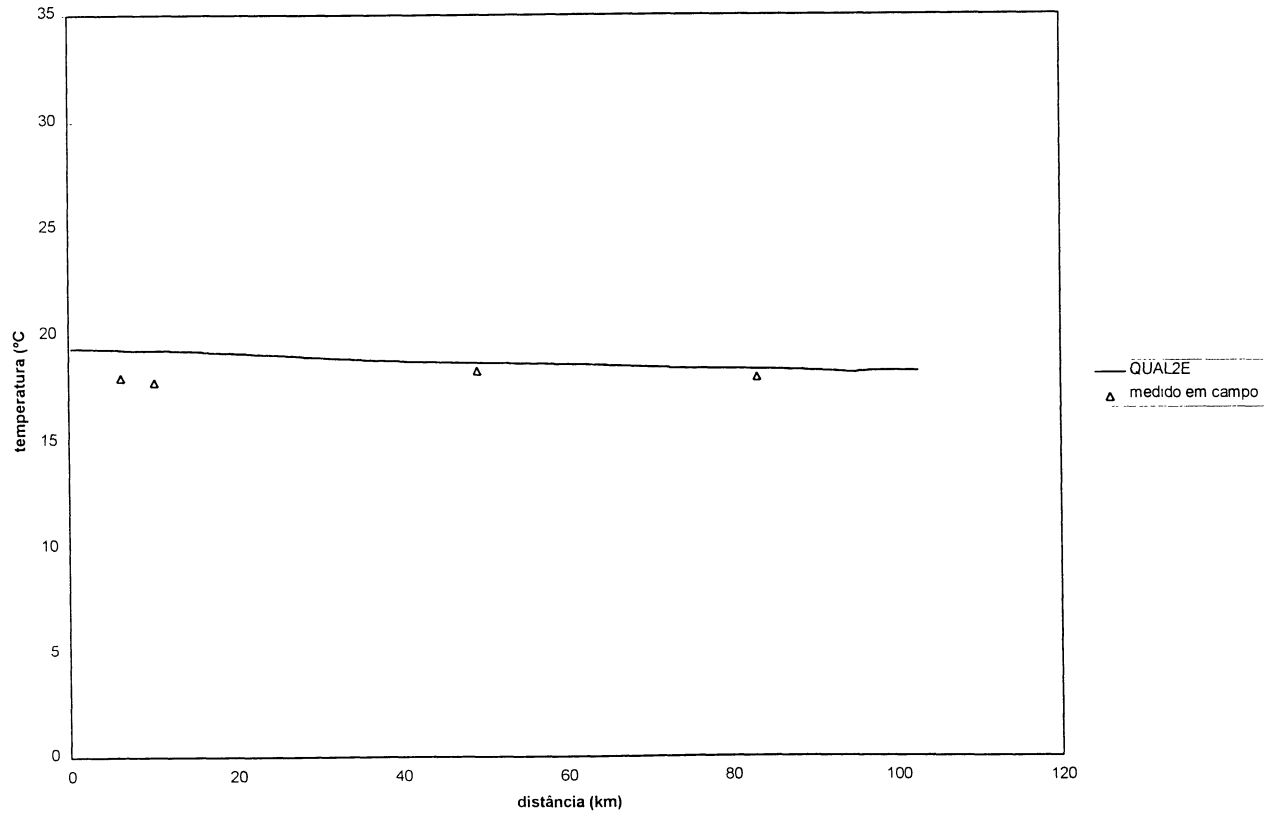


Figura 41

- Gráfico Temperatura x Distância (Julho/1997) -

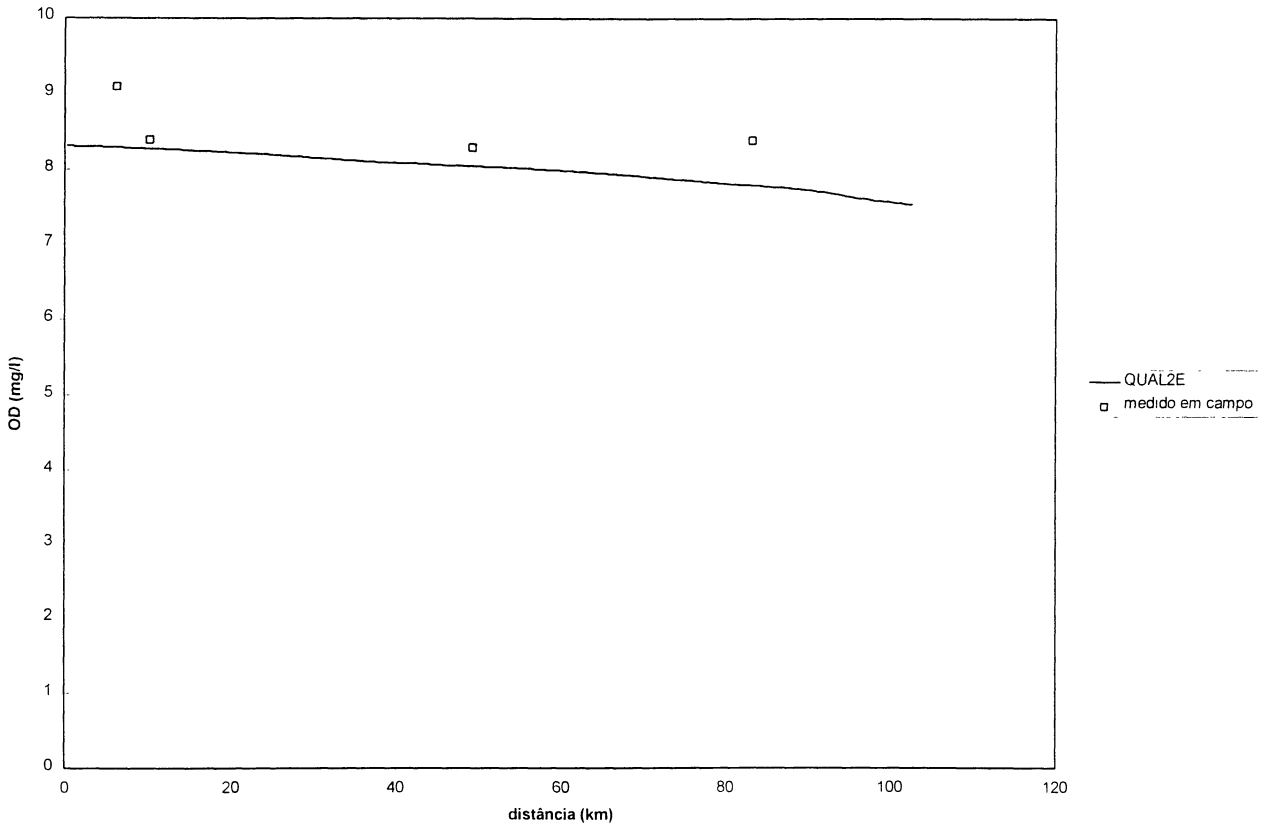


Figura 42

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Julho/1997) -

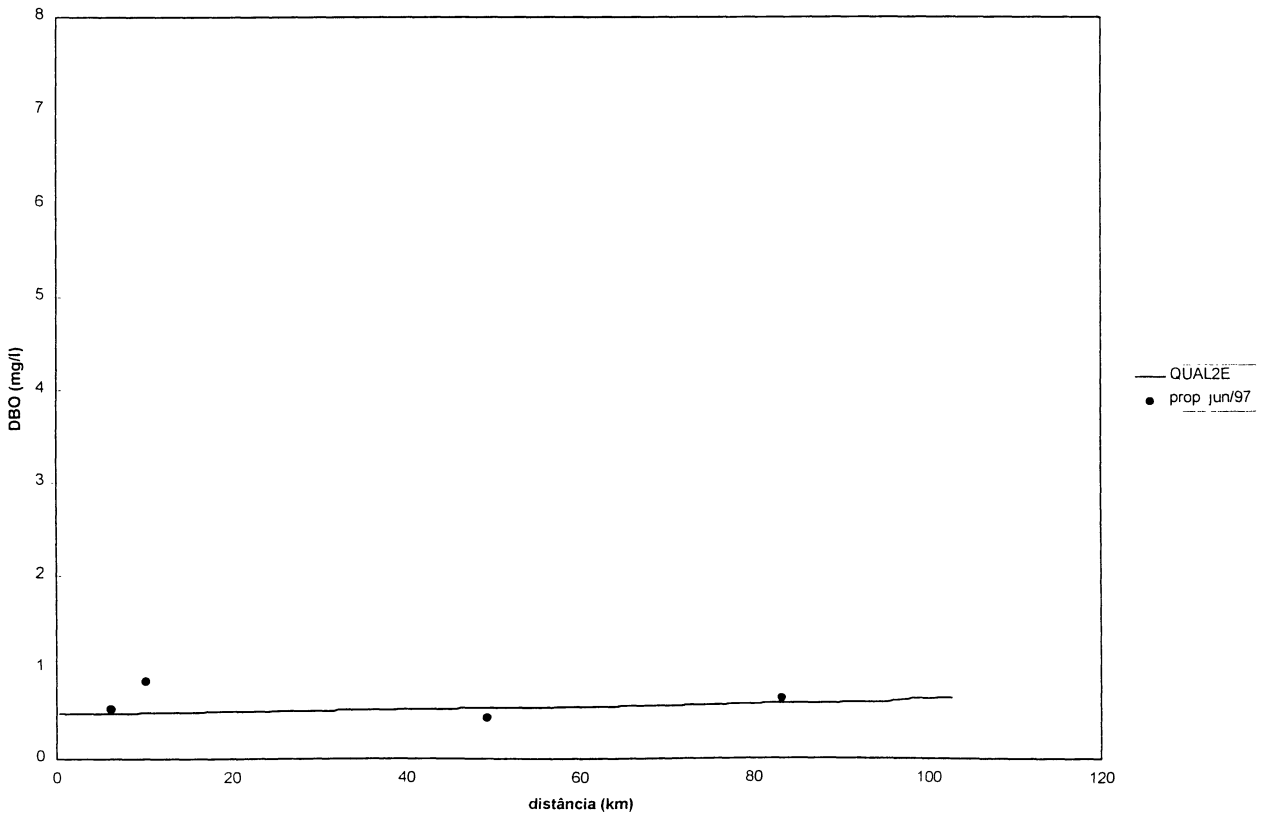


Figura 43

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Julho/1997) -

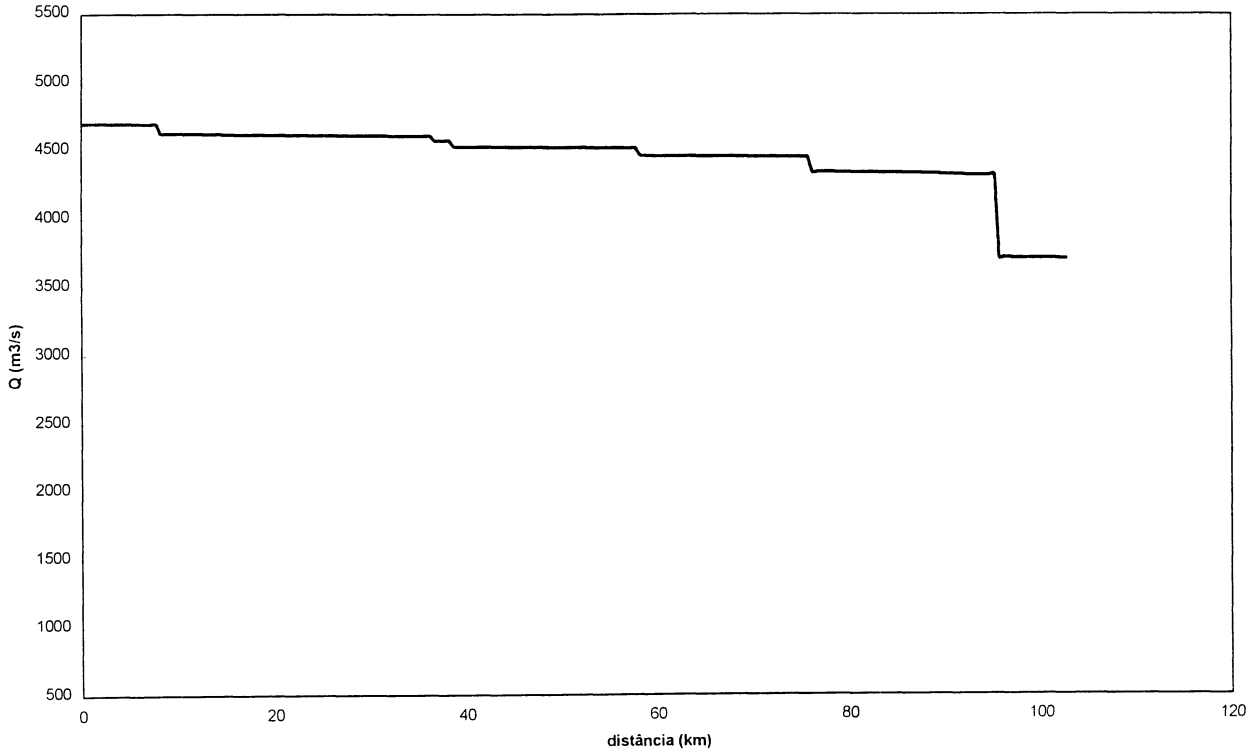


Figura 44

- Gráfico Vazão x Distância (Agosto/1997) -

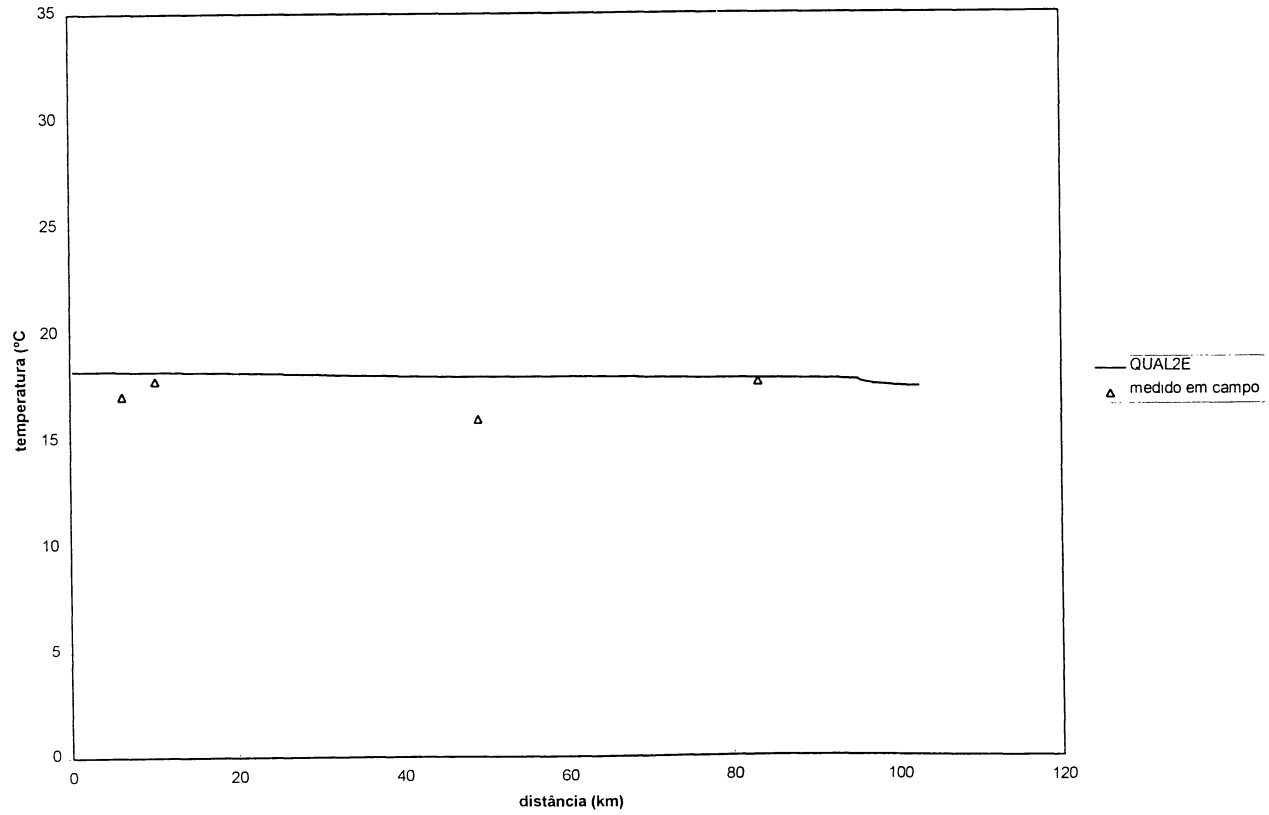


Figura 45

- Gráfico Temperatura x Distância (Agosto/1997) -

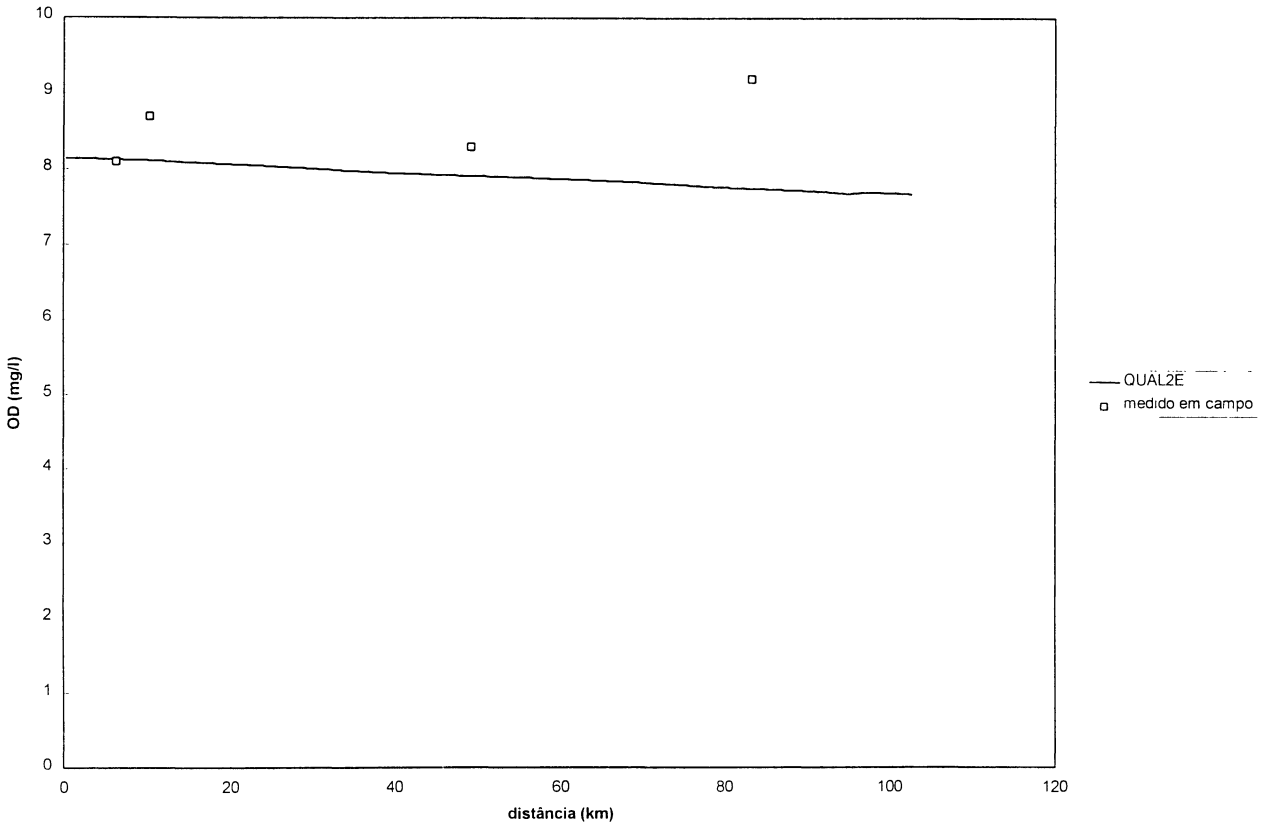


Figura 46

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Agosto/1997) -

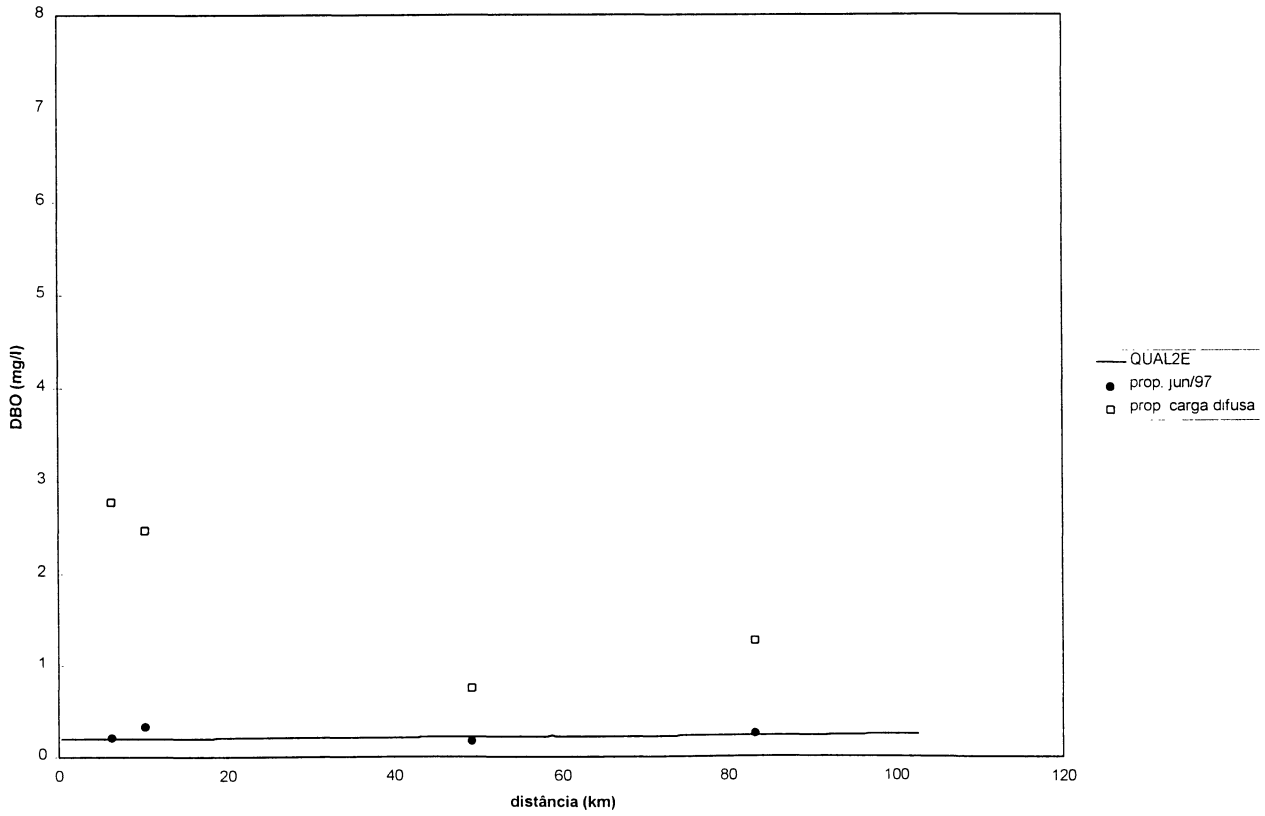


Figura 47

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Agosto/1997) -

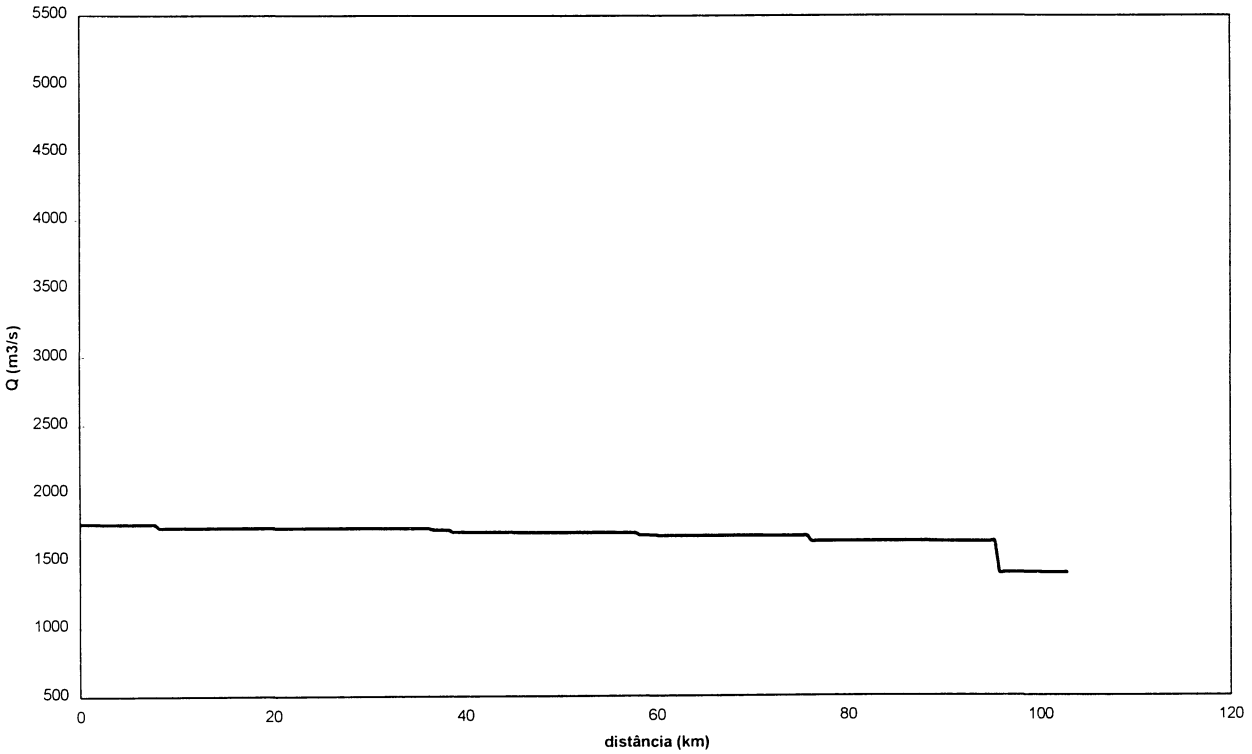


Figura 48

- Gráfico Vazão x Distância (Setembro/1997) -

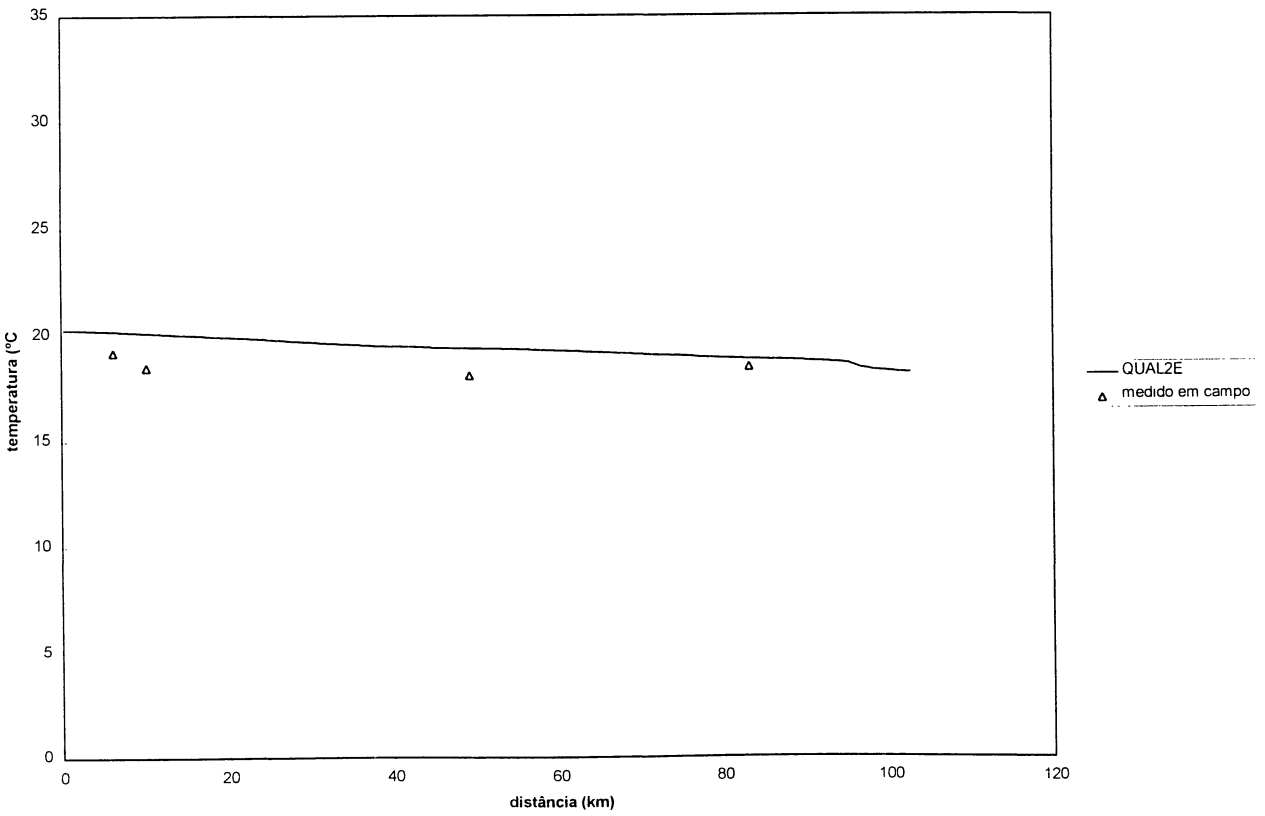


Figura 49

- Gráfico Temperatura x Distância (Setembro/1997) -

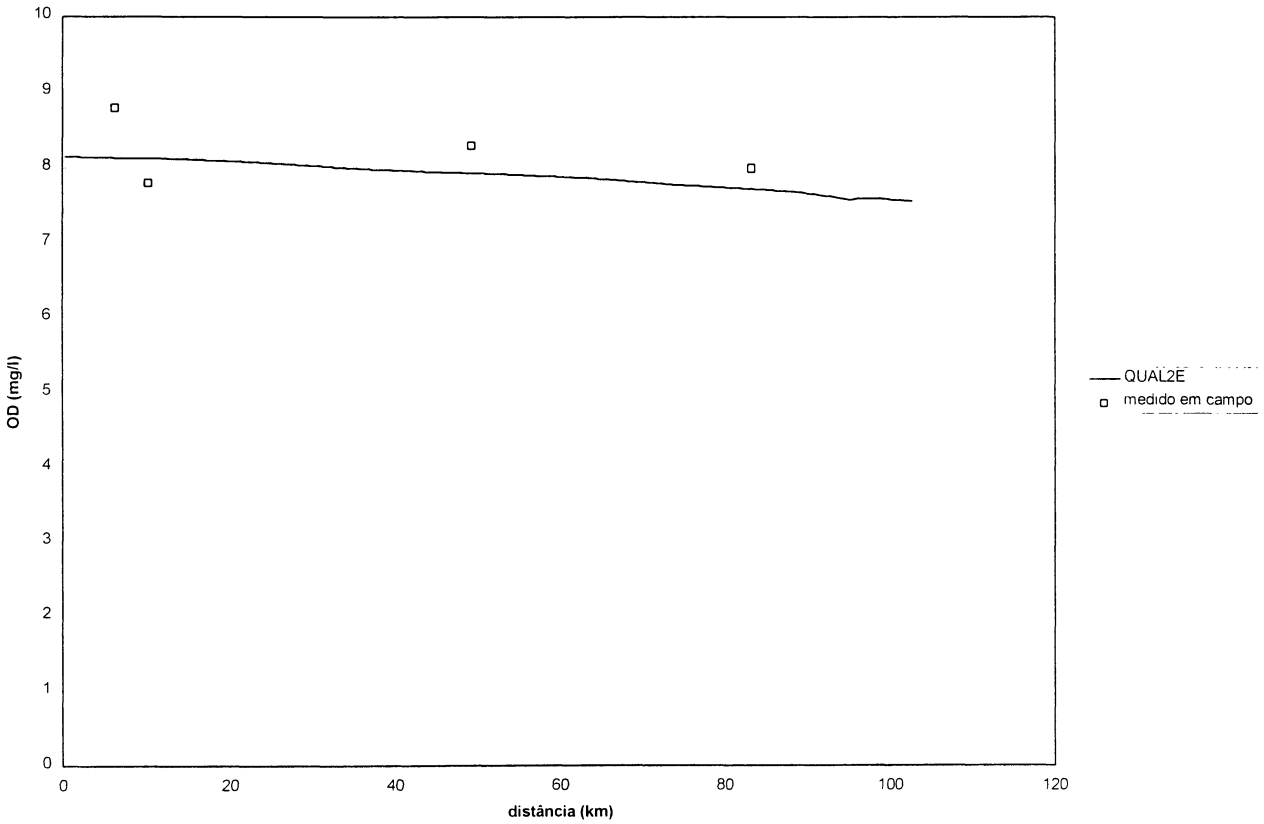


Figura 50

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Setembro/1997) -

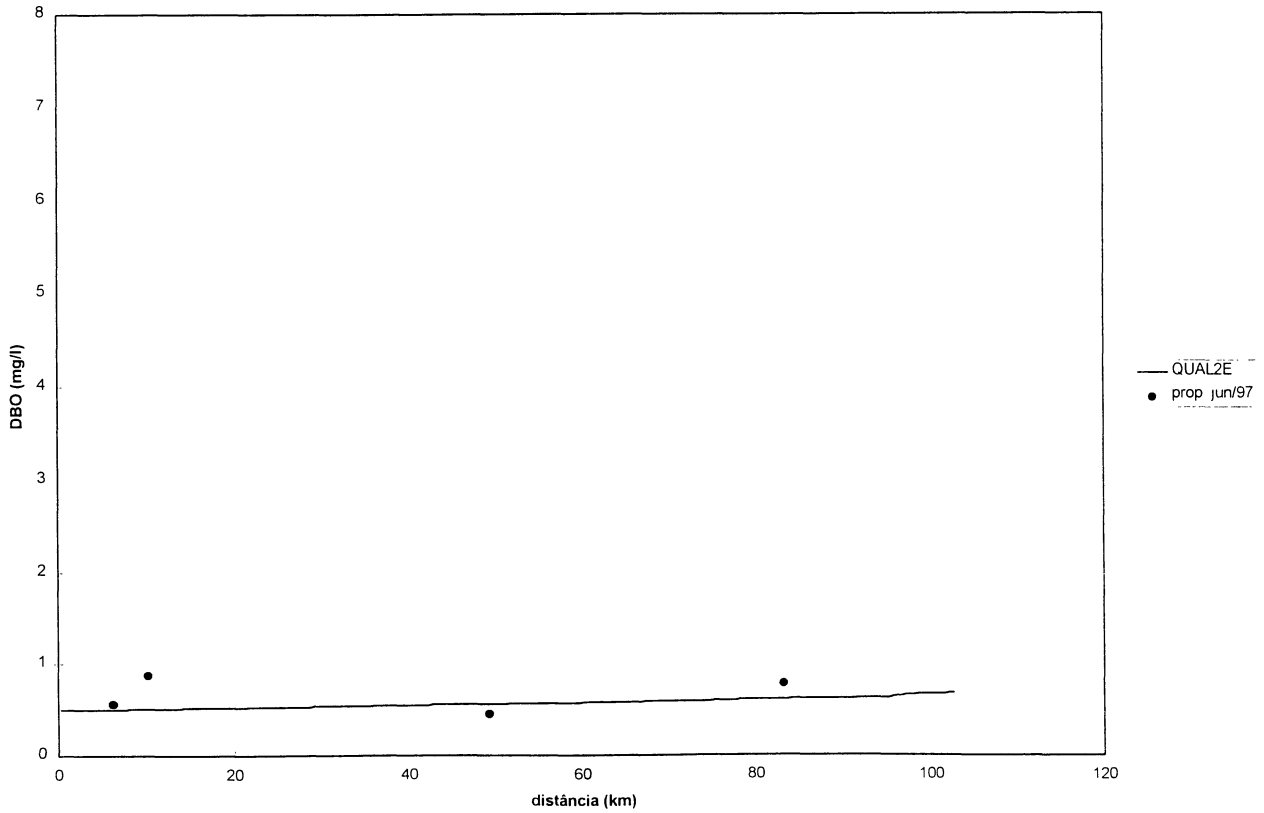


Figura 51

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Setembro/1997) -

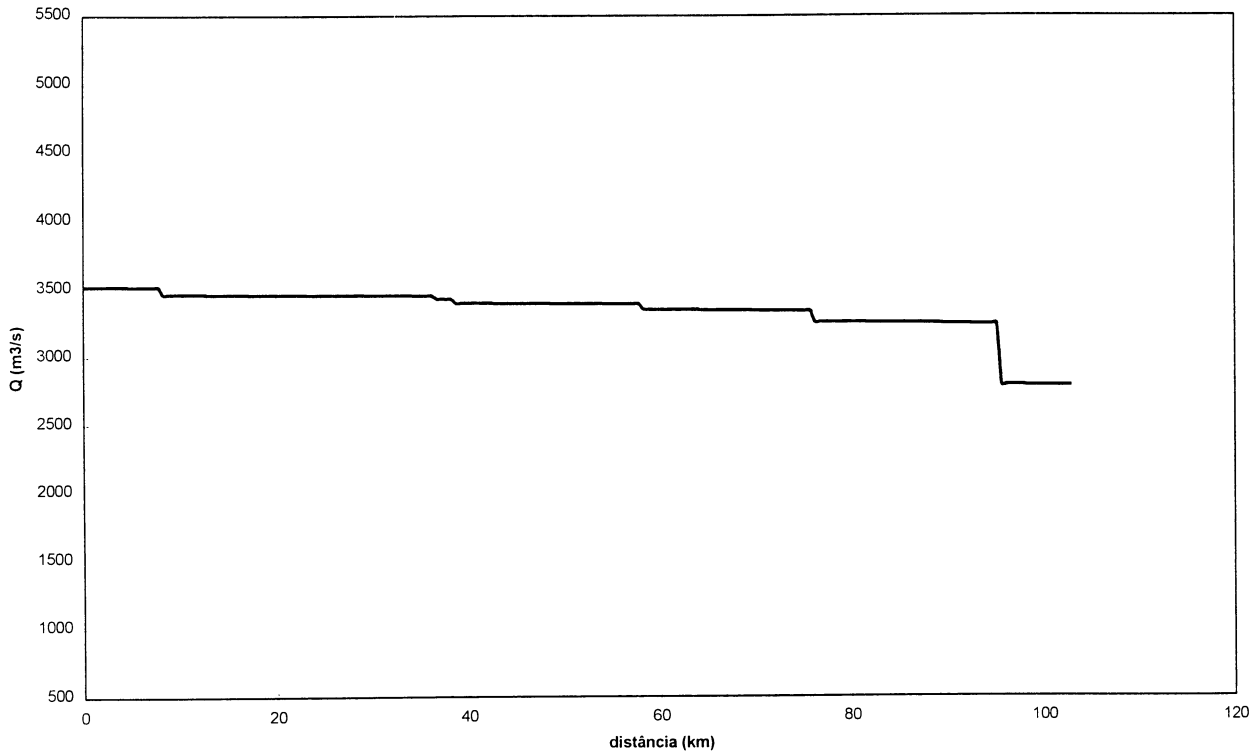


Figura 52

- Gráfico Vazão x Distância (Outubro/1997) -

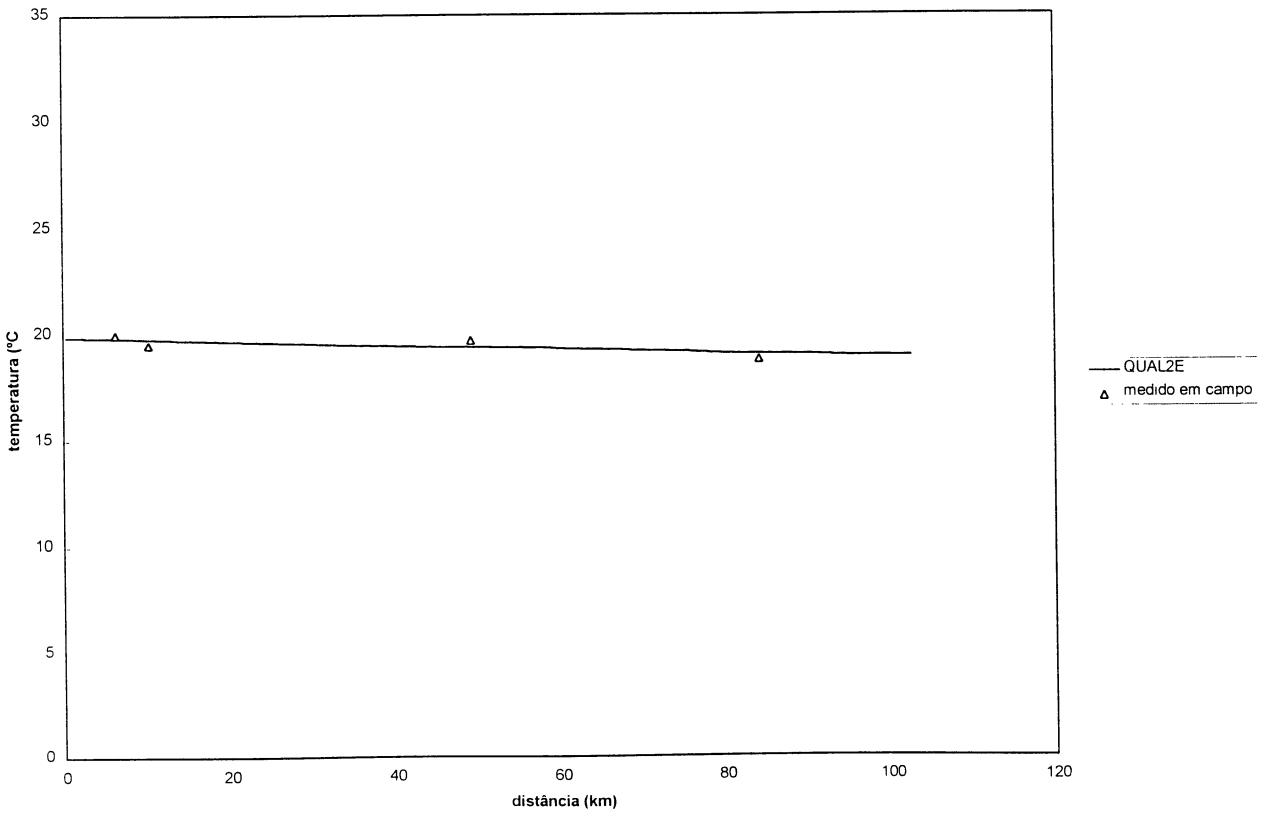


Figura 53

- Gráfico Temperatura x Distância (Outubro/1997) -

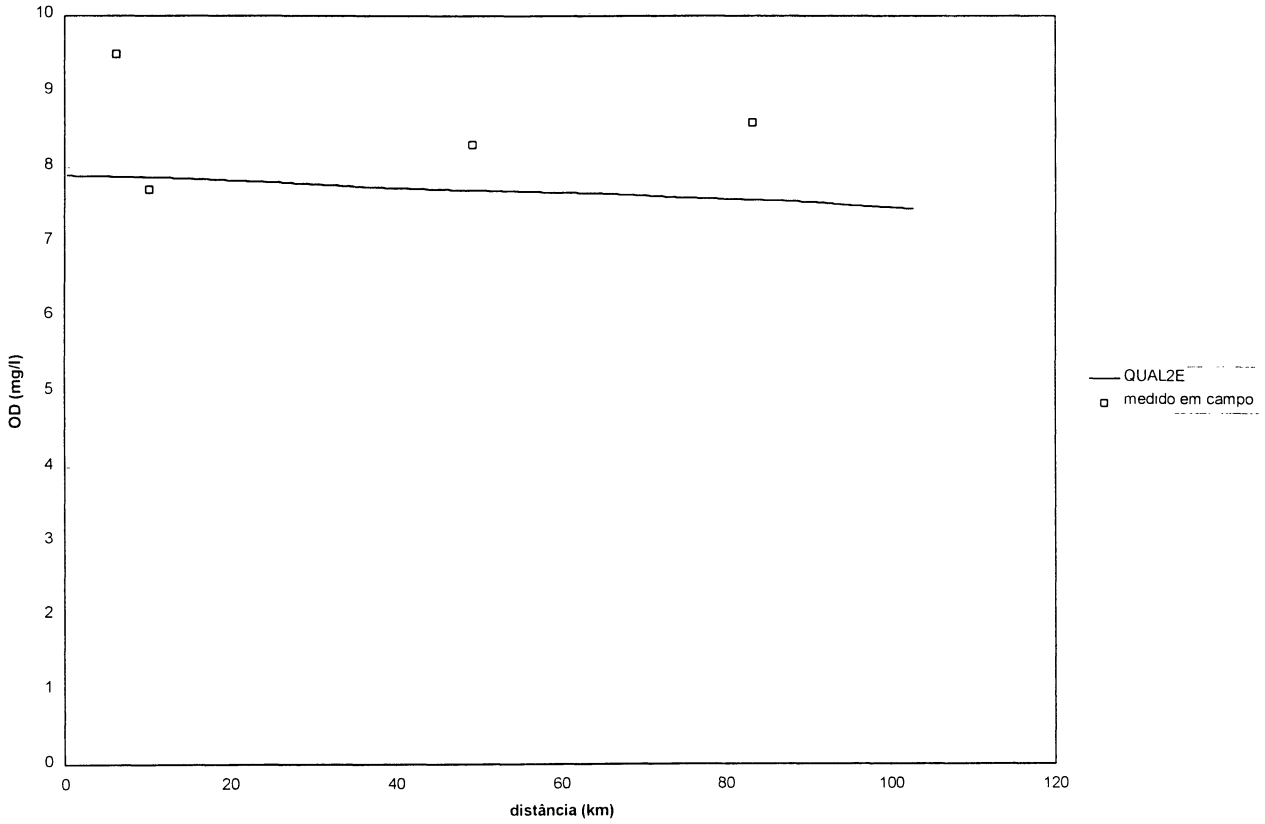


Figura 54

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Outubro/1997) -

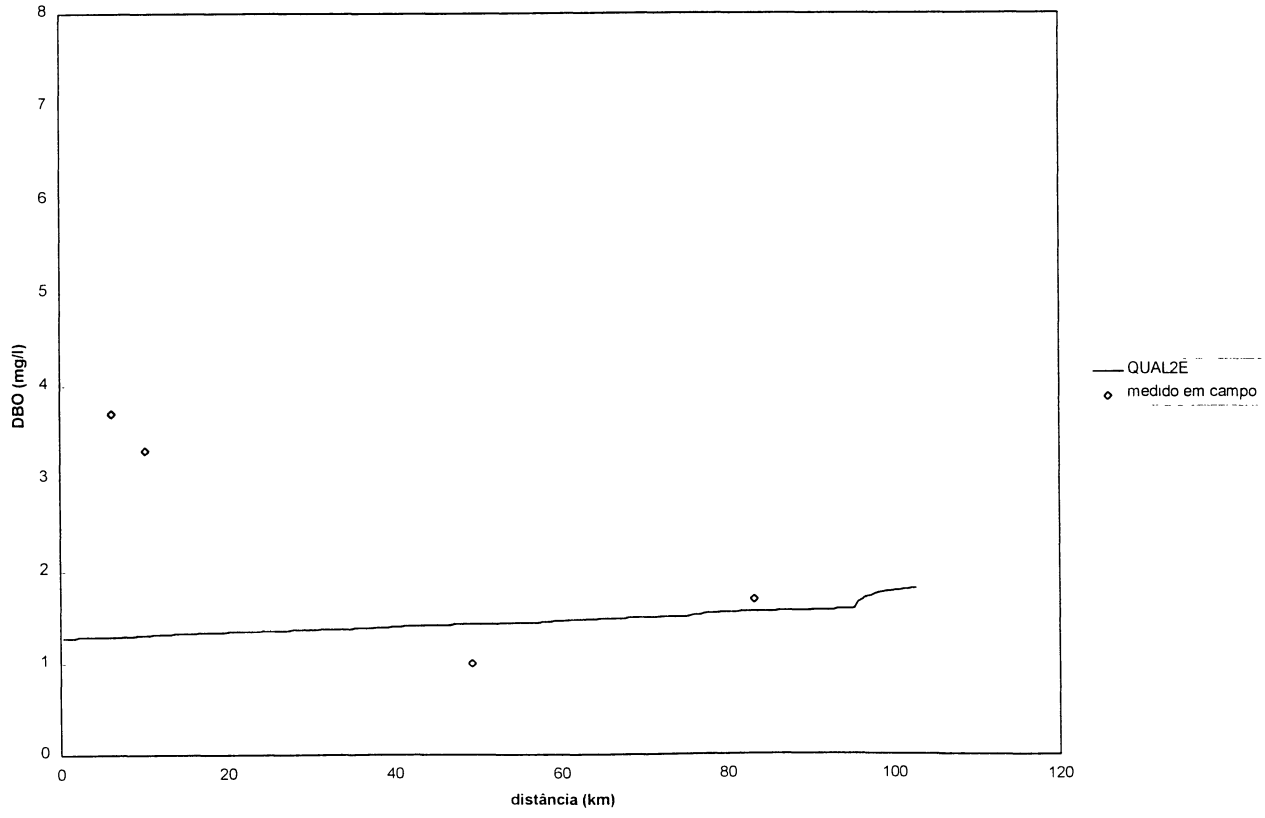


Figura 55

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Outubro/1997) -

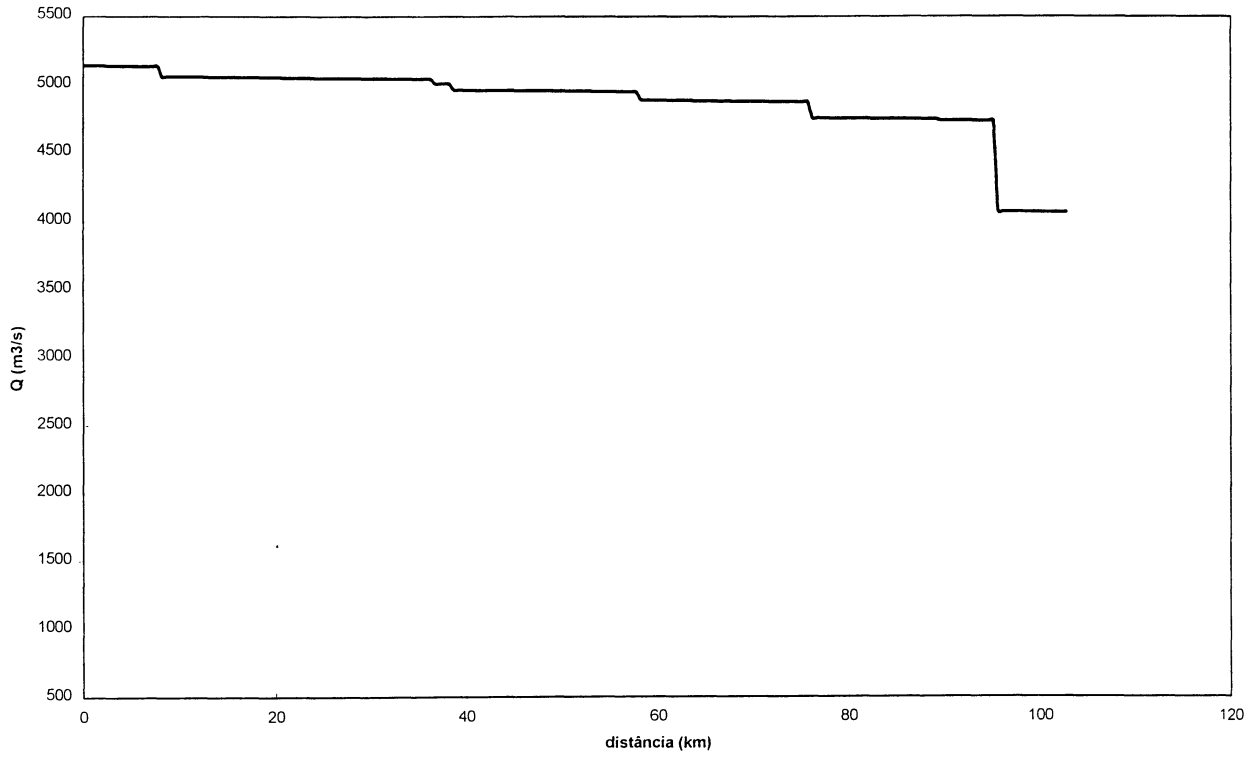


Figura 56

- Gráfico Vazão x Distância (Novembro/1997) -

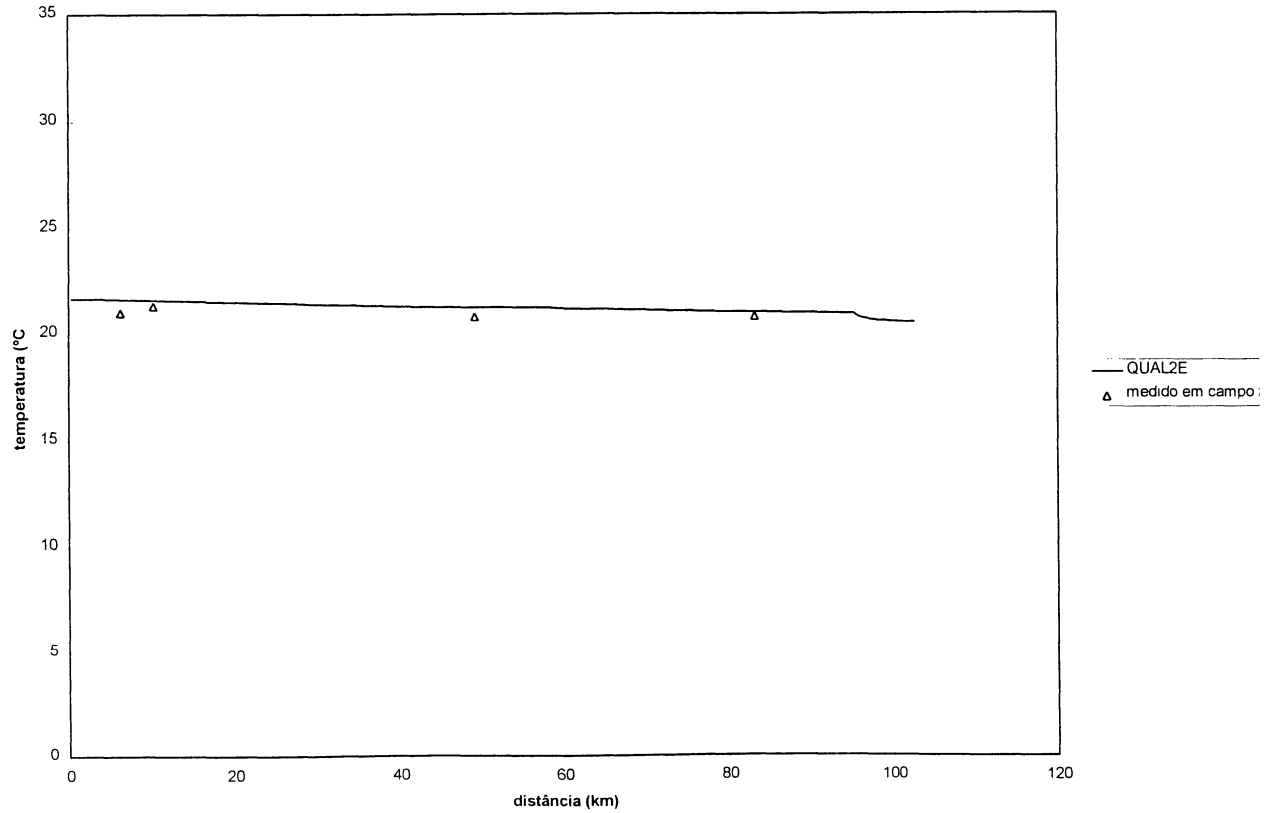


Figura 57

- Gráfico Temperatura x Distância (Novembro/1997) -

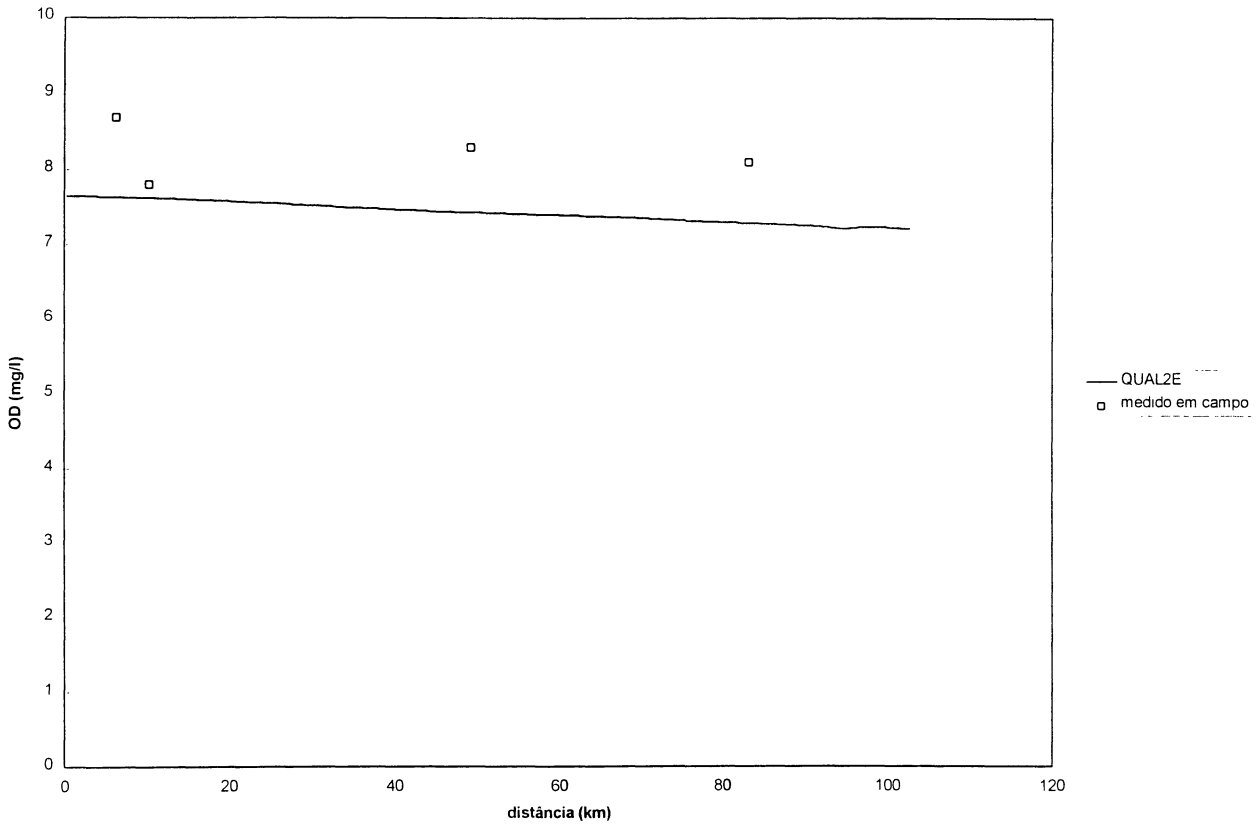


Figura 58

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Novembro/1997) -

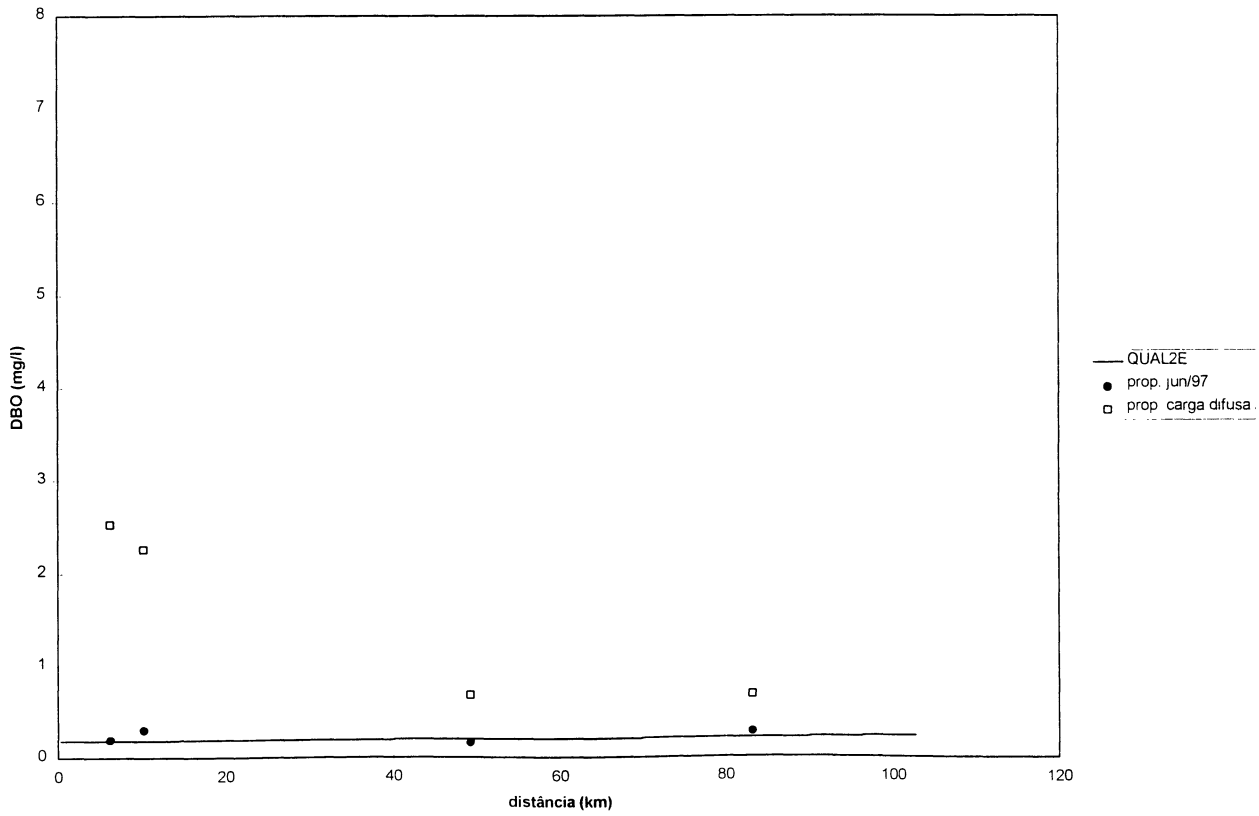


Figura 59

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Novembro/1997) -

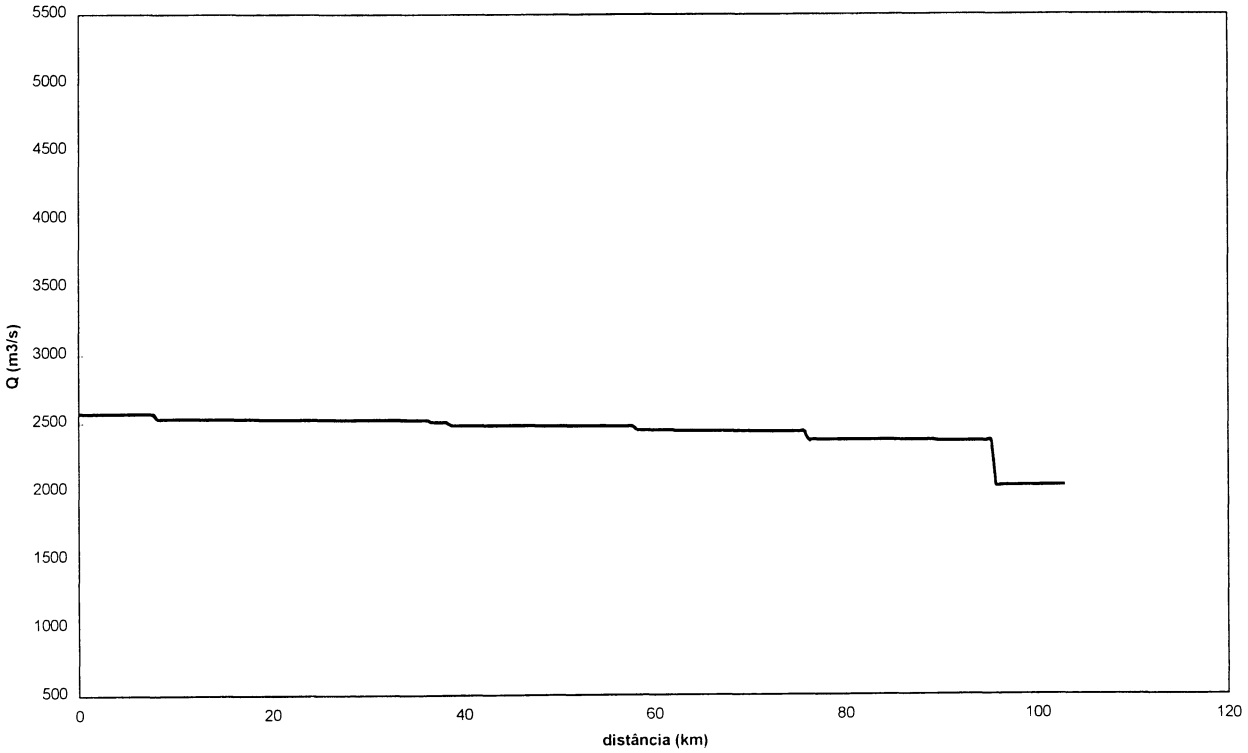


Figura 60

- Gráfico Vazão x Distância (Dezembro/1997) -

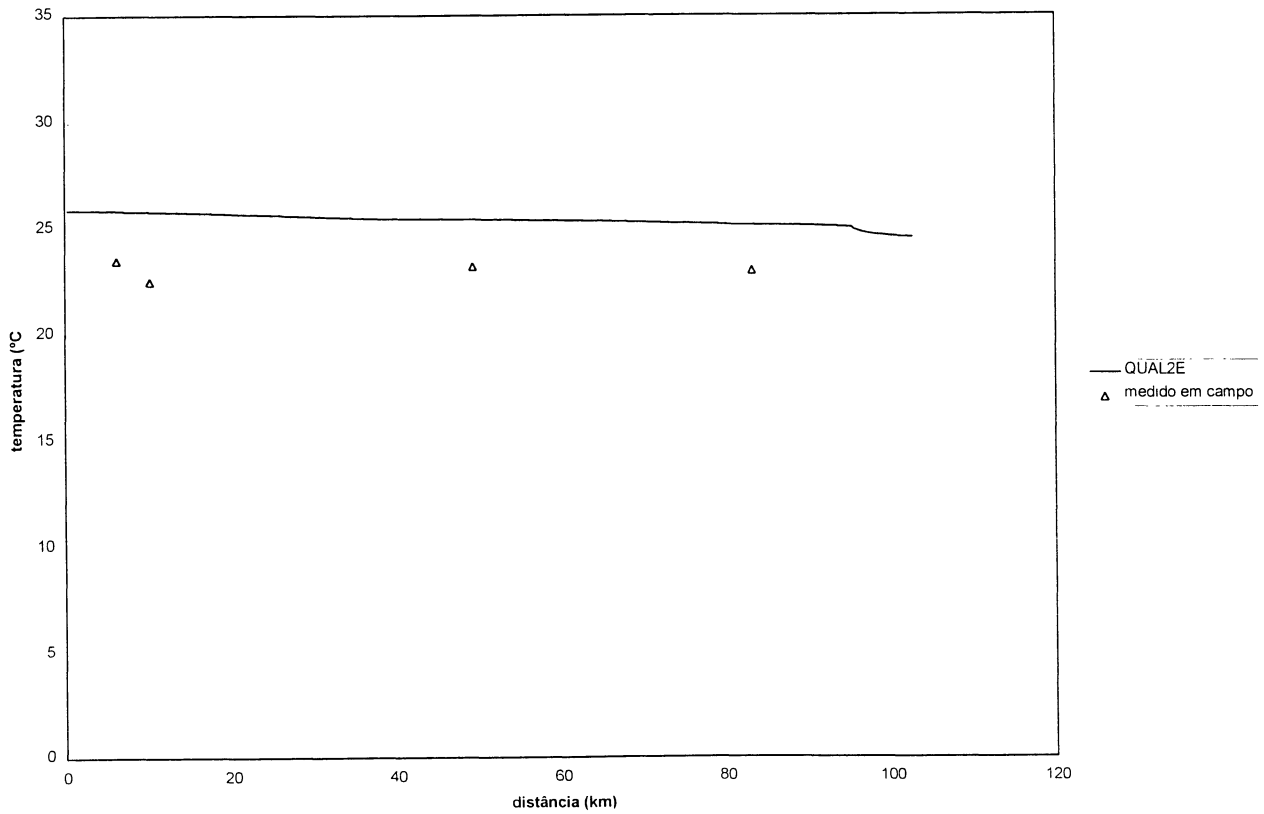


Figura 61

- Gráfico Temperatura x Distância (Dezembro/1997) -

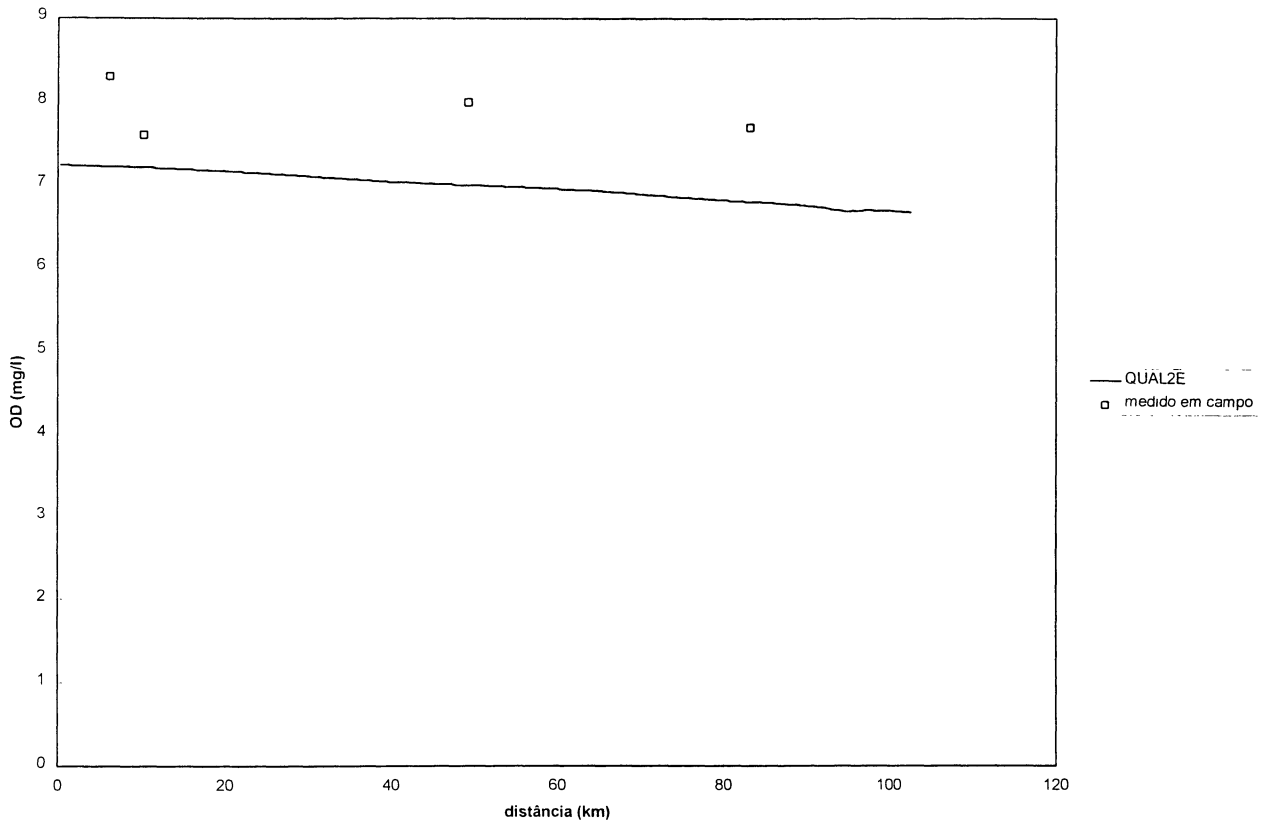


Figura 62

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Dezembro/1997) -

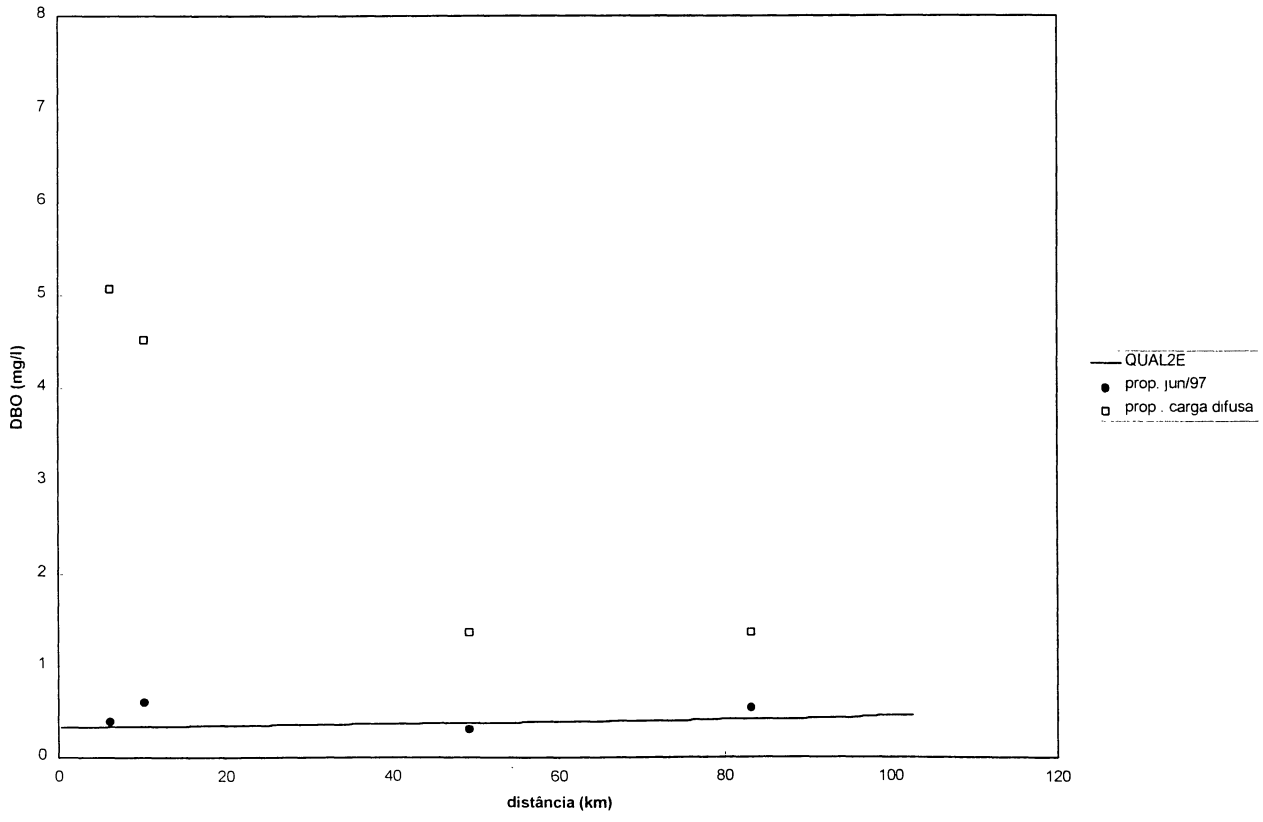


Figura 63

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Dezembro/1997) -

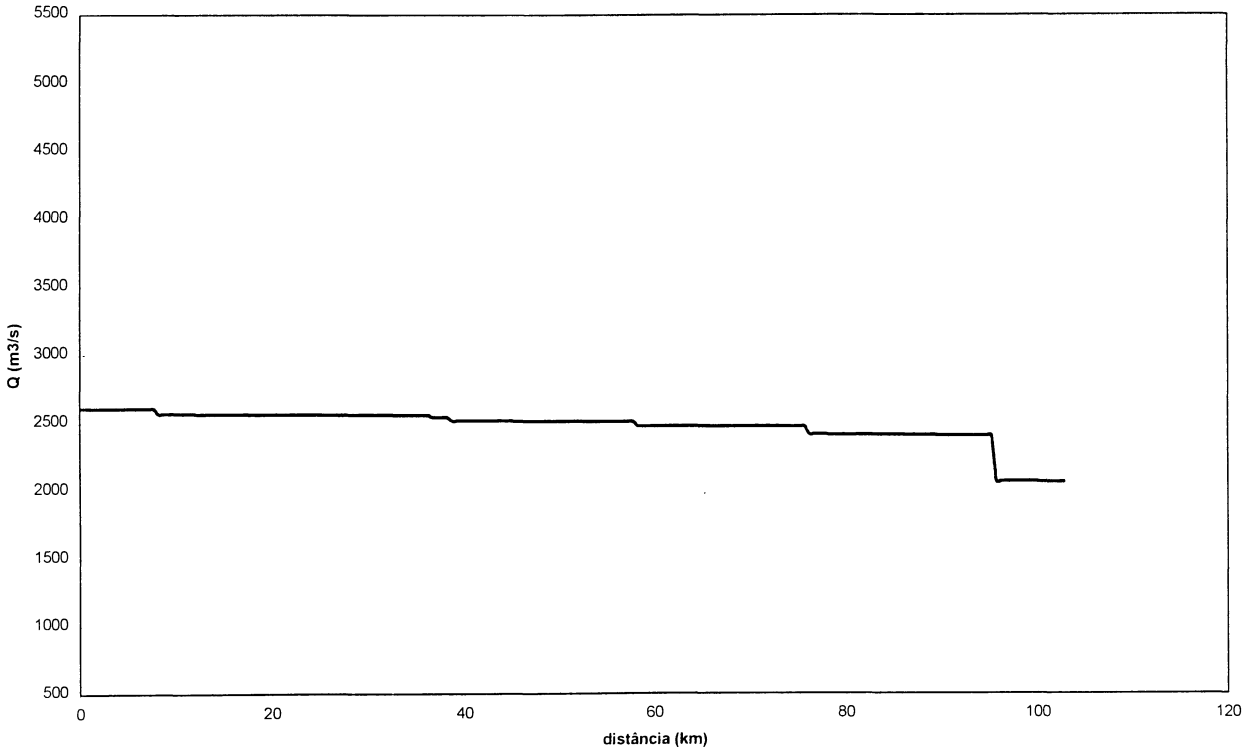


Figura 64

- Gráfico Vazão x Distância (Janeiro/1998) -

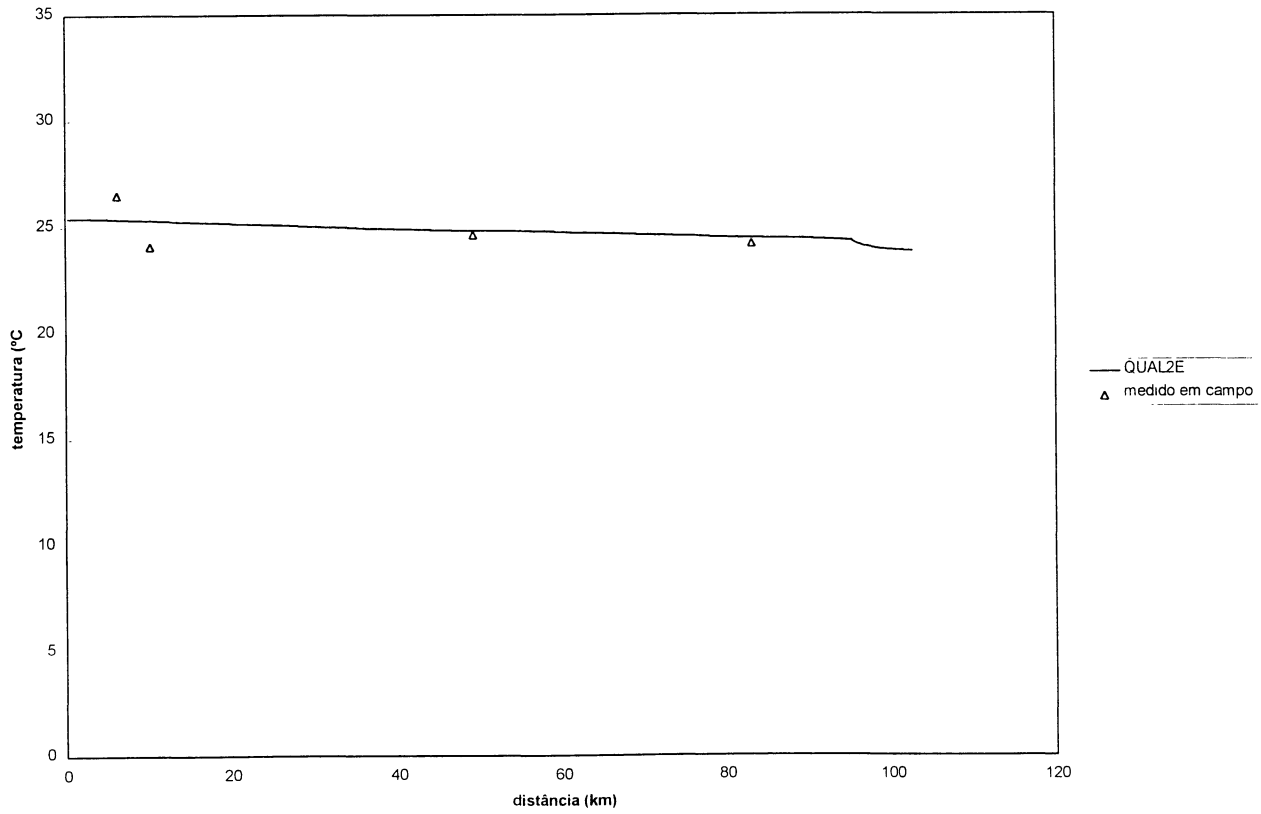


Figura 65

- Gráfico Temperatura x Distância (Janeiro/1998) -

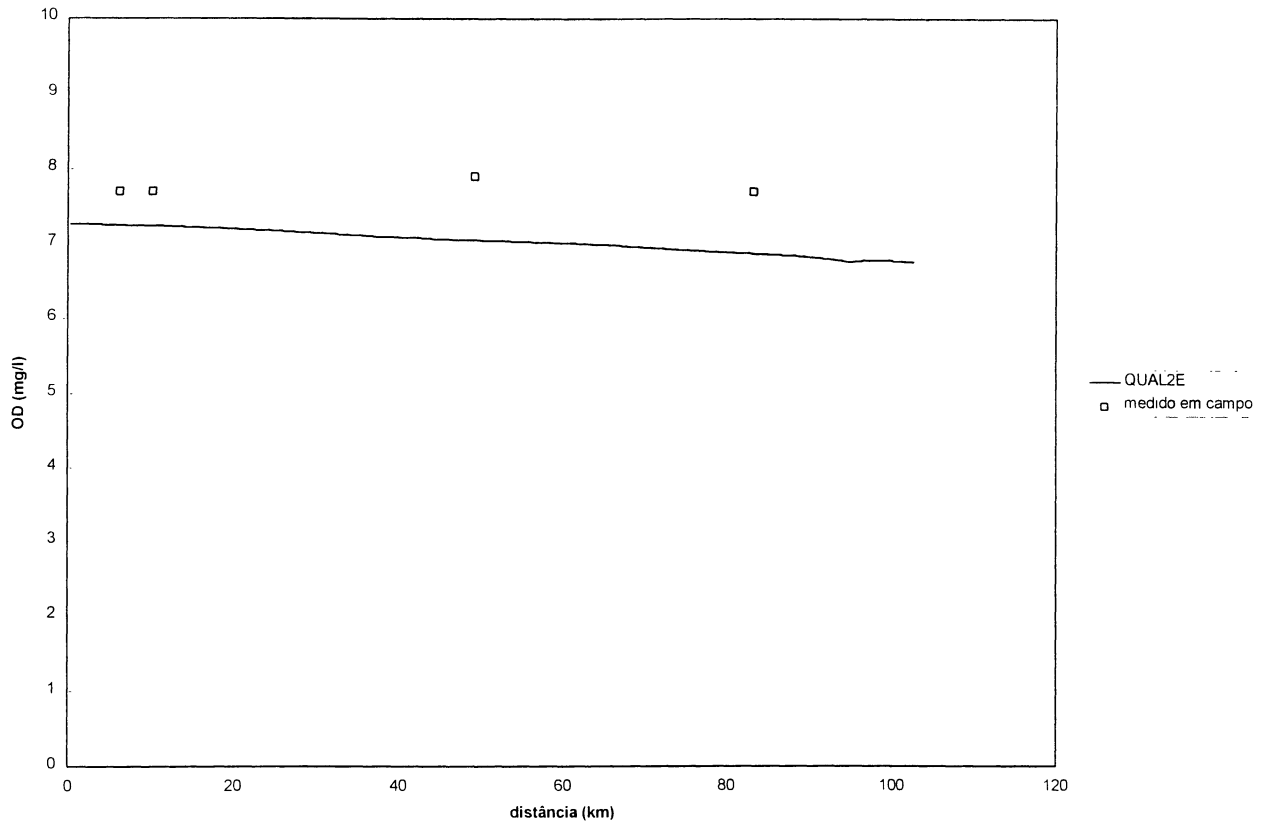


Figura 66

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Janeiro/1998) -

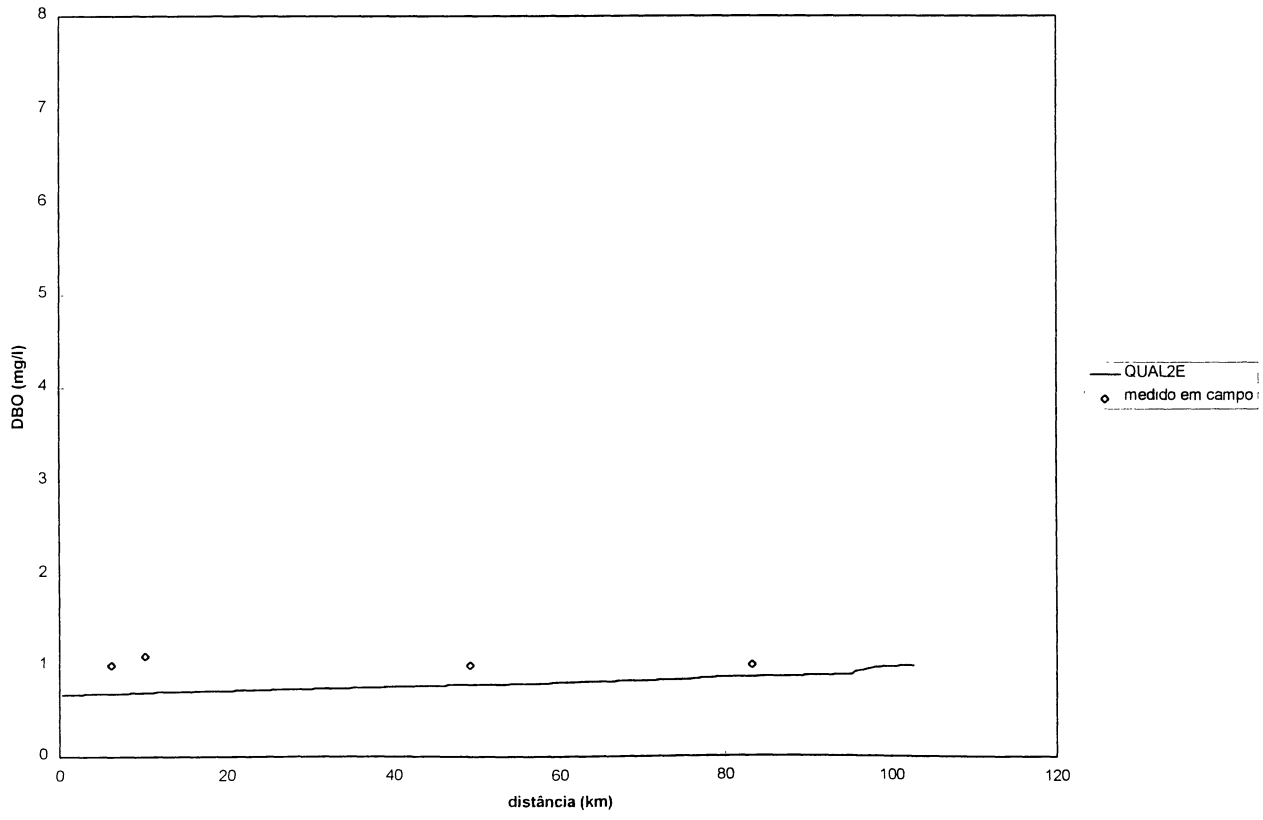


Figura 67

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Janeiro/1998) -

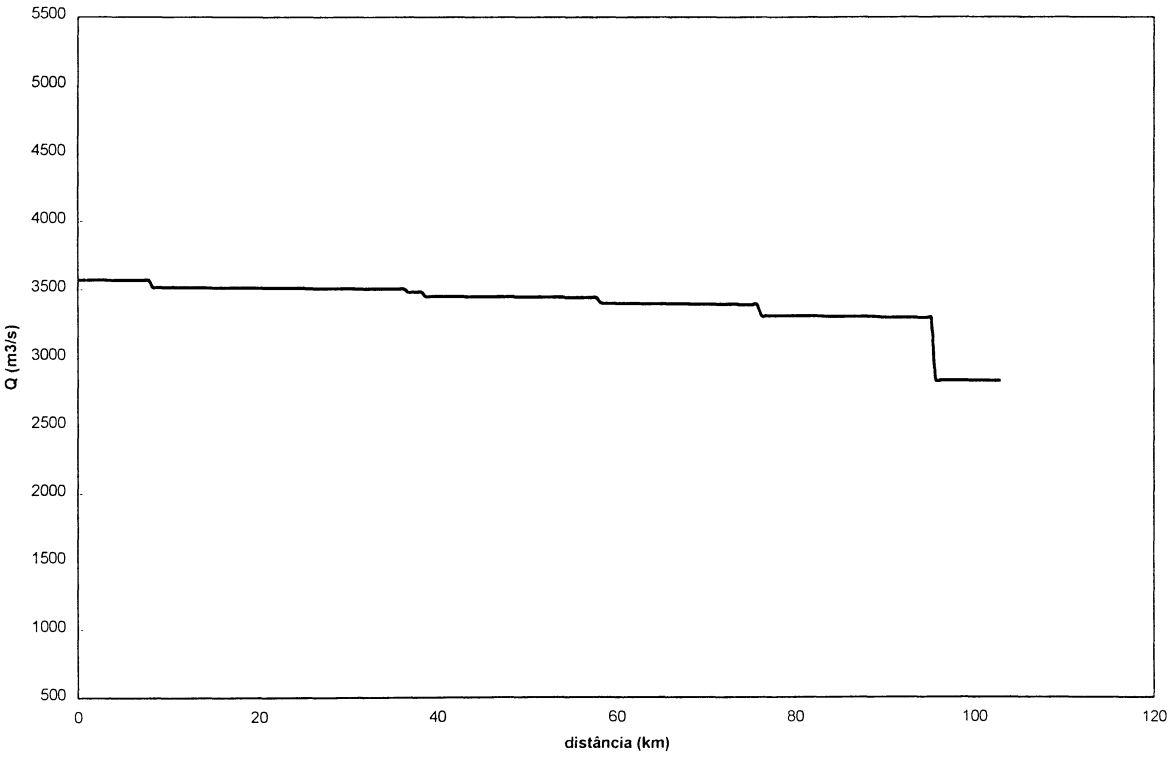


Figura 68

- Gráfico Vazão x Distância (Fevereiro/1998) -

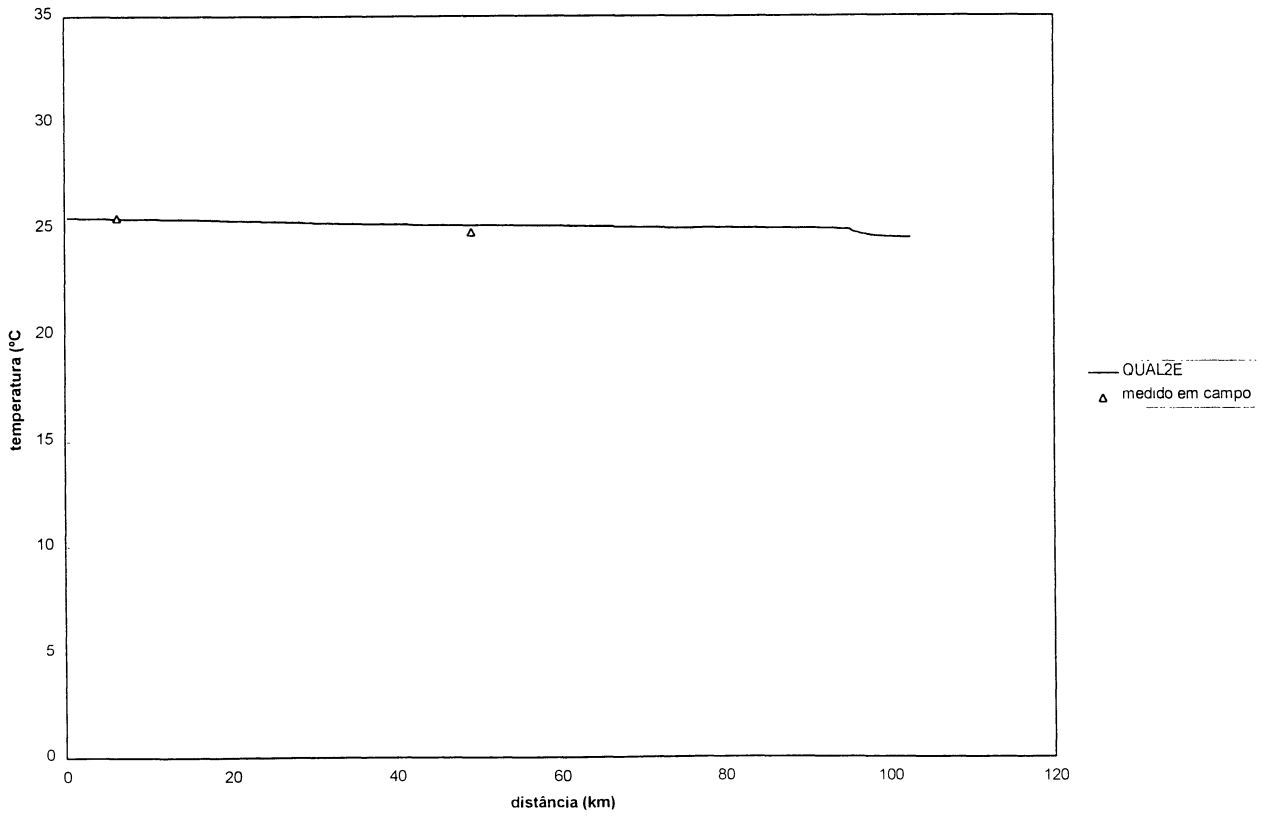


Figura 69

- Gráfico Temperatura x Distância (Fevereiro/1998) -

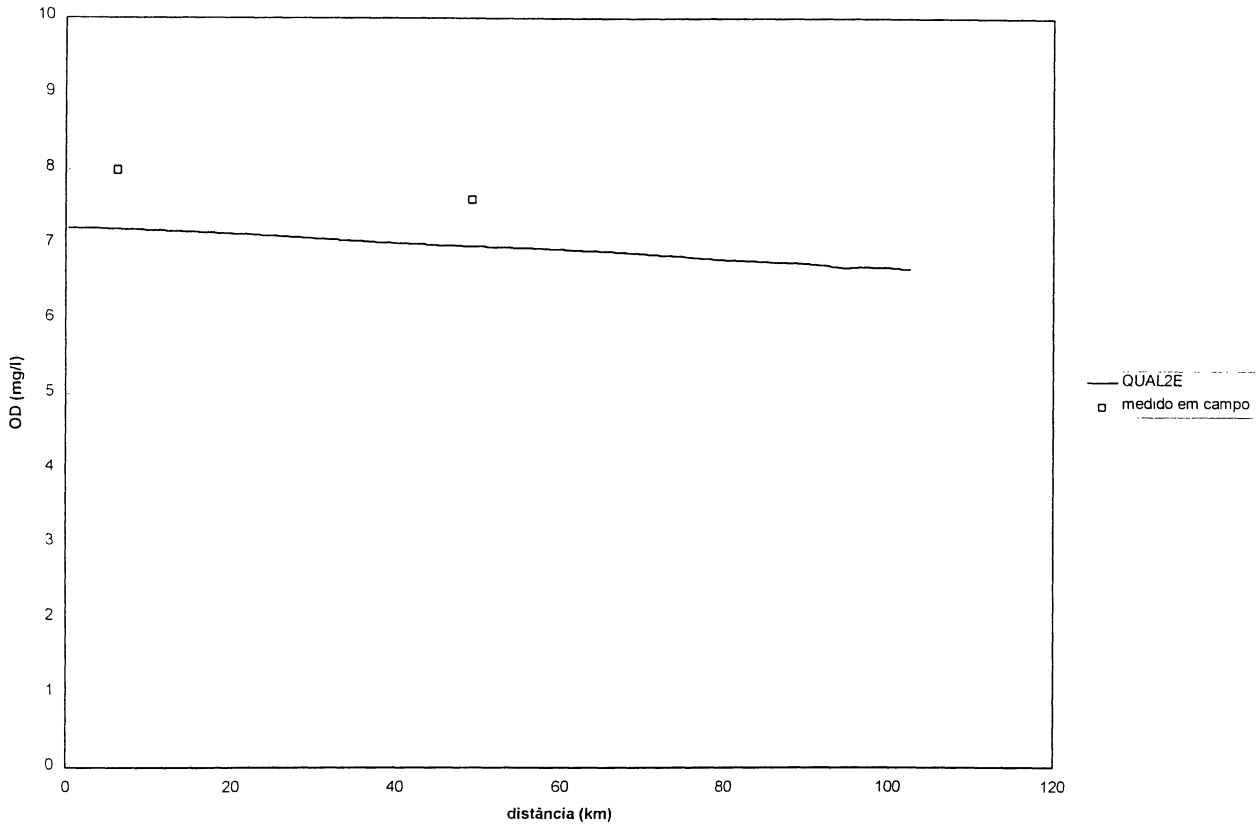


Figura 70

- Gráfico Oxigênio Dissolvido x Distância (Fevereiro/1998) -

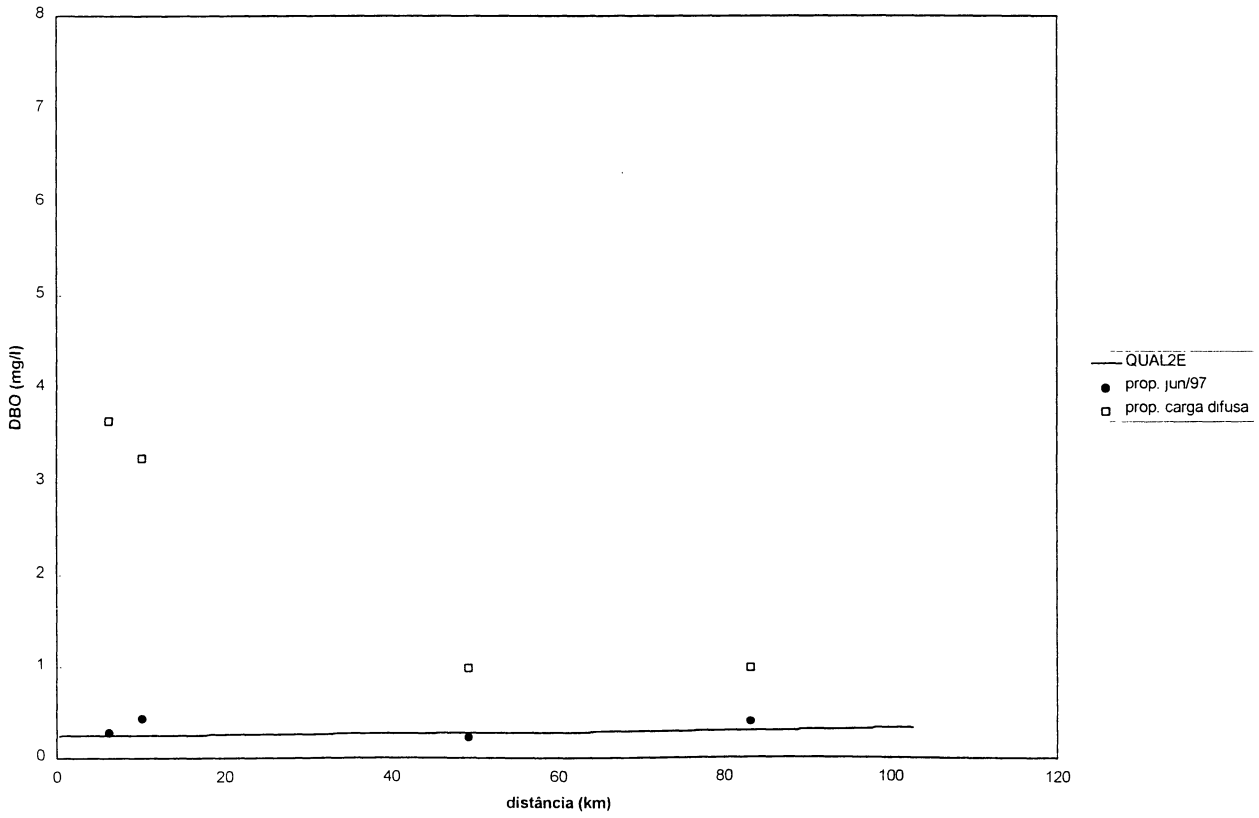


Figura 71

- Gráfico Demanda Bioquímica de Oxigênio x Distância (Fevereiro/1998) -

Como pode ser observado nos gráficos a simulação de temperatura forneceu dados bem próximos dos valores medidos em campo. Os meses que apresentaram os melhores resultados foram abril/97 e junho/97.

Na simulação de OD os valores obtidos através da simulação também encontram-se próximos dos valores medidos em campo. Em todos os meses, com exceção de agosto/97, o valor de OD medido no ponto P01 é superior ao valor simulado, o que explica-se pela existência das adufas de desvio utilizadas durante a construção de Salto Caxias, o que provoca uma reaeração forçada no escoamento. Esta estrutura hidráulica não foi considerada na modelagem matemática, provocando as diferenças observadas nos gráficos, pois a intenção é obter um modelo de simulação do sistema na ausência do empreendimento.

As maiores diferenças entre os valores medidos e os valores simulados foram encontradas nos meses de fevereiro/97 e agosto/97, enquanto que os meses que apresentaram melhores resultados foram maio/97 e junho/97.

Já com relação à DBO os valores simulados apresentam-se bem próximos dos medidos em junho/97, a menos do ponto P03, que apresenta um valor medido maior que o simulado. Os valores medidos dos pontos P01 e P03 do mês de outubro/97 são bem maiores do que os obtidos através do QUAL2E, sendo que os valores dos pontos P07 e P13 resultaram bem próximos. O outro mês que apresenta valores medidos é o mês de janeiro/98, onde os pontos estão bem próximos dos simulados, com exceção do ponto P03, que apresenta um valor medido bem maior.

Nos demais meses, onde foram plotados os valores de DBO calculados proporcionalmente à DBO de junho/97 encontram-se bem próximos dos valores simulados, enquanto que os valores de DBO calculados proporcionalmente à outubro/97 encontram-se bem acima dos valores obtidos como o uso do QUAL2E.

A explicação para estas diferenças reside no fato dos valores proporcionais a janeiro/98 (com vazão mais alta) conterem uma parcela referente a carga difusa, sendo que esta parcela não está sendo levada em conta na modelagem.

Com relação ao ponto P03, é importante lembrar que com a construção da usina de Salto Caxias houve um aumento significativo da população na região, o que contribui para o aumento da carga de DBO no entorno do ponto P03, que é o que apresenta valores medidos superiores aos valores do QUAL2E, mostrando que os resultado obtidos estão em acordo com as condições reais da região em estudo.

9 . 2 SIMULAÇÃO DE COLIFORMES

Historicamente, a preocupação com doenças de veiculação hídrica foi o que deu origem aos estudos relativos à qualidade da água. Águas contaminadas são responsáveis por diversas doenças contagiosas, provocadas pelos chamados organismos patogênicos. São estes organismos que afetam a saúde do homem, seja penetrando o organismo humano através da pele ou, mais freqüentemente entrando em seu organismo pela ingestão de água contaminada. Entre estes organismos patogênicos (Chapra, 1997) estão as bactérias (*vibrio cholerae, salmonella, legionella, shigella*), vírus (*hepatitis A, enteroviruses, polioviruses, echoviruses, coxsackieviruses, rotaviruses*), protozoários (*giardia lamblia, entamoeba histolytica, cryptosporidium, naegleria fowleri*), helmintos (*nematodes, schistosoma haematobium*) e algas (*anabaena flos-aquae, microcystis aeruginosa, aphanizomenon flos-aquae*).

Como a concentração destes organismos na água é muito difícil de ser determinada utilizam-se organismos indicadores da sua presença: coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais. Estes organismos são facilmente medidos e abundantes em dejetos humanos e de animais. Se estão presentes na água, assume-se que organismos patogênicos também estejam:

- coliformes totais: existem tanto em solos poluídos como em solos não poluídos, aparecendo também nas fezes de animais de sangue quente;

- coliformes fecais: provêm do intestino de animais de sangue quente, como regra geral a porcentagem de coliformes fecais é de 20% dos coliformes totais, entretanto a variação nesta porcentagem pode ser bem grande;

- estreptococos fecais: incluem diversas variedades de estreptococos originados de humanos e animais domésticos.

O número de coliformes totais per capita varia (Chapra, 1997) de 100.000 x 10^6 à 400.000 x 10^6 por dia, enquanto que o número de coliformes fecais é de 2.000 x 10^6 por dia (para humanos). O valor para outros animais pode ser observado na tabela 28.

Tabela 28

- Coliformes Totais e Fecais Per Capita -

	Coliformes Totais (x 10^6/dia)	Coliformes Fecais (x 10^6/dia)
Homem	100.000 à 400.000	2.000
Galinha		240
Vaca		5.400
Pato		11.000
Porco		8.900
Ovelha		18.000
Peru		130

fonte: Chapra, 1997

A taxa de decaimento para coliformes é composta por três parcelas, sendo uma decorrente da mortalidade, outra da perda por radiação solar e a última por sedimentação (Chapra, 1997).

$$k_b = k_{bl} + k_{bi} + k_{bs} \qquad (9.2.1)$$

onde: k_b = taxa de decaimento total

k_{bl} = taxa de mortalidade

k_{bi} = taxa de perda por radiação solar

k_{bs} = taxa de perda por sedimentação

Taxa de mortalidade:

A equação 9.2.2 pode ser utilizada para a sua determinação, sendo que a taxa varia de 0,8 (água doce) a 1,4 (água do mar). A equação leva em conta a correção para a temperatura (Chapra, 1997).

$$k_{bl} = (0{,}8 + 0{,}006Ps)1{,}07^{T-20} \qquad (9.2.2)$$

onde: Ps = porcentagem de água salgada

T = temperatura absoluta

Taxa de perda por radiação solar:

Esta taxa pode ser representada pela seguinte equação (Chapra, 1997):

$$k_{bi} = \alpha \bar{I} \qquad (9.2.3)$$

onde: α = constante de proporcionalidade

$\bar{I}$ = energia luminosa média

O valor de α pode ser considerado igual à unidade, e a energia luminosa média pode ser determinada através da equação de (Chapra, 1997):

$$\bar{I} = \frac{\int_0^h I_0 e^{-k_e z} dz}{h} = \frac{I_0}{k_e h}(1 - e^{-k_e h}) \qquad (9.2.4)$$

onde: I_0 = energia luminosa na superfície

k_e = coeficiente de extinção de luz

h = profundidade [L]

O coeficiente de extinção de luz é função da quantidade de partículas suspensas e da cor da água, podendo ser relacionado com o valor da profundidade do disco de Secchi ou a concentração de sólidos suspensos, conforme mostram as equações 9.2.5 e 9.2.6 (Chapra, 1997).

$$k_e = \frac{1{,}8}{SD} \qquad (9.2.5)$$

$$k_e = 0{,}55 c_{ss} \qquad (9.2.6)$$

onde: SD = profundidade do disco de Secchi [L]

c_{ss} = concentração de sólidos suspensos (mg/l) [ML^{-1}]

Substituindo a equação 9.2.4 em 9.2.3 temos (Chapra, 1997):

$$k_{bi} = \frac{\alpha I_0}{k_e h}(1 - e^{-k_e h}) \qquad (9.2.7)$$

Taxa de perda por sedimentação:

A parcela de perda decorrente da sedimentação é causada pelos organismos existentes nas partículas sólidas depositadas. Esta parcela pode ser dividida em duas, uma decorrente da concentração de bactérias livres (ou flutuantes) e outra decorrente da concentração de bactérias agregadas às partículas, conforme mostra a equação 9.2.8 (Chapra, 1997):

$$C_T = C_w + C_p \qquad (9.2.8)$$

onde: C_T = concentração total de bactérias

C_W = concentração de bactérias livres

C_P = concentração de bactérias agregadas

A quantidade de bactérias agregadas existente nas partículas é usualmente expressa como concentração de massa (Chapra, 1997):

$$C_P = 10^{-4} Cm \qquad (9.2.9)$$

onde: C = concentração de massa (número/g)

c_{ss} = concentração de sólidos suspensos (mg/l) [ML^{-1}]

sendo 10^{-4} a constante utilizada para converter para 100 ml.

A tendência das bactérias se agregarem às partículas pode ser expressa por (Chapra, 1997):

$$k_d = 10^{-4} \frac{C}{C_W} \qquad (9.2.10)$$

onde: k_d = coeficiente de partição

A equação 9.2.8 fica:

$$C_T = C_W + k_d c_{ss} C_W \qquad (9.2.11)$$

Esta equação pode então ser resolvida da seguinte forma (Chapra, 1997):

$$C_W = F_W C_T \qquad (9.2.12)$$

onde: F_W = fração de bactérias livres

$$F_W = \frac{1}{1 + k_d c_{ss}} \qquad (9.2.13)$$

$$C_P = F_P C_T \qquad (9.2.14)$$

onde: F_P = fração de bactérias agregadas

$$F_P = \frac{k_d c_{ss}}{1 + k_d c_{ss}} \qquad (9.2.15)$$

Se a velocidade de sedimentação das partículas for u_s (m/dia), a perda por sedimentação pode ser dada pela equação 9.2.16 (Chapra, 1997):

$$k_{bs} = F_P \frac{u_s}{h} \qquad (9.2.16)$$

A taxa de decaimento total é expressa então como (Chapra. 1997):

$$k_b = (0{,}8 + 0{,}006Ps)1{,}07^{T-20} + \frac{\alpha I_0}{k_e h}(1 - e^{-k_e h}) + F_p \frac{u_s}{h} \qquad (9.2.17)$$

No presente estudo apenas a primeira parcela da equação 9.2.17 (referente à mortalidade) foi considerada, arbitrando-se também uma temperatura única de 20°C, o que leva à um valor de 0,8 para a taxa de decaimento de coliformes, valor este utilizado nas simulações do QUAL2E.

A modelagem de coliformes foi feita de maneira semelhante à modelagem de DBO, considerando-se um valor per capita de 2.000 x 10^6 NMP/hab.dia.

Para esta simulação, além dos dados utilizados anteriormente, as seguintes alterações são necessárias:

Tela 04 - Definição de parâmetros a simular

Nesta segunda simulação será incluída também o parâmetro de qualidade coliforme fecal, opção esta que deverá ser ligada.

Tela 13 - Coeficientes de Reação de N, P e algas

Nesta tela deve ser informado o valor utilizado para a taxa de decaimento de coliformes, adotado como 0,8, conforme texto explicativo no início deste item.

Tela 14 - Condições Iniciais Estimadas do Rio

Optou-se, tendo em vista os dados disponíveis, por informar apenas o valor de coliformes afluentes ao rio Iguaçu, sendo que as condições iniciais do rio, com referência a coliformes fecais, foi adotada como sendo zero.

Tela 15 - Vazões Incrementais por Tramo

O valor de coliformes fecais das vazões incrementais também foi adotado como sendo igual a zero.

Tela 16 - Dados das Cabeceiras dos Rios

O valor de coliformes fecais para a cabeceira também foi adotado igual a zero.

Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes

A carga de coliformes fecais foi calculada de maneira semelhante à utilizada para o cálculo da DBO, apenas mudando-se o valor da carga para 2.000 x 10^6 NMP/hab.dia (ao invés do valor de 54 g/hab.dia, adotado para o valor da carga de DBO por habitante). O valor da carga por afluente, considerando-se o valor de k_b igual a 0,8, encontra-se na tabela 29.

Tabela 29

- Concentração de coliformes fecais nos afluentes (NMP/dia) -

Ponto de Lançamento	TOTAL
Rio Chopim	89.597.854.897.745
Rio Tormenta	7.770.643.783.722
Rio Adelaide	12.099.460.703.338
Rio Jaracatiá	20.659.139.179.623
Rio Guarani	17.606.774.569.495
Rio Cotejipe	22.230.470.443.657
Rio dos Micos	2.253.658.516.969
Rio Perdido	2.746.436.184.444
Córrego Luciana	180.340.694.371
Sanga dos Porcos	90.980.191.188

Foi então necessário alterar os valores da tabela 29, cuja unidade é NMP/dia, para a unidade utilizada pelo QUAL2E, que é NMP/100 ml. A vazão utilizada para esta transformação de unidades é a constante na tabela 25.

O restante das telas do programa QUAL2E permanecem sem alterações.

9 . 2 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência encontram-se registrados os valores de coliformes fecais, nas figuras 72 a 84. Como somente se dispunha de dados de coleta referentes aos meses de junho de 1997 e de janeiro

de 1998 (tabela 30), adotou-se um procedimento semelhante ao utilizado para o cálculo da DBO, utilizando-se valores proporcionais aos valores de junho de 1997.

Tabela 30

- Dados das campanhas de coleta → Coliformes -

Ano	Mês	Coliformes (NMP/100 ml)			
		P1	P3	P7	P13
1.997	Junho	10	119	70	5,1
	Julho	-	-	-	-
	Agosto	-	-	-	-
	Setembro	-	-	-	-
	Outubro	-	-	-	-
	Novembro	-	-	-	-
	Dezembro	-	-	-	-
1.998	Janeiro	130	790	41	1690
	Fevereiro	-	-	-	-

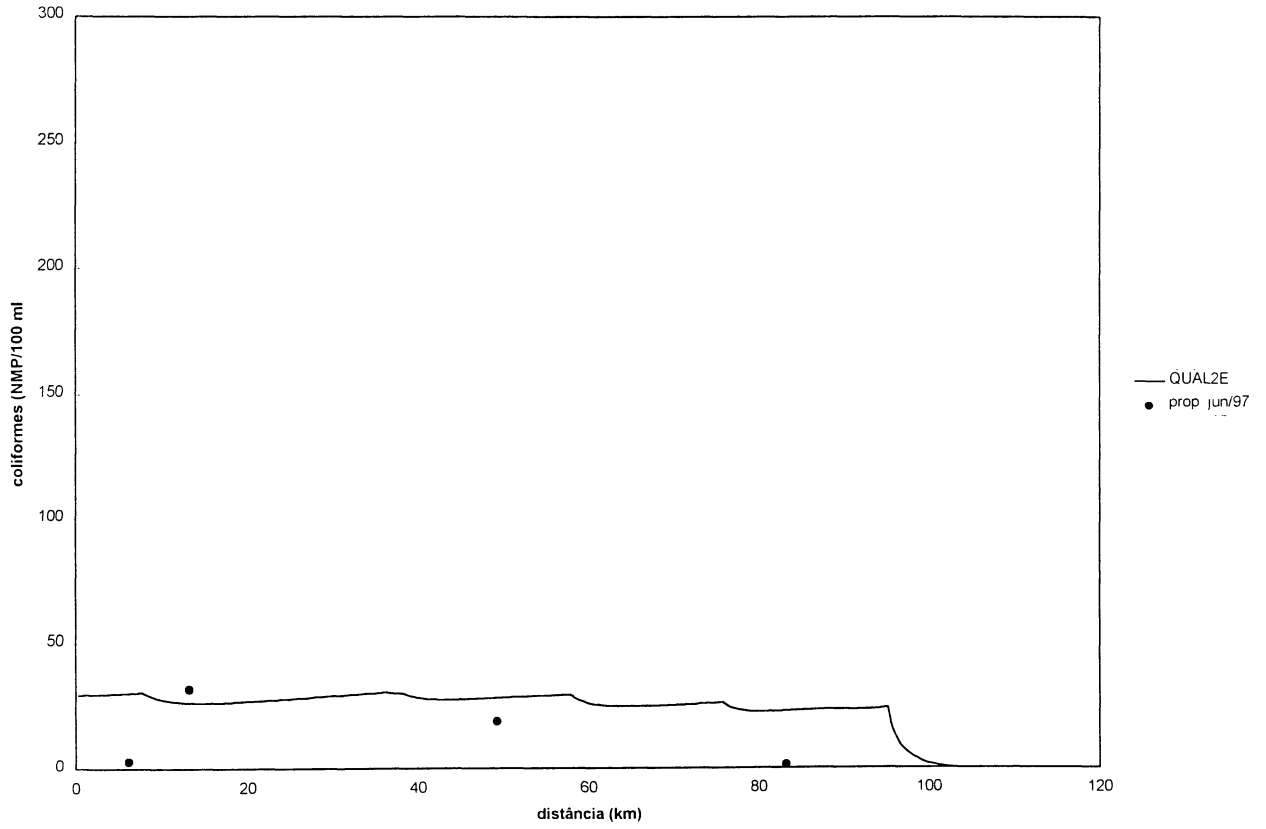


Figura 72

- Gráfico Coliformes x Distância (Fevereiro/1997) -

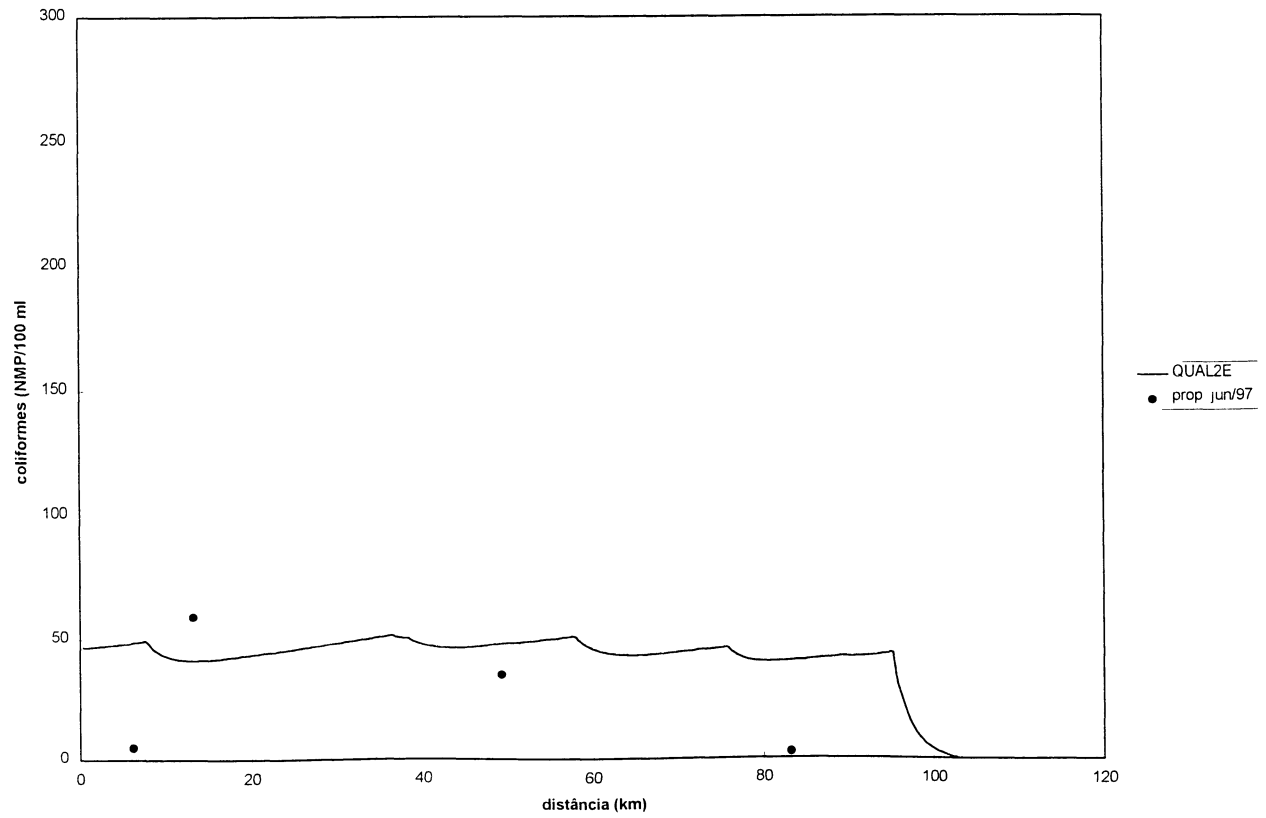


Figura 73

- Gráfico Coliformes x Distância (Março/1997) -

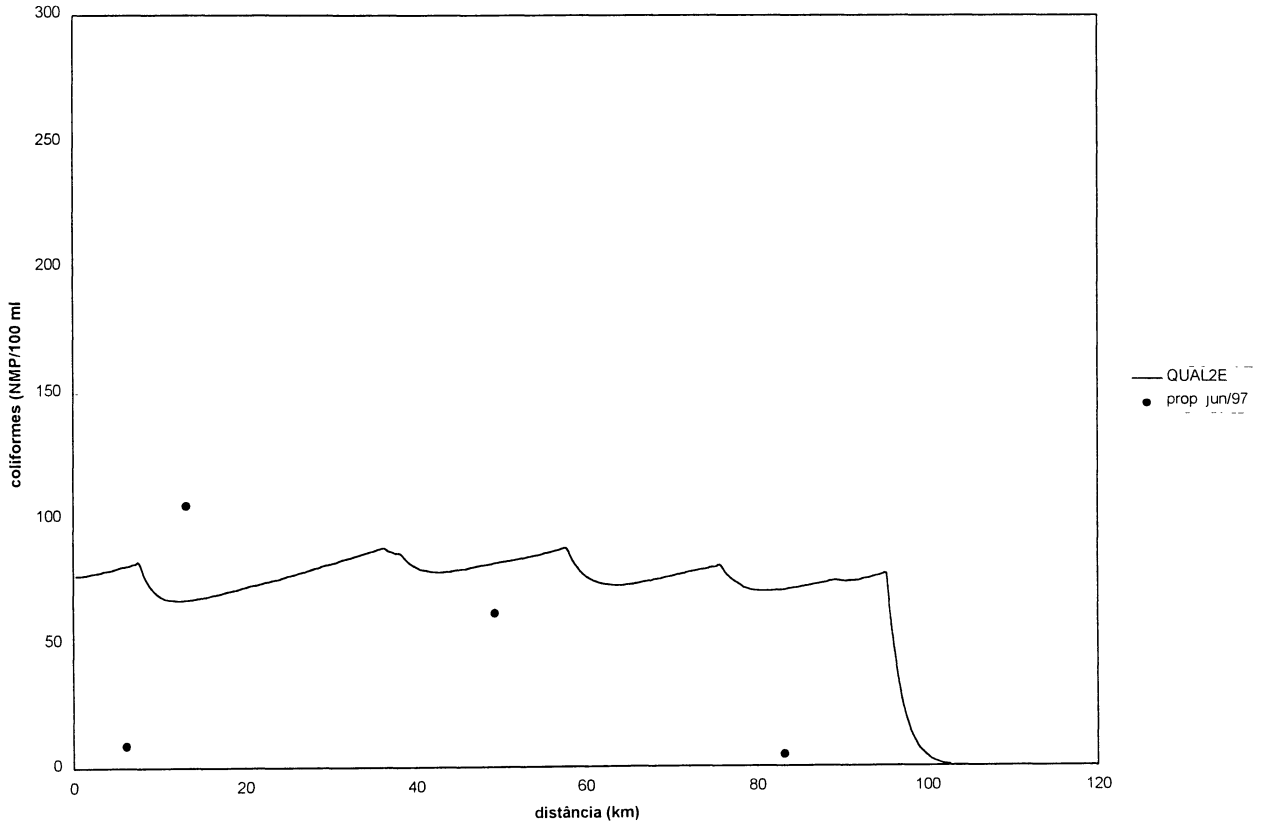


Figura 74

- Gráfico Coliformes x Distância (Abril/1997) -

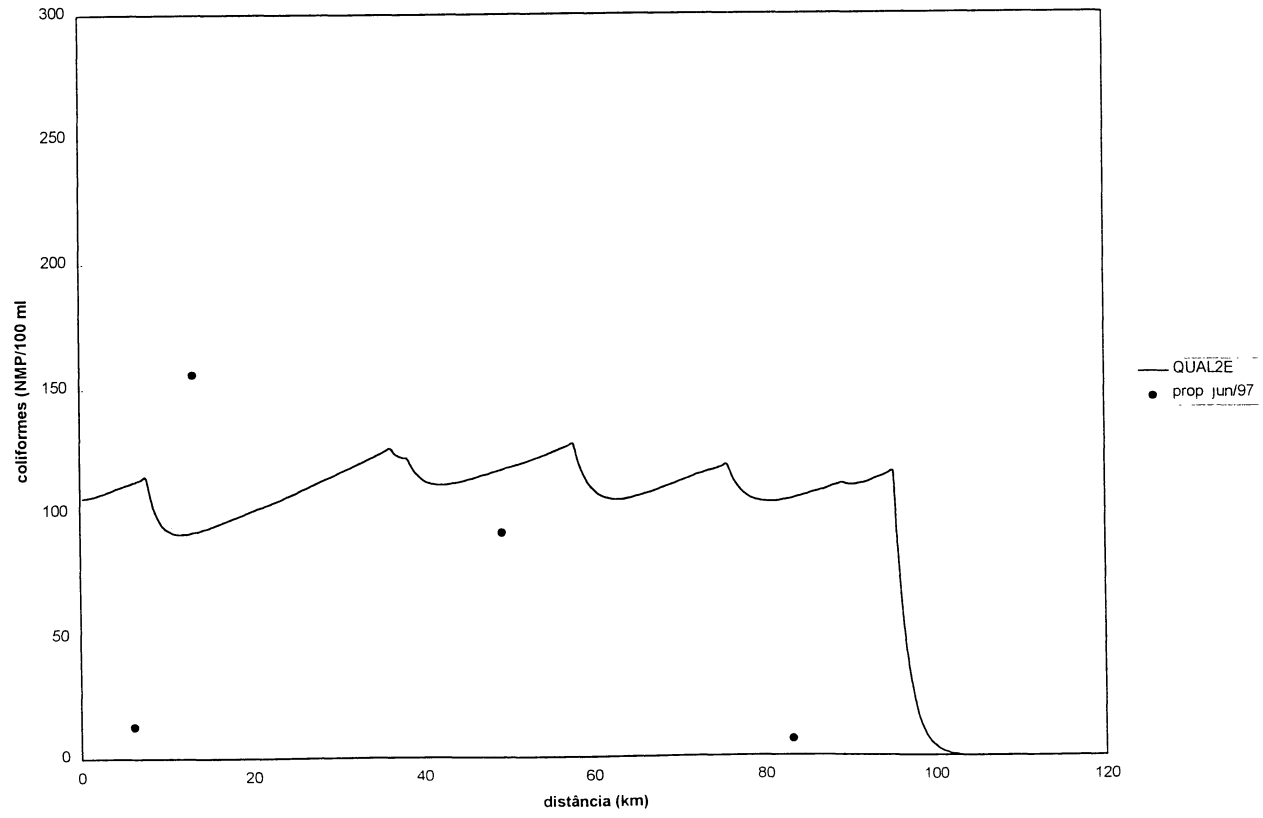


Figura 75

- Gráfico Coliformes x Distância (Maio/1997) -

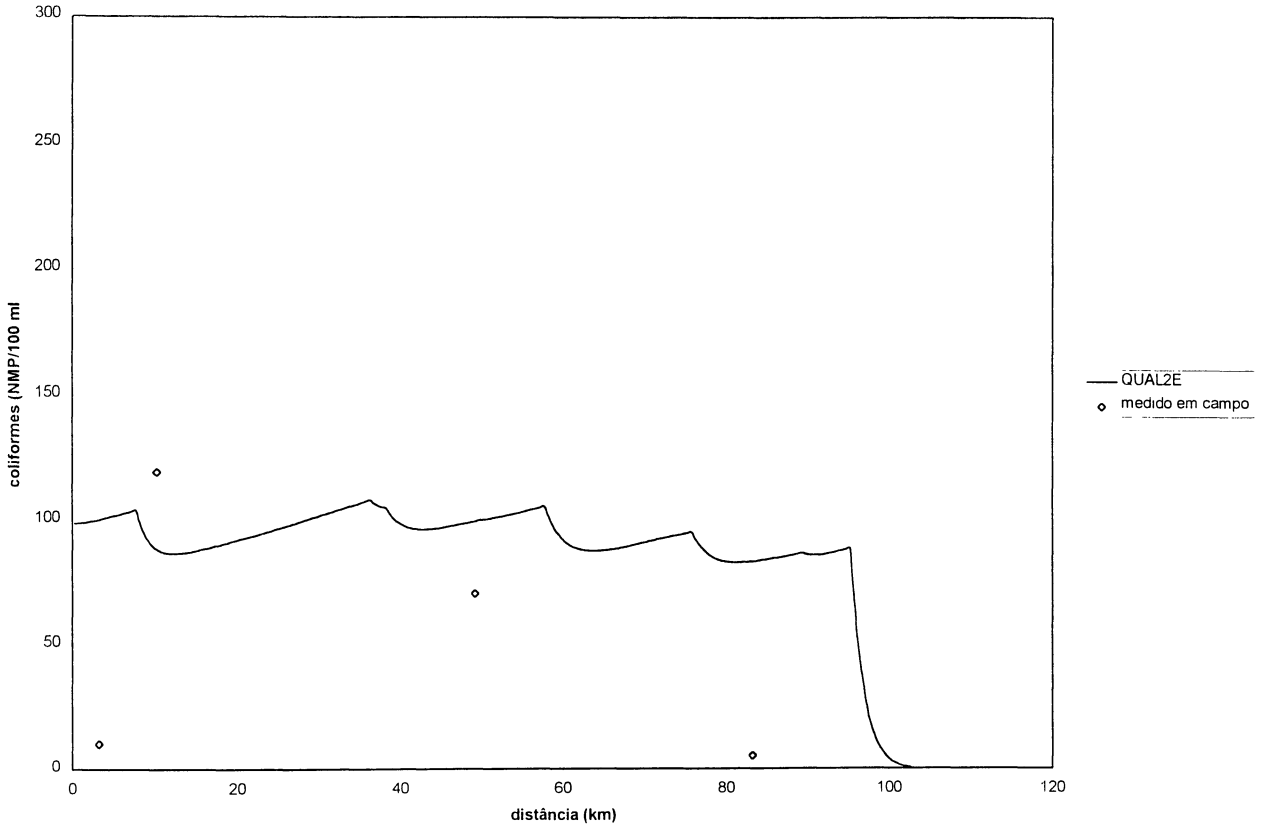


Figura 76

- Gráfico Coliformes x Distância (Junho/1997) -

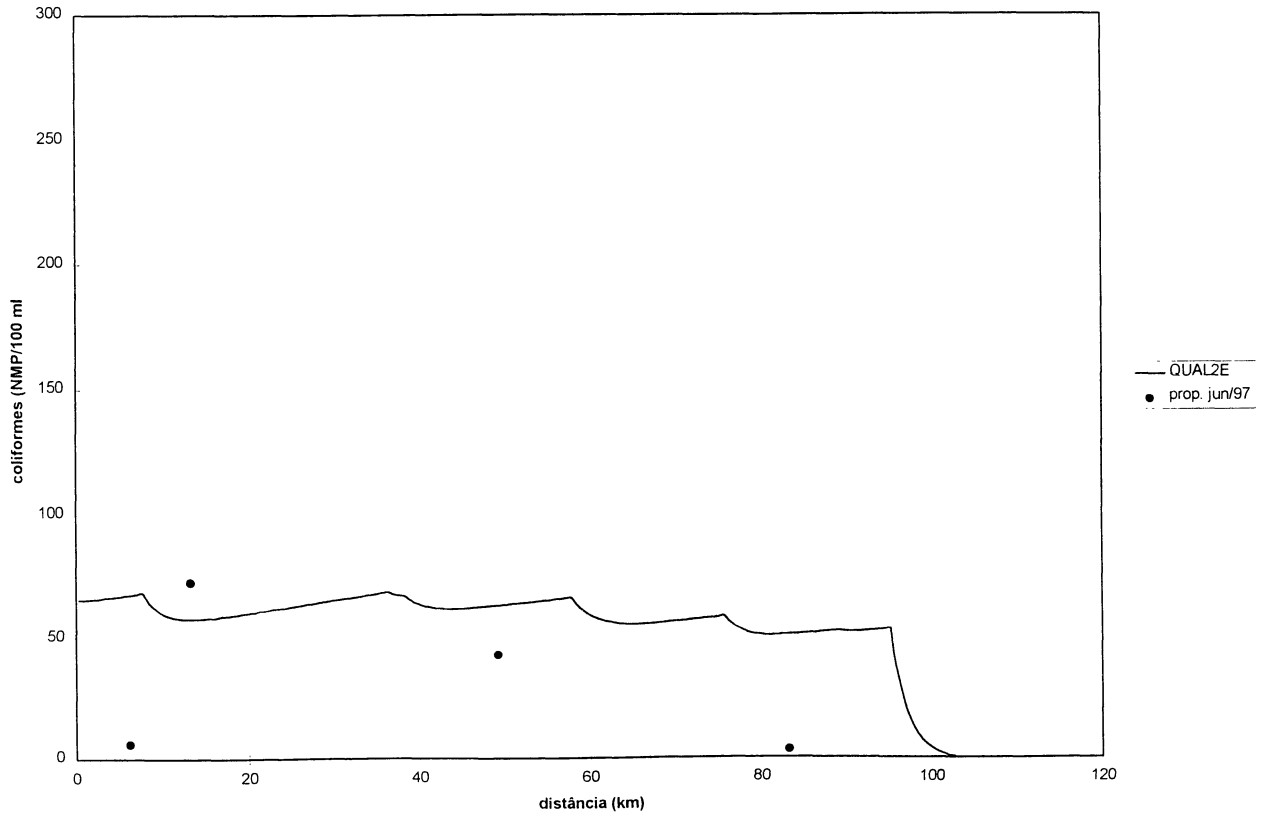


Figura 77

- Gráfico Coliformes x Distância (Julho/1997) -

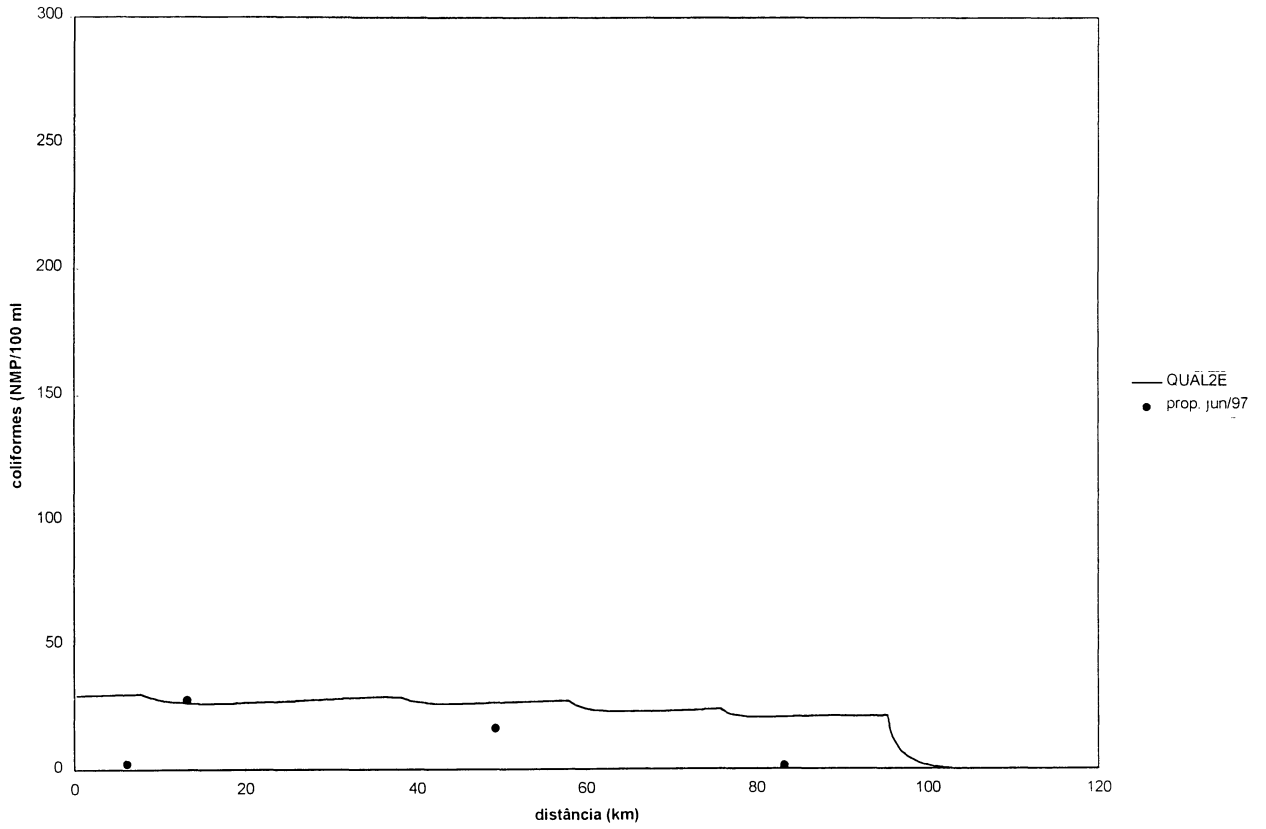


Figura 78

- Gráfico Coliformes x Distância (Agosto/1997) -

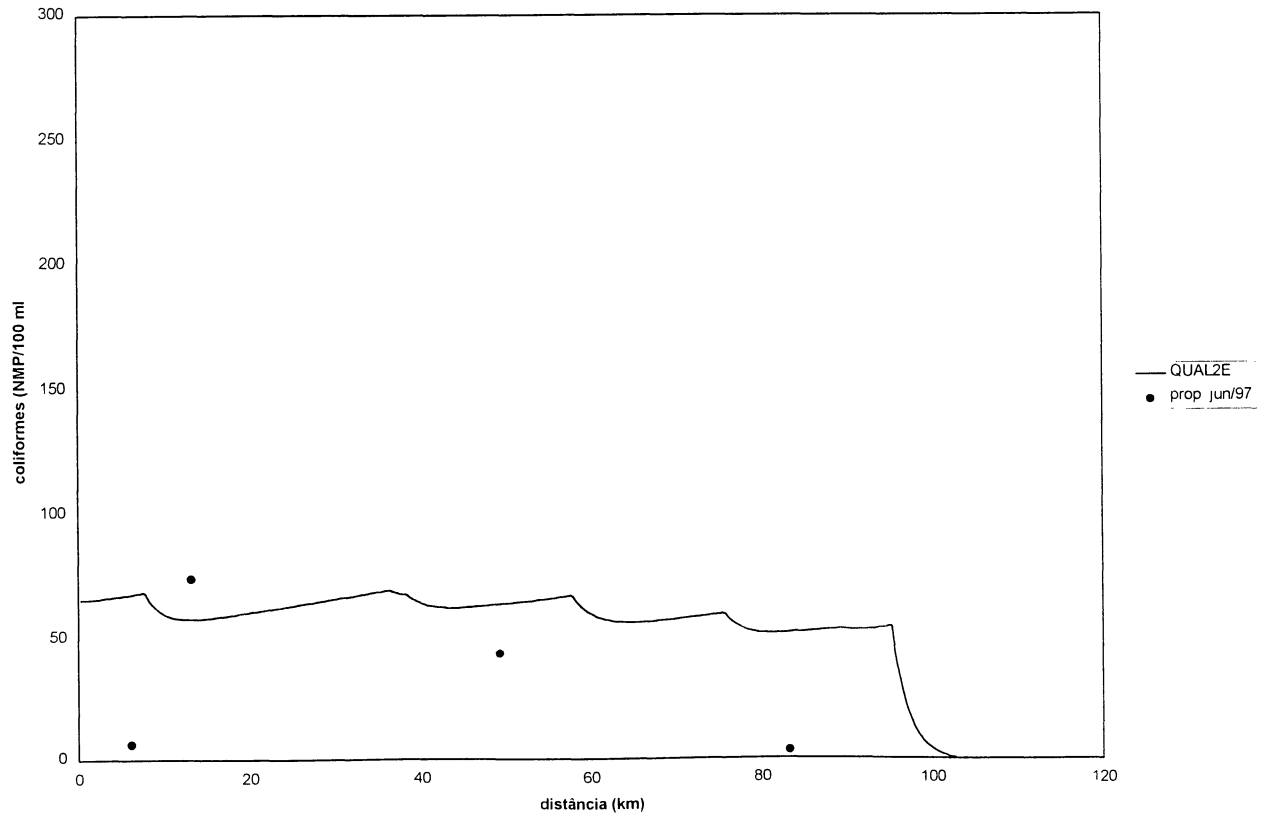


Figura 79

- Gráfico Coliformes x Distância (Setembro/1997) -

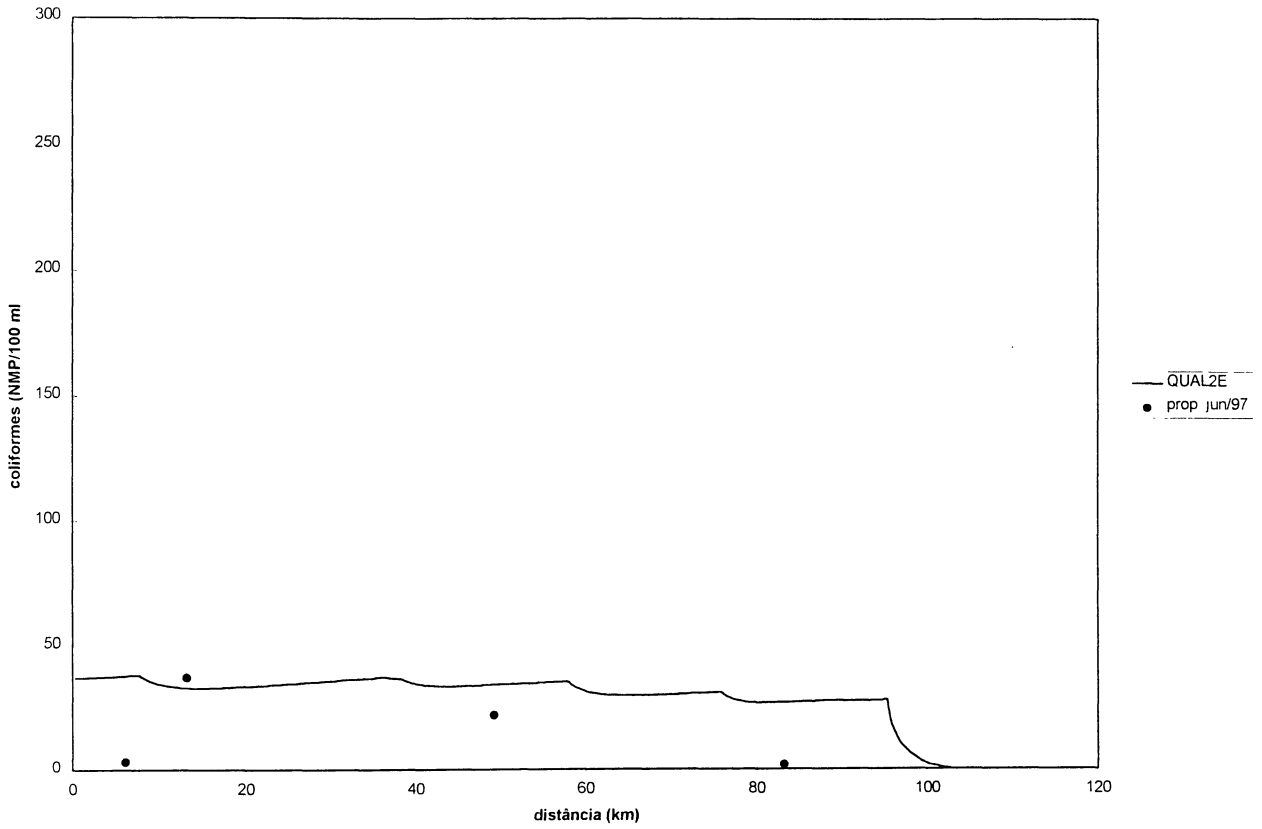


Figura 80

- Gráfico Coliformes x Distância (Outubro/1997) -

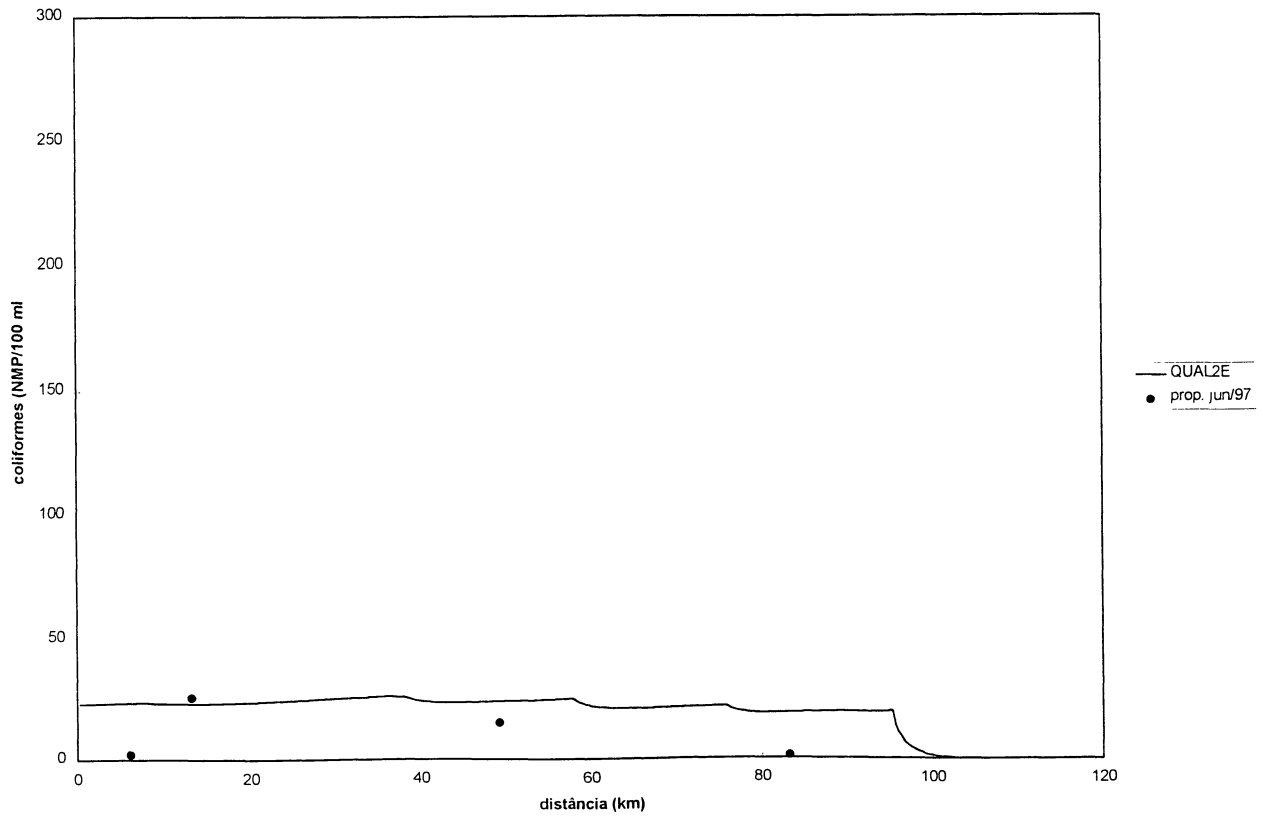


Figura 81

- Gráfico Coliformes x Distância (Novembro/1997) -

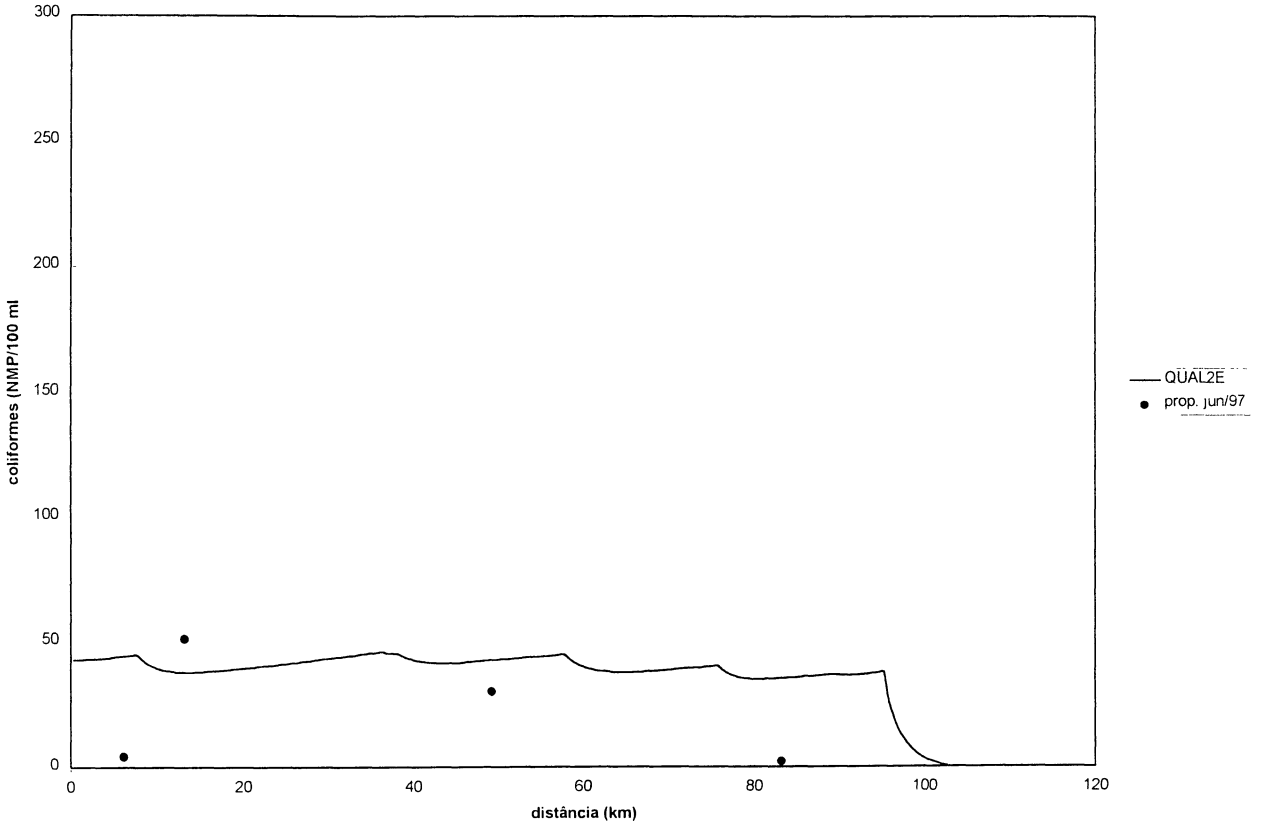


Figura 82

- Gráfico Coliformes x Distância (Dezembro/1997) -

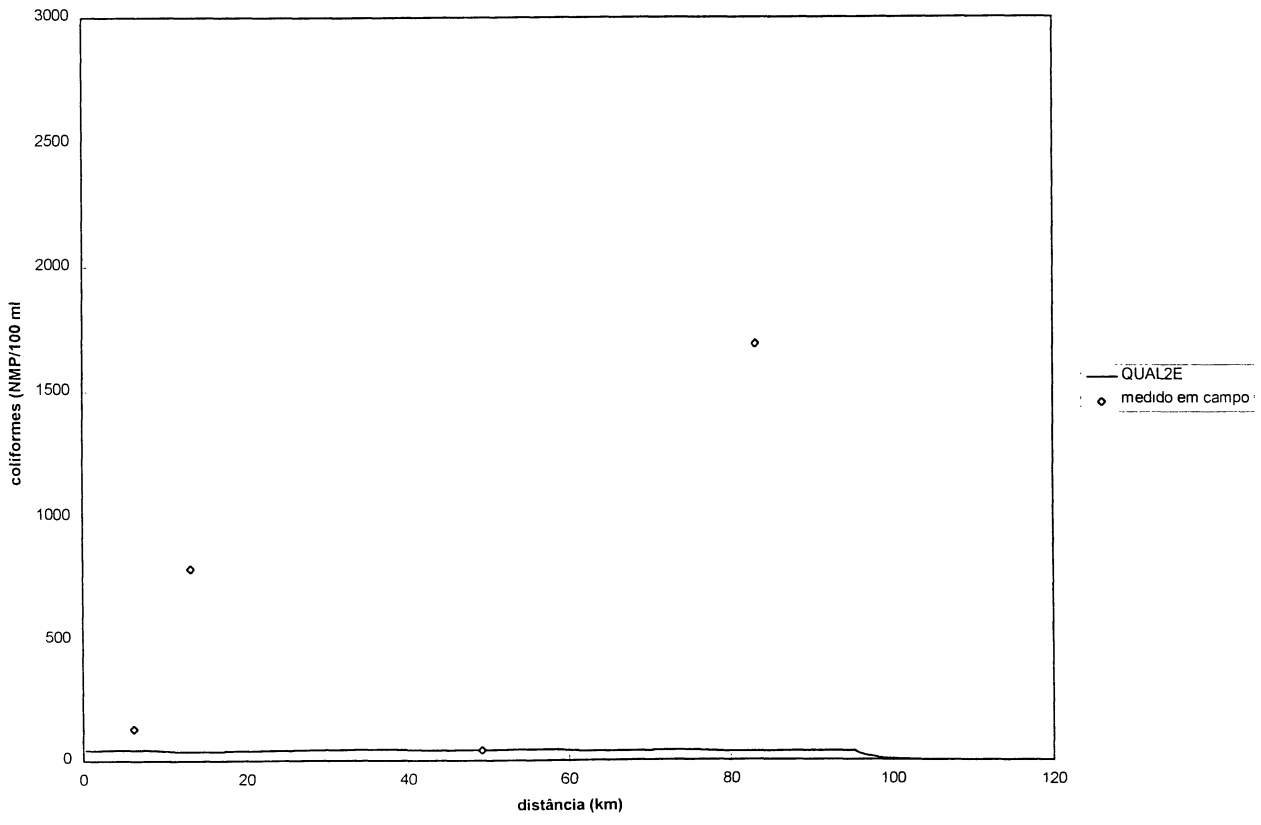


Figura 83

- Gráfico Coliformes x Distância (Janeiro/1998) -

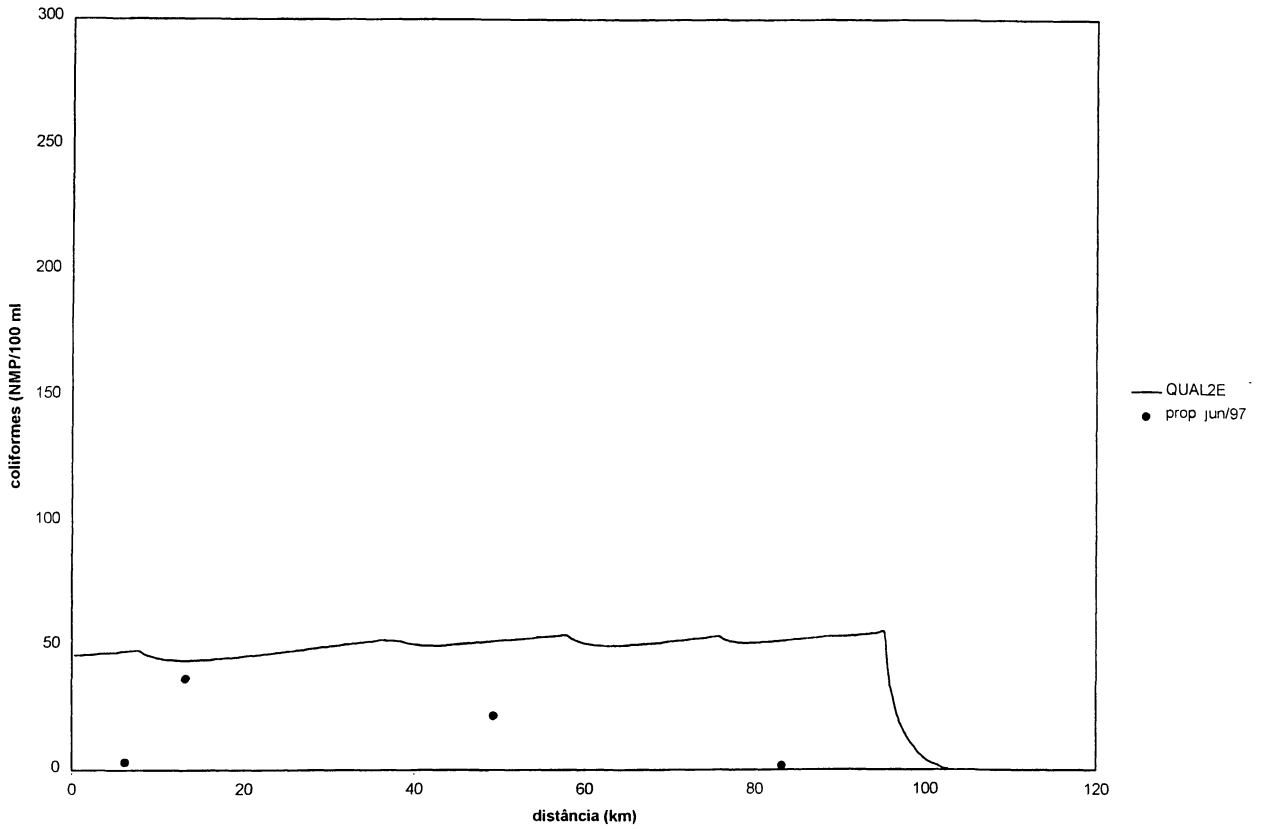


Figura 84

- Gráfico Coliformes x Distância (Fevereiro/1998) -

Os gráficos de coliformes mostraram resultados satisfatórios. Outra vez pode-se observar que o ponto P03 apresenta valores medidos superiores aos resultados obtidos com o uso do QUAL2E, o que mostra ser um resultado coerente, em função do aumento da população no local da obra, que não foi considerado quando do cálculo de coliformes devido à ocupação humana na bacia.

Com relação ao valor nulo do valor de coliformes no elemento de cabeceira é importante lembrar que a vazão do tramo 1 é a vazão efluente do reservatório de Salto Osório, que apresenta um tempo de residência de aproximadamente 13 dias. Assim, mesmo para valores altos da concentração de coliformes na vazão afluente ao reservatório, esta concentração é próxima de zero quando da saída do reservatório. Como exemplo, mesmo para valores altos de concentração de coliformes na entrada do reservatório de Salto Osório, o valor efluente é muito pequeno, podendo ser considerado nulo:

$C = ?$

$C_0 = 100\ \%$

$k_b = 0{,}8/\text{dia}$

$t = 13$ dias

$$C = C_0 e^{-kt}$$

$$C = 100\ e^{-0{,}8*13}$$

$$C = 0{,}00304$$

$$\Rightarrow C \approx 0{,}003\ \%\ \text{do valor inicial}$$

ou:

$$C = C_0\ e^{-0{,}8*13}$$

$$C \approx \frac{C_0}{33.000}$$

9 . 3 SIMULAÇÃO DE FÓSFORO

A ocorrência de fósforo em águas naturais e de despejo se dá quase somente sob a forma de fosfatos. Estes fosfatos são classificados como ortofosfatos, fosfatos condensados e fosfatos orgânicos. Os fosfatos são originários de diversas fontes: produtos utilizados para o tratamento de água, produtos utilizados na limpeza doméstica, fertilizantes, dejetos humanos e de animais, resíduos de alimentos.

O fósforo é essencial ao crescimento de plantas e pode ser considerado o nutriente que limita a produção primária de um corpo de água. O fósforo e o nitrogênio constituem-se nos principais micronutrientes minerais responsáveis pelo processo de eutrofização de rios, lagos e reservatórios.

O processo utilizado na simulação é semelhante ao que foi feito com coliformes. Optou-se, no presente estudo, pela simulação apenas do fósforo orgânico oriundo da ocupação humana na bacia, sendo utilizada a carga de 2,7 g/hab.dia (Fernandes, 1997). Como não se dispunha de um valor inicial para a taxa de decaimento de fósforo, k_p, foram feitas diversas simulações, com os valores de k_p iguais a 0,01 (limite inferior aceito pelo programa) e 0,7 (limite superior aceito pelo programa).

No QUAL2E, informou-se inicialmente apenas a carga de fósforo na foz dos afluentes, da mesma forma que foi feito com coliformes, sendo a carga de fósforo existente no rio Iguaçu e na vazão incremental adotada como zero. Como os resultados obtidos não foram satisfatórios, decidiu-se testar um valor constante de fósforo (em mg/l) na vazão incremental por tramo. Os resultados obtidos estão apresentados na seqüência, nas figuras 85 a 90. Foram simulados apenas os meses de maio/1997 (que apresentou a vazão mais baixa no período em estudo, 827,53 m^3/s), novembro/1997 (que apresentou a vazão mais alta, 5.060,78 m^3/s) e janeiro/1998 (que corresponde aproximadamente ao valor da vazão média no período, 2.561,48 m^3/s).

Os valores medidos em campo foram comparados com os valores simulados de acordo com a seguinte metodologia:

- dispunha-se de valores medidos em campo de fósforo total, fósforo reativo e fósforo dissolvido, sendo válidas as seguintes reações:

$$\text{P total} = \text{P orgânico total} + \text{P inorgânico total} \qquad (9.3.1)$$

$$\text{P orgânico total} = \text{P orgânico em suspensão} + \text{P orgânico dissolvido} \qquad (9.3.2)$$

$$\text{P inorgânico total} = \text{P inorgânico em suspensão} + \text{P inorgânico dissolvido} \quad (9.3.3)$$

$$\text{P reativo} = \text{P inorgânico dissolvido} \quad (9.3.4)$$

$$\text{P orgânico} = \text{P total} - \text{P inorgânico em suspensão} - \text{P reativo} \quad (9.3.5)$$

- como não se dispunha do valor do fósforo inorgânico em suspensão, este foi considerado como sendo nulo, uma vez que o valor deve ser muito baixo, pois os valores de fósforo reativo são muito baixos.

Para esta nova simulação serão necessárias as seguintes alterações:

Tela 04 - Definição de parâmetros a simular

Deverá ser incluído o parâmetro ciclo do fósforo (phosphorus cycle).

Tela 13 - Coeficientes de Reação de N, P e algas

Nesta tela deve ser informado o valor utilizado para a taxa de decaimento de fósforo orgânico (O-P decay, em 1/dia), sendo utilizados valores de 0,01 e 0,7, conforme explicado anteriormente. As demais colunas referentes ao ciclo do fósforo (O-P settling e DIS-P benthos) permanecem com valor nulo.

Tela 14 - Condições Iniciais Estimadas do Rio

Optou-se, tendo em vista os dados disponíveis, por informar apenas o valor de fósforo afluente ao rio Iguaçu.

Tela 15 - Vazões Incrementais por Tramo

Inicialmente, o valor da carga de fósforo das vazões incrementais também foi adotado como sendo igual a zero. Como os resultados não foram satisfatórios, foram feitas diversas simulações, sendo os resultados apresentados no item seguinte.

Tela 16 - Dados das Cabeceiras dos Rios

O valor da carga de fósforo para a cabeceira foi adotado igual a zero, lembrando as considerações a respeito de coliformes fecais para a vazão efluente de Salto Osório.

Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes

O valor da carga por afluente encontra-se na tabela 29.

Tabela 31

- Concentração de fósforo nos afluentes (kg/dia) -

Ponto de Lançamento	$k_P = 0,01$	$k_P = 0,7$
Rio Chopim	635,93	145,86
Rio Tormenta	12,27	10,69
Rio Adelaide	26,80	17,38
Rio Jaracatiá	42,12	25,30
Rio Guarani	42,67	29,40
Rio Cotejipe	47,62	31,79
Rio dos Micos	3,29	3,07
Rio Perdido	4,72	3,82
Córrego Luciana	0,25	0,24
Sanga dos Porcos	0,13	0,12

Foi então necessário alterar os valores da tabela 31, cuja unidade é kg/dia, para a unidade utilizada pelo QUAL2E, que é mg/l. A vazão utilizada para esta transformação de unidades é a constante na tabela 25.

O restante das telas do programa QUAL2E permanece sem alterações.

9 . 3 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados em negrito na tabela 32 são os valores que não foram determinados em laboratório, sendo adotados valores proporcionais aos do mês de junho de 1997.

Tabela 32

- Dados das campanhas de coleta → Fósforo -

Local	Data	P total	P reativo	P dissolvido	P orgânico
P01	05/05/97	0,013	0,001	0,007	0,012
	03/11/97	0,060	0,011	0,016	0,049
	07/01/98	**0,026**	**0,006**	**0,016**	**0,020**
P03	07/05/97	0,015	0,000	0,010	0,015
	05/11/97	0,071	0,025	0,020	0,046
	09/01/98	0,048	0,014	0,026	0,034
P07	08/05/97	0,009	0,000	0,018	0,009
	06/11/97	0,041	0,004	0,023	0,037
	10/01/98	0,061	0,006	0,014	0,055
P13	13/05/97	0,012	0,000	0,008	0,012
	11/11/97	**0,030**	**0,005**	**0,015**	**0,025**
	15/01/98	0,034	0,015	0,015	0,019

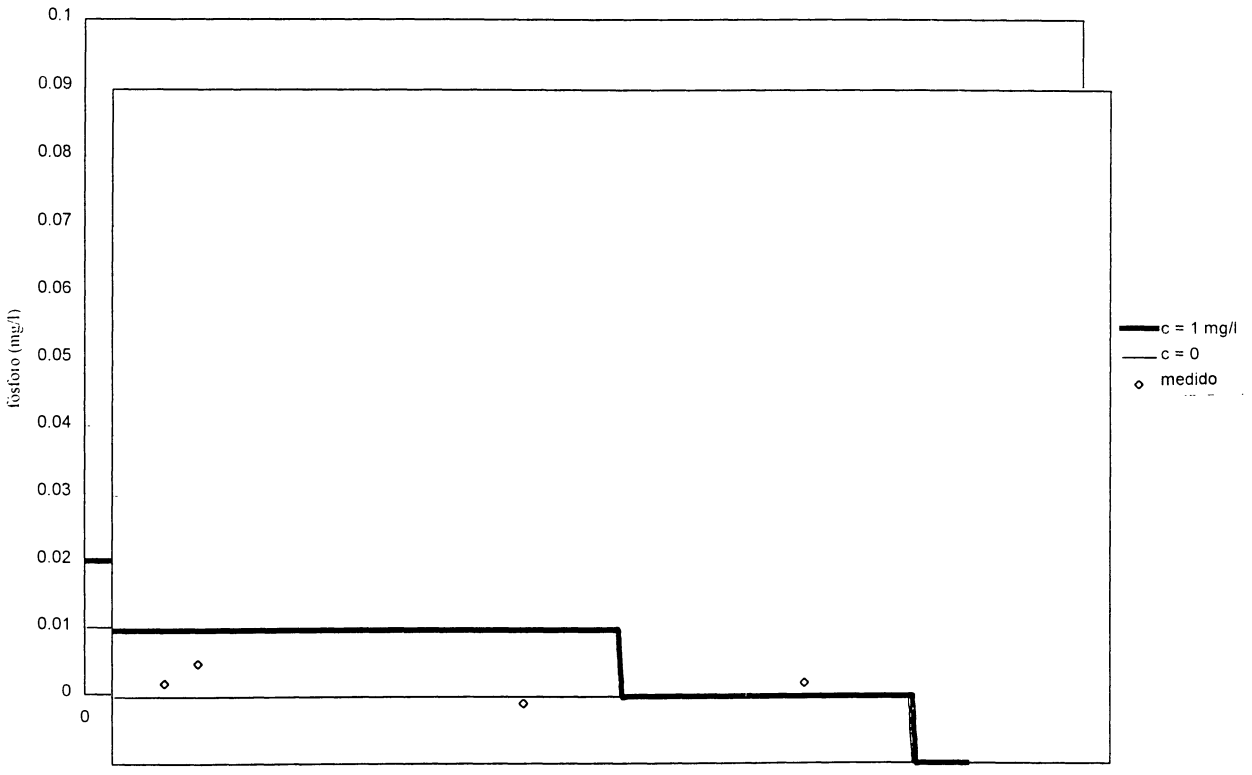


Figura 85

- Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre cargas para $k_p = 0.01$ -

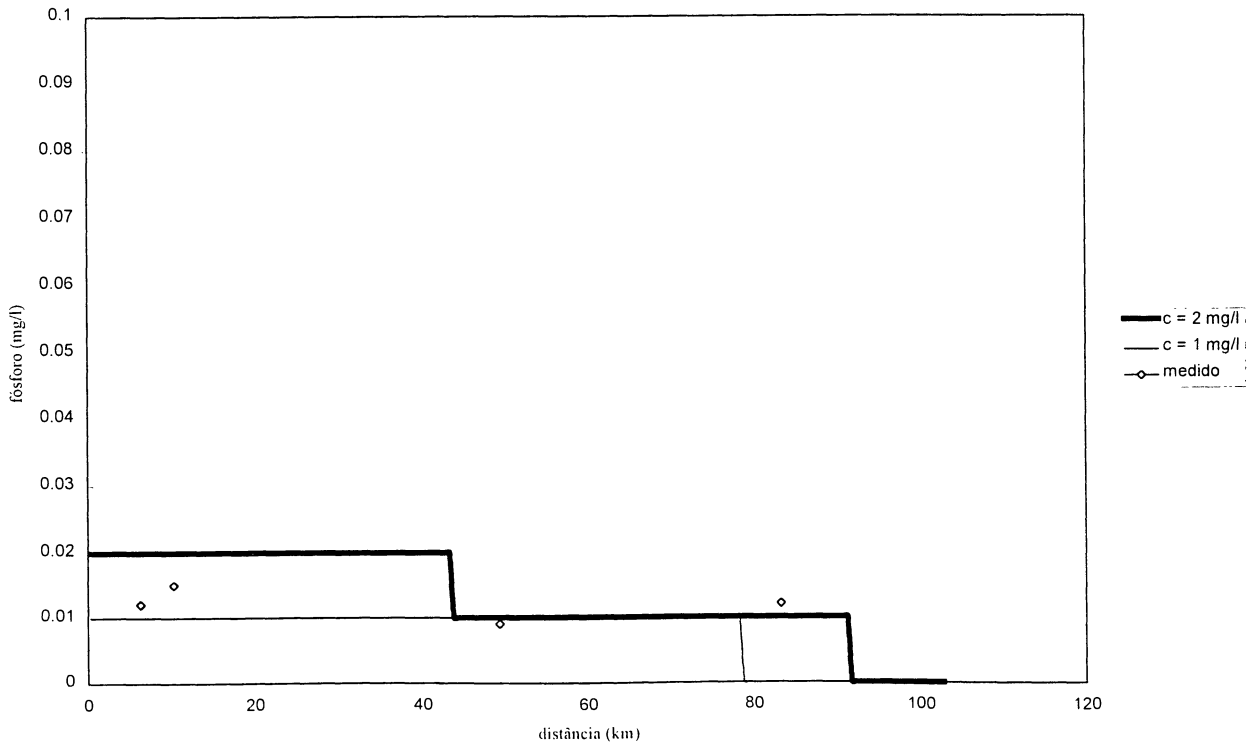


Figura 86

- Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre cargas para $k_p = 0,7$ -

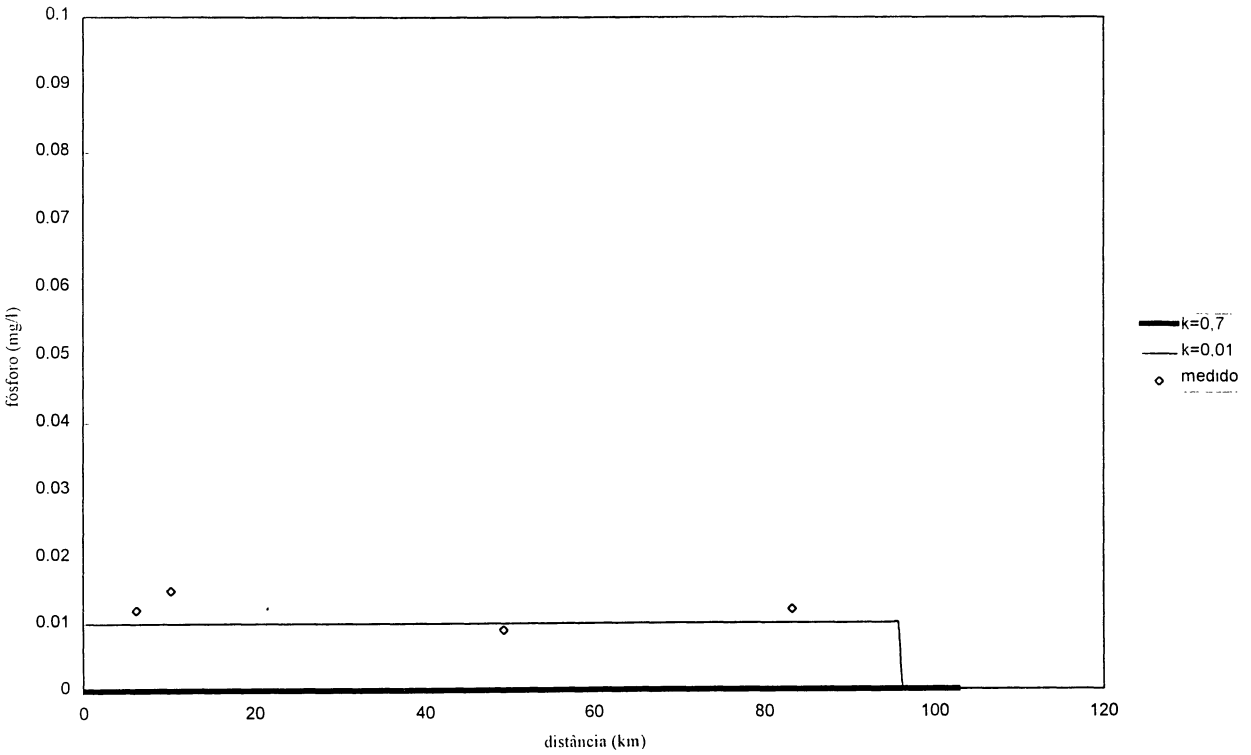


Figura 87

- Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre valores de k_p para c = 0 -

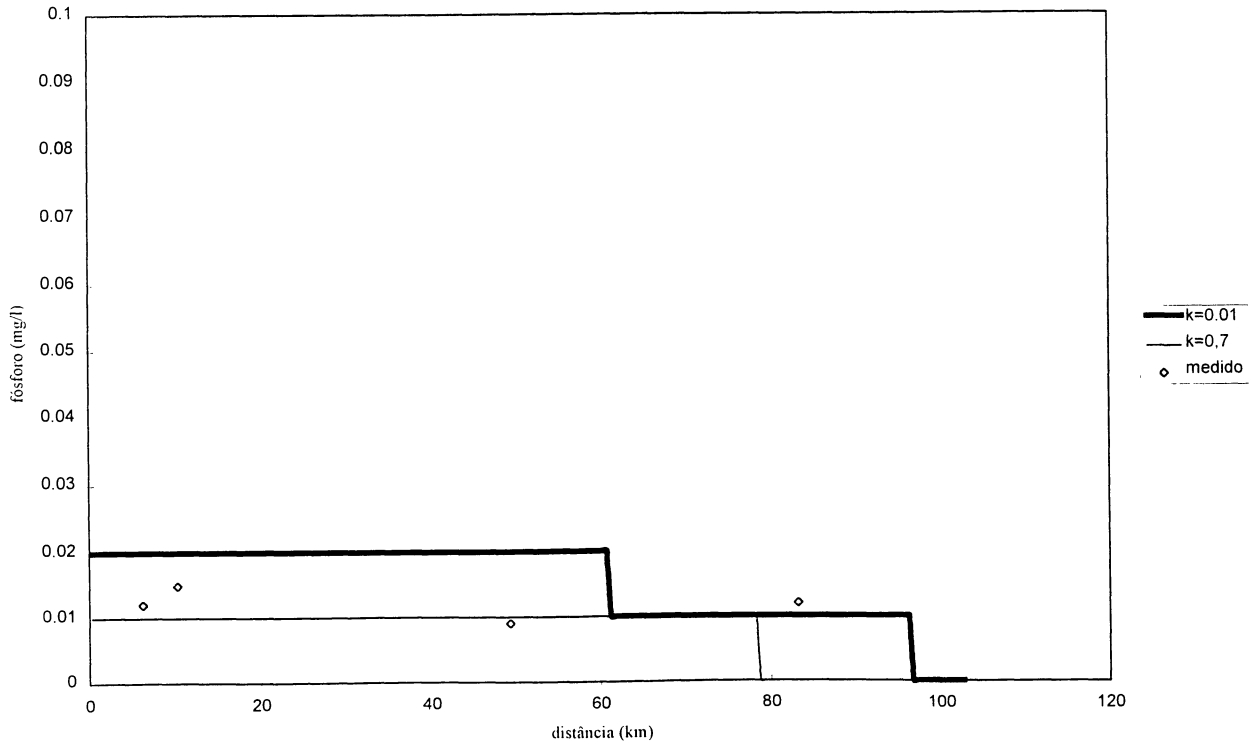


Figura 88

- Gráfico distância x Fósforo (Maio/1997), comparativo entre valores de k_p para c = 1 mg/l -

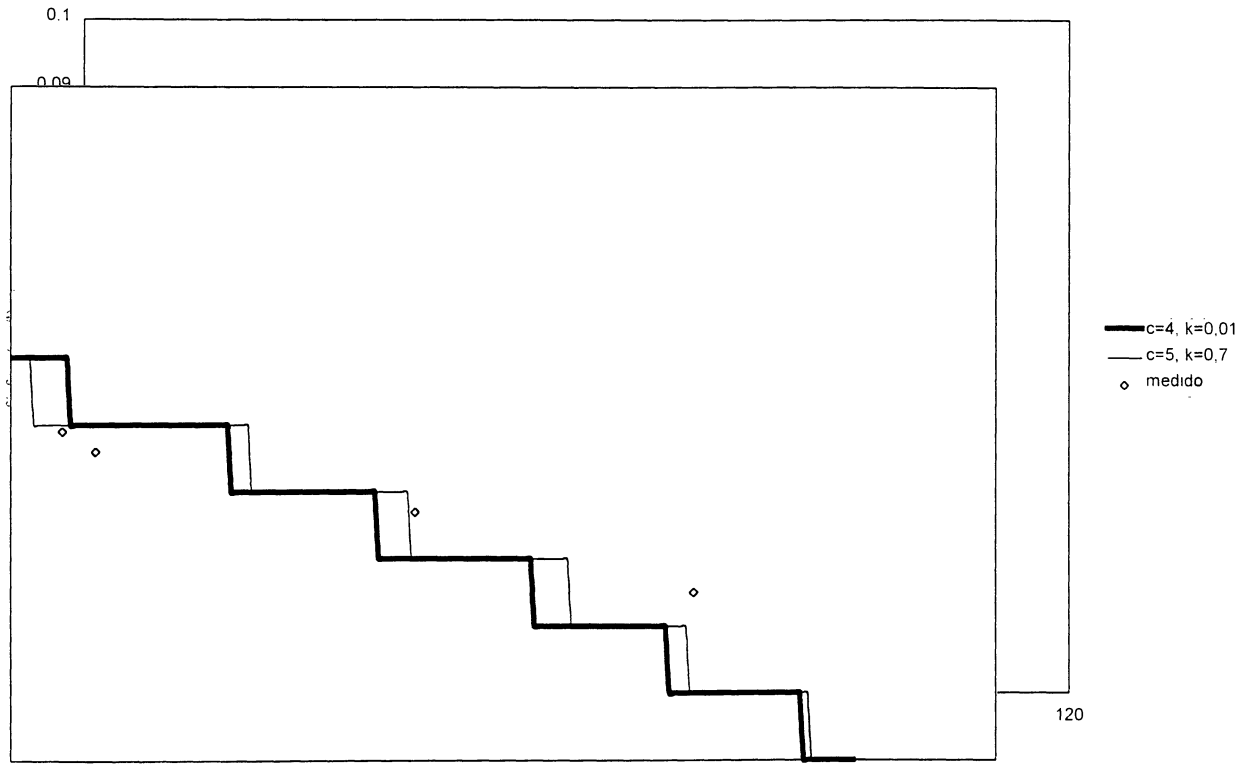


Figura 89

- Gráfico distância x Fósforo (Novembro/1997), c = 4 mg/l e k_p = 0,01, c = 5 mg/l e k_p = 0,7 -

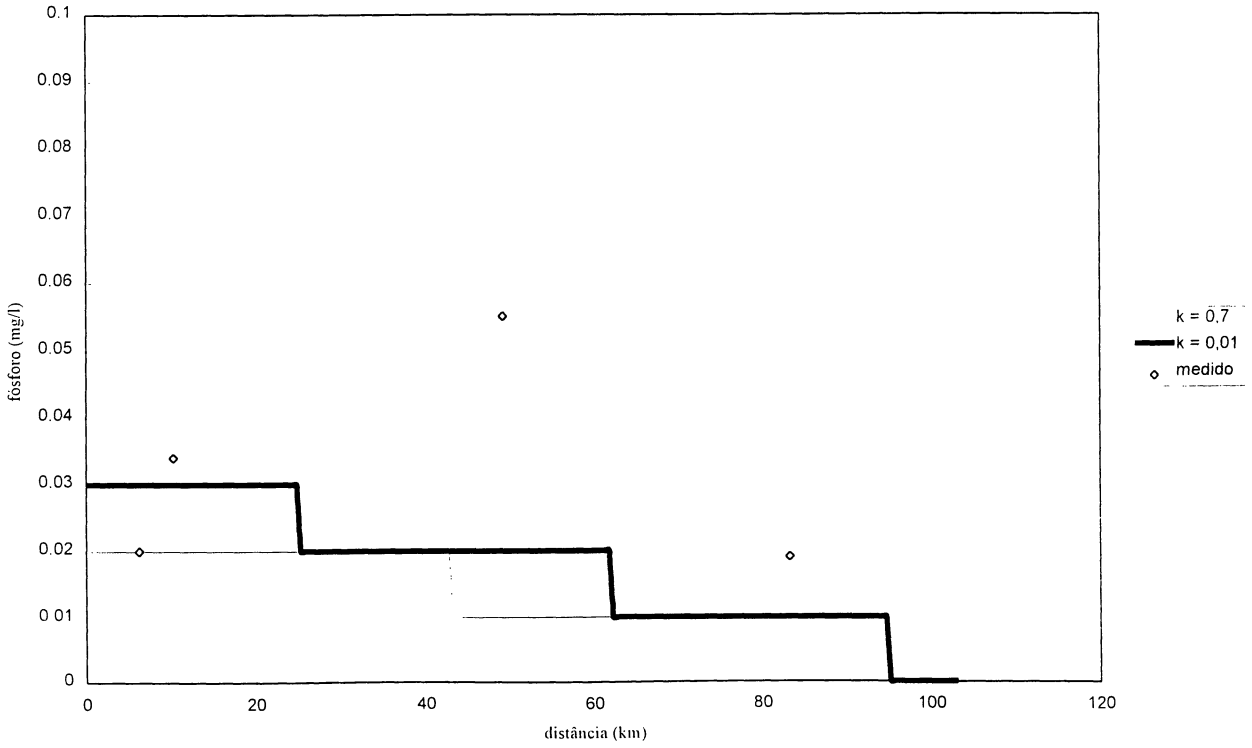


Figura 90

- Gráfico distância x Fósforo (Janeiro/1998), c = 2 mg/l e k_p = 0,01, c = 2 mg/l e k_p = 0,7 -

Como pode ser observado nos gráficos acima, os melhores resultados obtidos foram:

Para o mês de maio/1997 $\rightarrow$ c = 0 e k_p = 0,01.

Para o mês de novembro/1997 $\rightarrow$ c = 5 mg/l e k_p = 0,7.

Como o mês de maio é o que apresenta vazão mais baixa, é correto supor-se que não exista carga oriunda da ocupação do solo por animais e agricultura, ou seja, a carga difusa pode ser considerada nula. Já o mês de novembro é o que apresenta a maior vazão, ou seja, a contribuição de carga difusa é significativa, o que pode ser observado pela adoção de uma carga na vazão incremental de 5 mg/l. Esta carga é decorrente do uso de fertilizantes e adubos, além do fósforo existente no próprio solo e de esterco proveniente da criação de animais domésticos. O mês de janeiro/1998, correspondente a uma vazão média não apresentou resultados satisfatórios para nenhuma das hipóteses formuladas, sendo os melhores resultados encontrados apresentados no gráfico da figura 90.

Já com relação à atividade pecuária, com base nos dados fornecidos pelo Ipardes e valores encontrados em literatura (referências 41 a 50):

Rebanho existente na região: bovinos..... 536.690 cabeças
eqüinos..... 21.196 cabeças
galinhas..... 15.959.950 cabeças
ovinos..... 49.484 cabeças
suínos..... 348.599 cabeças

a) Bovinos

Tabela 33

- Valores de nitrogênio e fósforo - bovinos (gado de corte) -

gado de corte	peso (kg)	N (nitrogênio) (kg/dia)	P (fósforo) (kg/dia
	227	0,08	0,02
	340	0,12	0,04
	453	0,15	0,05
	567	0,20	0,05
	vacas	0,16	0,05

Tabela 34

- Valores de nitrogênio e fósforo - bovinos (gado leiteiro) -

gado leiteiro	peso (kg)	N (nitrogênio) (kg/dia)	P (fósforo) (kg/dia
	68	0,03	0,005
	113	0,05	0,010
	226	0,09	0,021
	454	0,19	0,043
	635	0,26	0,059

Partindo da suposição que metade do rebanho bovino é formado por gado de corte (adotado valor médio de 0,14 kg/dia para nitrogênio e 0,04 kg/dia para fósforo) e a outra metade por gado leiteiro (adotado valor de 0,19 kg/dia para nitrogênio e 0,043 kg/dia para fósforo), a carga total é:

nitrogênio: carga total = (536.690 / 2) * (0,19 + 0,14)

= 88.554 kg/dia

fósforo: carga total = (536.690 / 2) * (0,04 + 0,043)

= 22.273 kg/dia

b) Galinhas

Tabela 35

- Valores de nitrogênio e fósforo - galinhas -

	N (nitrogênio) (kg/dia)	P (fósforo) (kg/dia
poedeiras	0,0015	0,0005
10 - 12 semanas	0,0011	0,0003
adultas	0,1406	0,0327

Utilizando-se a carga de 0,0011 kg/dia para nitrogênio e de 0,0003 kg/dia para fósforo, temos:

nitrogênio: carga total = 15.950.950 * 0.0011

= 17.546 kg/dia

fósforo: carga total = 15.950.950 * 0,0003

= 4.785 kg/dia

c) Ovinos

Tabela 36

- Valores de nitrogênio e fósforo - ovinos -

N (nitrogênio) (kg/dia)	P (fósforo) (kg/dia
0,0204	0,0030

nitrogênio: carga total = 49.484 * 0.0204

= 1.009 kg/dia

fósforo: carga total = 40.484 * 0,0030

= 148 kg/dia

d) Suínos

Tabela 37

- Valores de nitrogênio e fósforo - suínos -

	N (nitrogênio) (kg/dia)	P (fósforo) (kg/dia
fêmea com ninhada	0,0082	0,0024
em crescimento	0,0154	0,0045
adulto	0,0472	0,0163
prenha	0,0313	0,0104
ninhada	0,0454	0,0141
macho	0,0367	0,0104

Adotando uma média dos valores acima temos:

nitrogênio: carga total = 348.599 * 0,0307

= 10.702 kg/dia

fósforo: carga total = 348.599 * 0,0097

= 3.3381 kg/dia

e) Eqüinos

Como não se dispunha de dados para esse tipo de rebanho, adotou-se uma relação proporcional aos valores encontrados para os outros rebanhos, com base nos dados de nitrogênio total e fósforo total.

Tabela 38

- Valores de nitrogênio total para diversos tipos de rebanho -

Rebanho	N total (kg/dia)
eqüinos	0,136
suínos	0,236
ovinos	0,190
gado de corte	0,154
gado leiteiro	0,202

Como o valor de nitrogênio total para eqüinos é próximo do valor para gado de corte, adotou-se este valor para se obter, proporcionalmente, o valor de nitrogênio para eqüinos:

nitrogênio (eqüinos) = (0,14 * 0,136) / 0,154 = 0,124 kg/dia

Tabela 39

- Valores de fósforo total para diversos tipos de rebanho -

Rebanho	P total (kg/dia)
eqüinos	0,032
suínos	0,082
ovinos	0,039
gado de corte	0,042
gado leiteiro	0,043

fósforo (eqüinos) = (0.04 * 0,032) / 0,042 = 0,0304 kg/dia

Assim:

nitrogênio: carga total = 21.196 * 0,124

= 2.628 kg/dia

fósforo: carga total = 21.196 * 0,0304

= 644 kg/dia

Levando-se em conta os resultados obtidos nos itens a até e, temos como resultado final os valores constantes na tabela 39.

Tabela 40

- Valores totais de nitrogênio e fósforo -

	Nitrogênio	Fósforo
bovinos	88.554	22.273
galinhas	17.546	4.785
ovinos	1.009	148
suínos	10.702	3.381
eqüinos	2.628	644
TOTAL	**120.439**	**31.231**

Como a área de drenagem existente entre Salto Caxias e Salto Osório é de 11.200 km^2, temos para o mês de novembro (vazão de 5.060,78 m^3/s):

→ nitrogênio:

120.439 kg/dia ÷ 11.200 km^2 = 0,000124 kg/s.km^2

5.060,78 m^3/s ÷ 57.000 km^2 = 0,0888 $m^3/s.km^2$

$$0{,}000124 \div 0{,}0888 = \mathbf{1{,}39\ mg/l}$$

→ fósforo:

$$31.231\ kg/dia \div 11.200\ km^2 = 0{,}000032\ kg/s.km^2$$

$$5.060{,}78\ m^3/s \div 57.000\ km^2 = 0{,}0888\ m^3/s.km^2$$

$$0.000032 \div 0{,}0888 = \mathbf{0{,}36\ mg/l}$$

Como pode ser observado acima, com relação ao fósforo, o valor obtido de 0,36 mg/l na bacia incremental entre Salto Caxias e Salto Osório é bem inferior ao valor utilizado na simulação no QUAL2E, o que mostra a importância de se determinar mais precisamente as fontes de fósforo na bacia, dando ênfase à poluição decorrente da atividade agrícola, que como explicado anteriormente, não está sendo considerada neste estudo.

Como foi feito o cálculo da carga de fósforo e nitrogênio oriunda da ocupação da bacia pela atividade pecuária, resolveu-se também efetuar os cálculo da alteração nos gráficos de DBO e coliformes decorrente desta atividade. Os seguintes valores foram utilizados (referência 50 e Chapra, 1997):

Tabela 41

- Valores de DBO (pecuária) -

Rebanho	**DBO (kg/cabeça.dia)**
bovino	0,73
eqüino	0,77
suíno	0,46
ovinos	0.16
galinhas	0,02

fonte: referência 50

Tabela 42

- Valores de DBO (pecuária) -

Rebanho	coliformes (x 10^6 /dia)
bovino	5.400
eqüino	5.700
suíno	8.900
ovinos	18.000
galinhas	240

fonte: referência 50

Observação: o valor de coliformes fecais para eqüinos foi aproximado, uma vez que não se dispunha deste dado.

Com os dados das tabelas 41 e 42 acima foram efetuados os seguintes cálculos:

Carga total de DBO na bacia = 895.576,60 kg/dia

895.576,60 ÷ 11.200 = 0,000925 kg/s.km^2

novembro/97:

5.060,78 ÷ 57.000 = 0,0888 m^3/s.km^2

0,000925 ÷ 0,0888 = **10,41 mg/l**

Carga total de coliformes na bacia = 10.842.574.300 x 10^6 NMP/dia

10.842.574.300 ÷ 11.200 = 11,20 x 10^6 NMP/s.km^2

novembro/97:

5.060,78 ÷ 57.000 = 0,0888 m^3/s.km^2

11,20 ÷ 0,0888 = **12.612 NMP/100 ml**

9 . 4 SIMULAÇÃO DE NITROGÊNIO

Em águas naturais e águas de despejo as formas de nitrogênio de maior interesse são, em ordem crescente de estado de oxidação, nitrato, nitrito, amônia e nitrogênio orgânico. Todas estas formas de nitrogênio, assim como o gás nitrogênio (N_2), são bioquimicamente convertidas umas nas outras e são componentes do ciclo do nitrogênio.

O nitrogênio orgânico é definido funcionalmente como nitrogênio organicamente ligado no estado de oxidação trinegativo. Ele não inclui todos os compostos orgânicos de nitrogênio. Analiticamente, o nitrogênio orgânico e a amônia podem ser determinados juntos e são referenciados como nitrogênio de Kjeldahl (ou N total de Kjeldahl), um termo que reflete a técnica utilizada em sua determinação. O nitrogênio orgânico inclui materiais naturais tais como proteínas e peptídeos, ácidos nucleicos e uréia, e numerosos materiais orgânicos sintéticos. As concentrações típicas de nitrogênio orgânico variam entre poucas centenas de microgramas por litro em alguns lagos, até mais de 20 mg/l em esgoto bruto. O nitrogênio oxidado total é a soma do nitrogênio nitrato e do nitrogênio nitrito.

A análise do nitrogênio dá o grau de estabilização da matéria nitrogenada na água ou efluente de esgoto. Os tecidos animais são mais ricos em nitrogênio que os vegetais. As principais formas de nitrogênio presentes na água são:

- *nitrogênio amoniacal (amônia)*: sua determinação deve ser feita sobre a amostra recente, que pode ser conservada a baixa temperatura, próxima do ponto de congelamento, desde a coleta até a análise;

- *nitrogênio orgânico*: o processo de determinação do nitrogênio orgânico (método de Kjeldahl) converte os compostos de nitrogênio de origem biológica (tais como aminoácidos, proteínas e peptídeos) em amônia, **mas não pode converter os compostos nitrogenados de certos resíduos**, tais como aminas, nitrocompostos e hidrazonas, oximas, semicarbazonas e algumas aminas terciárias;

- *nitratos*: a presença de nitrato na água é uma indicação da última etapa da oxidação da matéria nitrogenada. Ele pode indicar poluição com resíduos animais, antes da poluição vegetal, por causa da maior quantidade de nitrogênio presente nos animais e devido à fácil decomposição animal. As águas superficiais de boa qualidade são, em geral, pobres em nitrato em face deste ânion ser facilmente absorvido pela vegetação em crescimento. Altos teores de nitrato (acima de

10 mg/l) em águas utilizadas na alimentação podem causar cianose em crianças pequenas. o que pode inclusive provocar a morte de bebês;

• *nitritos*: o nitrogênio sob a forma de nitrito pode ser devido à redução de nitrato pelo ferro, zinco ou chumbo dos condutos, mas freqüentemente são produtos de oxidação incompleta do nitrogênio orgânico, proteína e amônia. O nitrito muito raramente aparece em concentrações superiores a 1 mg/l, mesmo em efluente de estação de tratamento de esgoto. Sua concentração em águas superficiais ou profundas sempre é inferior à 0,1 mg/l.

O processo utilizado na simulação é semelhante ao que foi feito com coliformes e fósforo. Optou-se, no presente estudo, pela simulação apenas do nitrogênio orgânico oriundo da ocupação humana na bacia, sendo utilizada a carga de 9,8 g/hab.dia (Fernandes, 1997). Como não se dispunha de um valor inicial para a taxa de decaimento de fósforo, k_n, foram feitas diversas simulações, com os valores de k_n iguais a 0,02 (limite inferior aceito pelo programa) e 0,4 (limite superior aceito pelo programa).

No QUAL2E informou-se inicialmente apenas a carga de nitrogênio na foz dos afluentes, da mesma forma que foi feito com coliformes e fósforo, sendo a carga de nitrogênio existente no rio Iguaçu e na vazão incremental adotada como zero. Como os resultados obtidos não foram satisfatórios, decidiu-se testar um valor constante de nitrogênio (em mg/l) na vazão incremental por tramo. Os resultados obtidos estão apresentados na seqüência, nas figuras 91 a 96. Foram novamente simulados apenas os meses de maio/1997, novembro/1997 e janeiro/1998.

Para esta nova simulação serão necessárias as seguintes alterações:

<u>Tela 04</u> - Definição de parâmetros a simular

Deverá ser incluído o parâmetro ciclo do nitrogênio (nitrogen cycle).

<u>Tela 13</u> - Coeficientes de Reação de N, P e algas

Nesta tela deve ser informado o valor utilizado para a taxa de decaimento de nitrogênio orgânico (O-N hydrolysis, em 1/dia), sendo utilizado os valores de 0,02 e 0,4, conforme explicado anteriormente. As demais colunas referentes ao ciclo do nitrogênio (O-N settling, NH3 oxidation, NH3 benthos e NO2 oxidation) permanecem com valor nulo.

Tela 14 - Condições Iniciais Estimadas do Rio

Optou-se, tendo em vista os dados disponíveis, informar apenas o valor de nitrogênio orgânico afluente ao rio Iguaçu.

Tela 15 - Vazões Incrementais por Tramo

Primeiramente, o valor da carga de nitrogênio orgânico das vazões incrementais também foi adotado como sendo igual a zero. Como os resultados não foram satisfatórios, foram feitas diversas simulações, sendo os resultados apresentados no item seguinte.

Tela 16 - Dados das Cabeceiras dos Rios

O valor da carga de nitrogênio orgânico para a cabeceira foi adotado igual a zero.

Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes

O valor da carga por afluente encontra-se na tabela 43.

Tabela 43

- Concentração de nitrogênio nos afluentes (kg/dia) -

Ponto de Lançamento		
	$k_n = 0,02$	$k_n = 0.4$
Rio Chopim	2.116,02	905,01
Rio Tormenta	34,12	31,89
Rio Adelaide	86,99	68,56
Rio Jaracatiá	125,03	102,49
Rio Guarani	130,75	95,97
Rio Cotejipe	144,72	116,92
Rio dos Micos	7,94	7,66
Rio Perdido	4.70	4,19
Córrego Luciana	0,25	0,24
Sanga dos Porcos	0,13	0,12

Foi então necessário alterar os valores da tabela 43, cuja unidade é kg/dia, para a unidade utilizada pelo QUAL2E, que é mg/l. A vazão utilizada para esta transformação de unidades é a constante na tabela 25.

O restante das telas do programa QUAL2E permanecem sem alterações.

9 . 4 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 44

- Dados das campanhas de coleta → nitrogênio -

Local	Data	nitrogênio amoniacal	nitrogênio orgânico de Kjeldahl	nitrogênio total de Kjeldahl
P01	maio/97	0,28	0,35	0,63
	novemb./97	0,32	0,21	0,53
	janeiro/987	0,35	0,42	0,77
P03	maio/97	0,35	0,32	0,67
	novemb./97	0,39	0,32	0,71
	janeiro/98	0,28	0,35	0,63
P07	maio/97	0,21	0,18	0,39
	novemb./97	0,25	0,32	0,57
	janeiro/98	0,32	0,42	0,74
P13	maio/97	0,21	0,28	0,49
	novemb./97	0,32	0,39	0,71
	janeiro/98	0,49	0,53	1,02

Para comparação com os dados obtidos pelas simulações no QUAL2E foram utilizados os valores de nitrogênio orgânico de Kjeldahl, lembrando que este processo deixa de fora algumas fontes de nitrogênio orgânico, conforme descrito anteriormente.

Para o mês de maio foram simulados diversos valores para a carga da vazão incremental, sendo mantido com valor nulo as condições iniciais do rio Iguaçu. Nas figuras 91 e 92 encontram-se plotados os valores obtidos para diversas cargas de nitrogênio na vazão incremental, para k_n = 0,02 (figura 91) e k_n = 0,4 (figura 92).

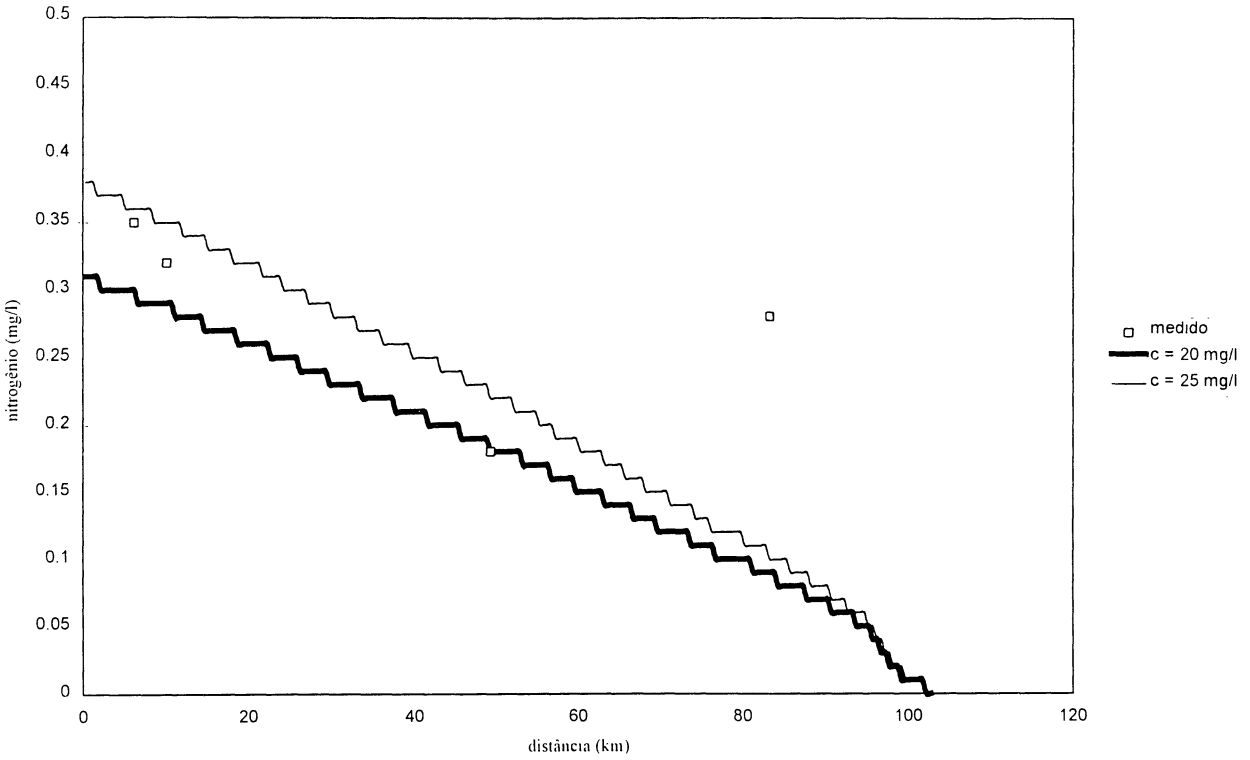


Figura 91

- Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas para k_n = 0,02 -

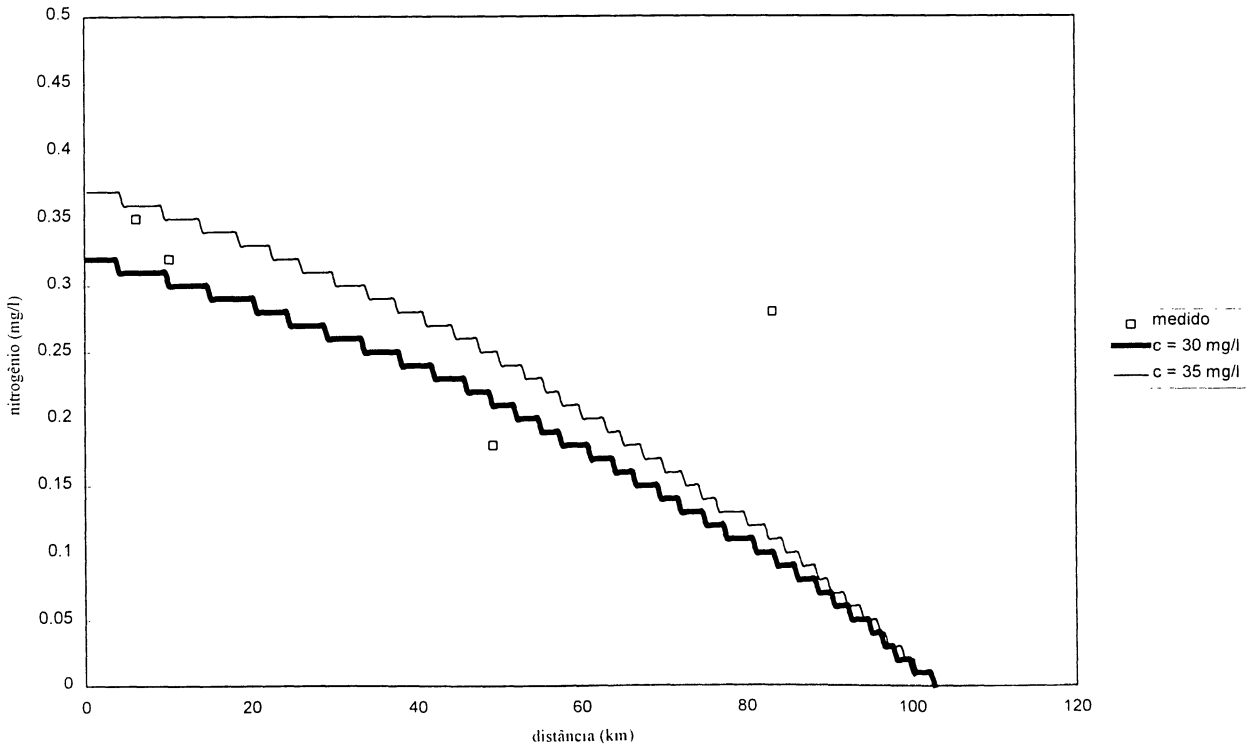


Figura 92

- Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas para k_n = 0,4 -

Para se tentar melhorar os resultados obtidos decidiu-se entrar com carga de nitrogênio nas condições iniciais do rio Iguaçu, no entanto conforme pode ser visto nas figuras 93 e 94 seguintes, os resultados não melhoraram. Nas seguintes simulações os valores encontrados com a aplicação do modelo QUAL2E permaneceram constantes independente da carga inicial testada. Foram testadas cargas de 5 mg/l, 10 mg/l, 15 mg/l e 30 mg/l, sendo obtidos resultados idênticos para cada uma das simulações, tanto no caso de $k_n = 0,02$ quanto $k_n = 0,4$. Os resultados apenas apresentaram modificações quando da alteração da carga da vazão incremental.

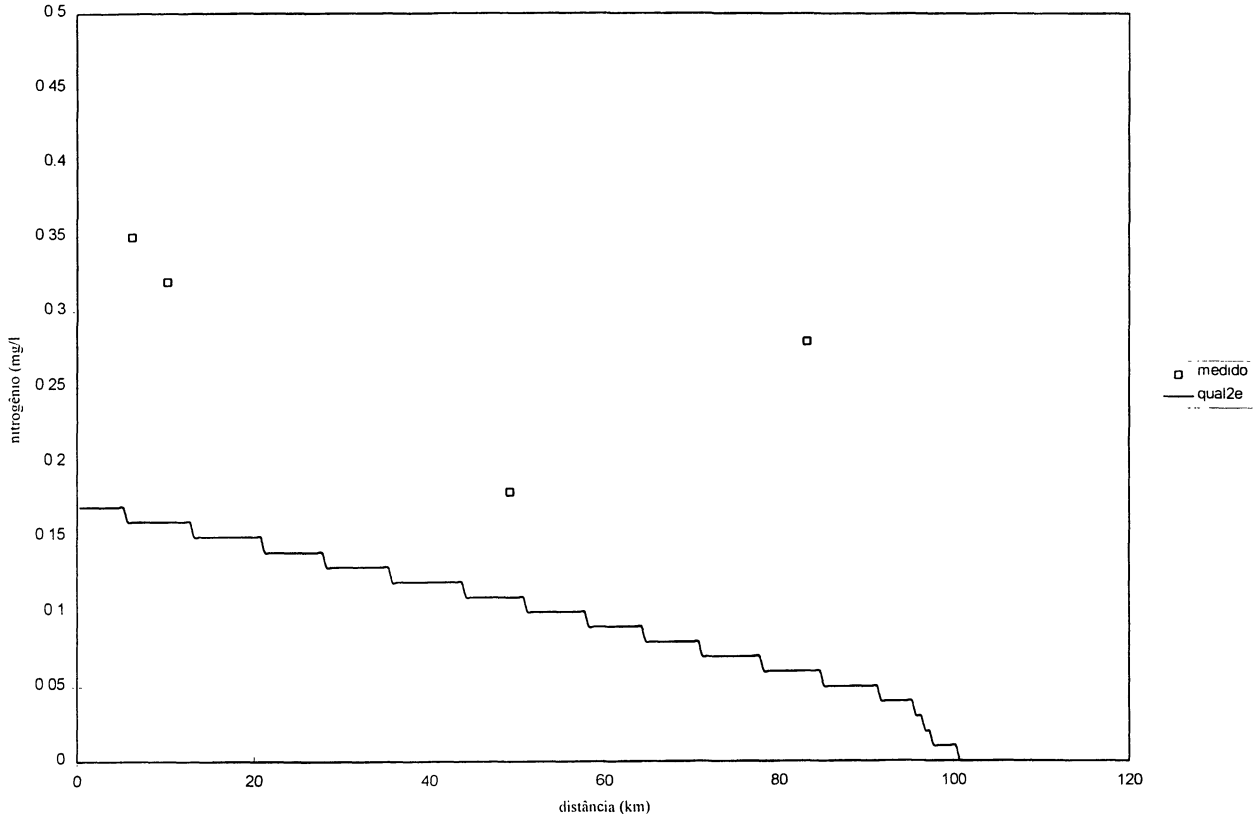


Figura 93

- Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas iniciais para $k_n = 0,02$, sendo a carga da vazão incremental = 10 mg/l (todas as carga apresentaram valores idênticos) -

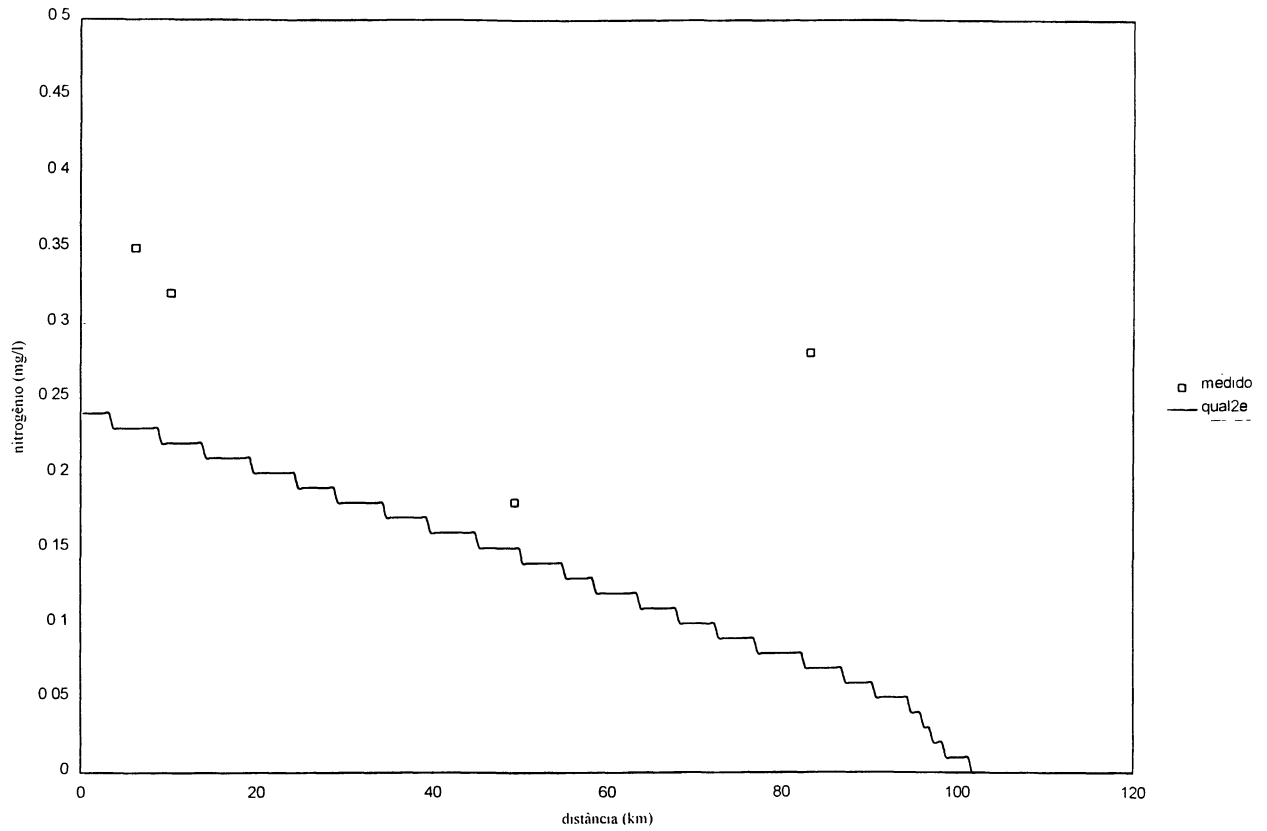


Figura 94

- Gráfico distância x Nitrogênio (Maio/1997), comparativo entre cargas iniciais para k_n = 0,02, sendo a carga da vazão incremental = 15 mg/l (todas as carga apresentaram valores idênticos) -

Para o mês de maio/97 o melhor resultado foi obtido com a carga de 20 mg/l na vazão incremental, mantendo as condições iniciais nulas, com k_n = 0,02. Para o mês de novembro/97 o melhor resultado obtido foi com a carga de 30 mg/l na vazão incremental, mantendo as condições iniciais nulas, e k_n = 0,02 (figura 95). Já para o mês de janeiro/98 o melhor resultado foi obtido com k_n = 0,4, com uma carga de 45 mg/l na vazão incremental, também mantendo as condições iniciais nulas (figura 96). Novamente, como já ocorreu na simulação de fósforo, a carga mais baixa da vazão incremental foi a do mês de maio/97, que apresenta menor vazão, portanto deveria apresentar carga mais baixa. O mês de janeiro/98, apesar de apresentar melhor resultado com uma carga na vazão incremental maio do que a do mês de novembro/98, que apresenta uma vazão bem maior, também apresenta um resultado coerente, uma vez que foi utilizado um valor bem mais alto para k_n.

Outra vez é importante ressaltar a importância de um estudo a respeito da atividade agrícola da região, para se determinar com mais exatidão as cargas, tanto de fósforo quanto de nitrogênio, a serem utilizadas na vazão incremental, para então ser definido o correto valor de k_n.

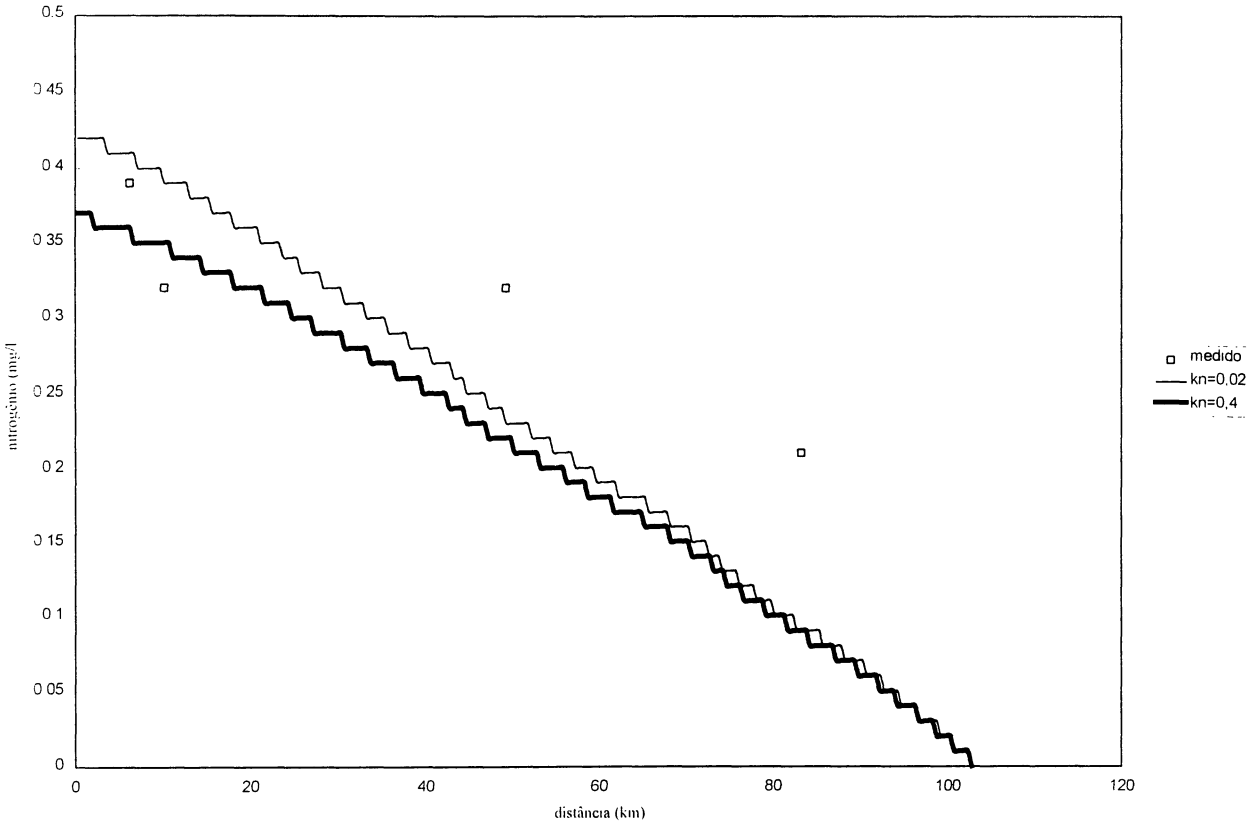


Figura 95

- Gráfico distância x Nitrogênio (Novembro/1997) -

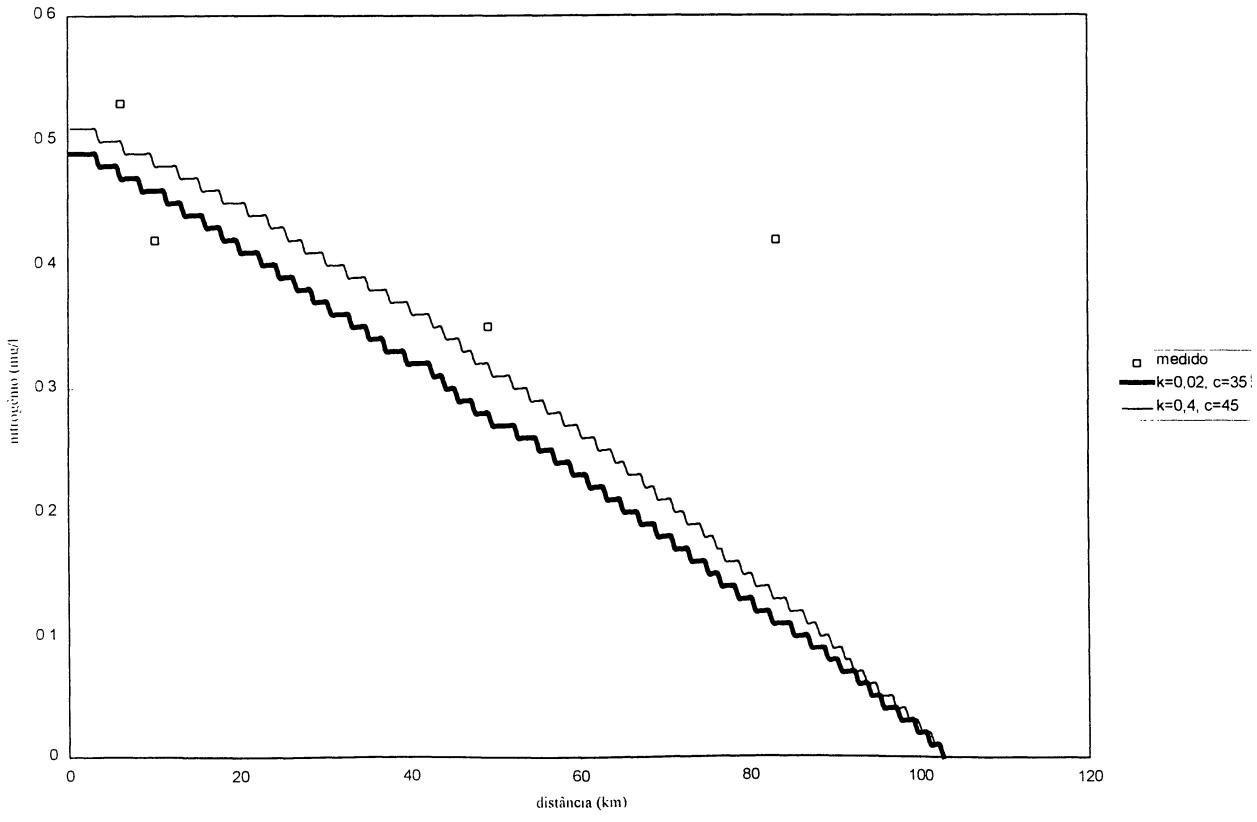


Figura 96

- Gráfico distância x Nitrogênio (Janeiro/1998) -

9 . 5 SIMULAÇÃO DE CLOROFILA

Para este último conjunto de simulações, novamente serão estudados apenas os três meses característicos (maio/97, novembro/97 e janeiro/98). As seguintes alterações são necessárias no programa:

Tela 04 - Definição de parâmetros a simular

Deverá ser incluído o parâmetro algas (algae).

Tela 08 - Cinética global

Todas as constantes desta tela foram mantidas com os valores do programa (default).

Tela 13 - Coeficientes de Reação de N, P e algas

Nesta tela será utilizado o valor pré-existentes no programa para a constante de deposição de algas (algae settling), que é de 0,3048/m. Para o valor da constante de extinção de luz (non-algal light extinction) será utilizado o valor de 0,003048/m, valor default do programa.

Tela 14 - Condições Iniciais Estimadas do Rio

Utilizou-se um processo semelhante ao adotado para o cálculo da temperatura. OD e DBO nos tramos (ver página 97), partindo-se dos valores medidos em campo para os pontos P01, P03 P07 e P13. No tramo 01 foi feito um balanço de massa para determinar o valor, o tramo 14 corresponde ao valor medido no ponto P13, o tramo 24 ao valor medido no ponto P07, o tramo 31 ao valor medido no ponto P03 e o tramos 32 e 33 ao ponto P01. Nos demais pontos os valores foram interpolados.

Tela 15 - Vazões Incrementais por Tramo

O valor de clorofila para a vazão incremental foi adotada como zero.

Tela 16 - Dados das Cabeceiras dos Rios

O valor da clorofila para a cabeceira foi adotado igual a zero.

Tela 17 - Cargas Poluentes Afluentes e Vazões Efluentes

O valor da clorofila nos afluentes foi determinada em função dos valores medidos em campo, sendo válida a seguinte relação:

Rio Tormenta..... P05
Rio Adelaide..... P04
Rio Cotejipe..... P02
Rio Jaracatiá P10
Rio Chopim P14
Rio Guarani P08

Os demais afluentes (rio dos Micos, rio Perdido, córrego Luciana e sanga dos Porcos) não possuem pontos de coleta. Por se tratarem de afluentes de menor importância, numa primeira simulação eles não foram considerados, sendo o valor da clorofila adotado igual a zero.

O restante das telas do programa QUAL2E permanecem sem alterações.

9 . 5 . 1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 43 encontram-se os valores medidos em campo para clorofila. Novamente alguns meses não apresentaram valores, sendo adotado um valor proporcional à vazão (como os nutrientes, nitrogênio e fósforo, também são proporcionais à vazão, o valor adotado também é proporcional aos nutrientes). Estes valores encontram-se em negrito na tabela 45.

Os valores medidos e simulados foram de clorofila a, em μg/l.

Tabela 45

- Dados das campanhas de coleta → clorofila -

Local	Data	clorofila µg/l
P01	maio/97	1,47
	novemb./97	**6,45**
	janeiro/987	**1,98**
P02	maio/97	1,16
	novemb./97	**6,41**
	janeiro/98	6,26
P03	maio/97	2,55
	novemb./97	**7,44**
	janeiro/98	1,52
P04	maio/97	1,11
	novemb./97	**6,03**
	janeiro/98	2,52
P05	maio/97	1,12
	novemb./97	**6,22**
	janeiro/987	1,71
P07	maio/97	2,03
	novemb./97	**8,42**
	janeiro/98	2,19
P08	maio/97	2,50
	novemb./97	**6,08**
	janeiro/98	2,20
P10	maio/97	3,35
	novemb./97	**2,48**
	janeiro/98	1,59
P13	maio/97	1,68
	novemb./97	**4,58**
	janeiro/98	2,13
P14	maio/97	0,73
	novemb./97	**4,49**
	janeiro/98	1,42

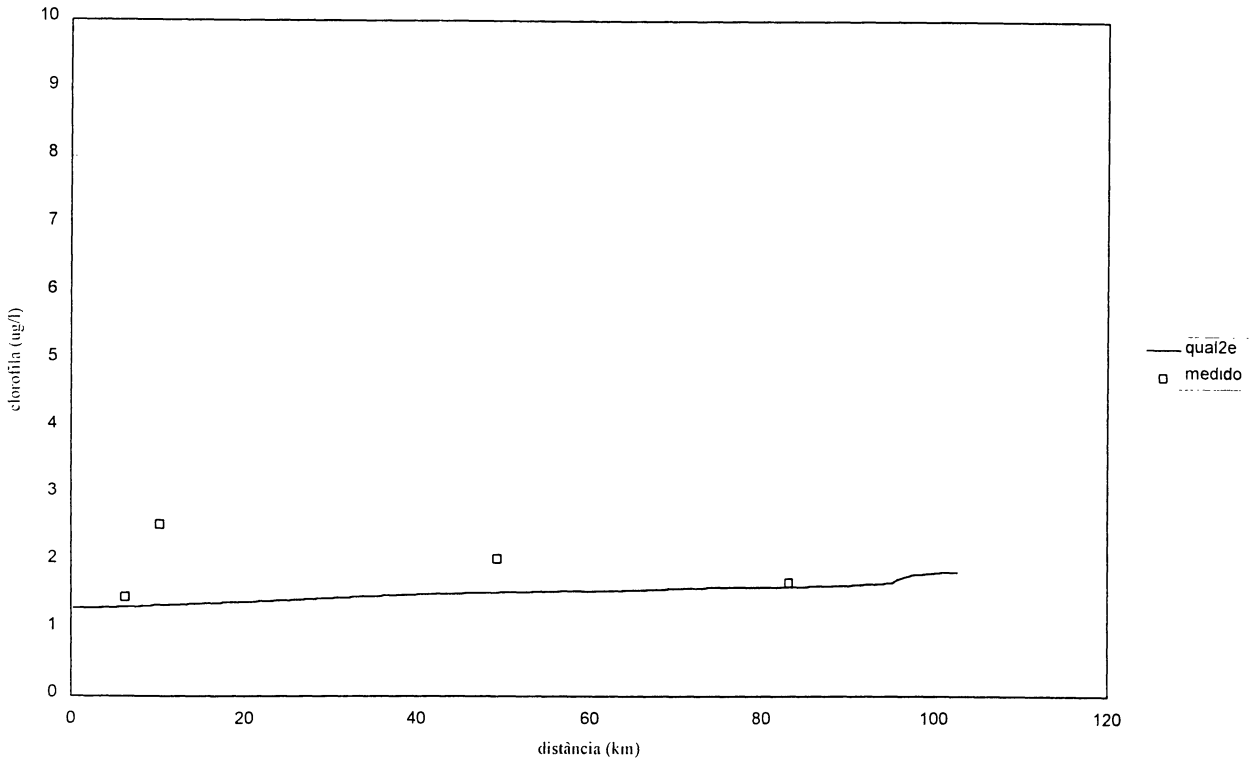


Figura 97

- Gráfico distância x Clorofila (Maio/1997) -

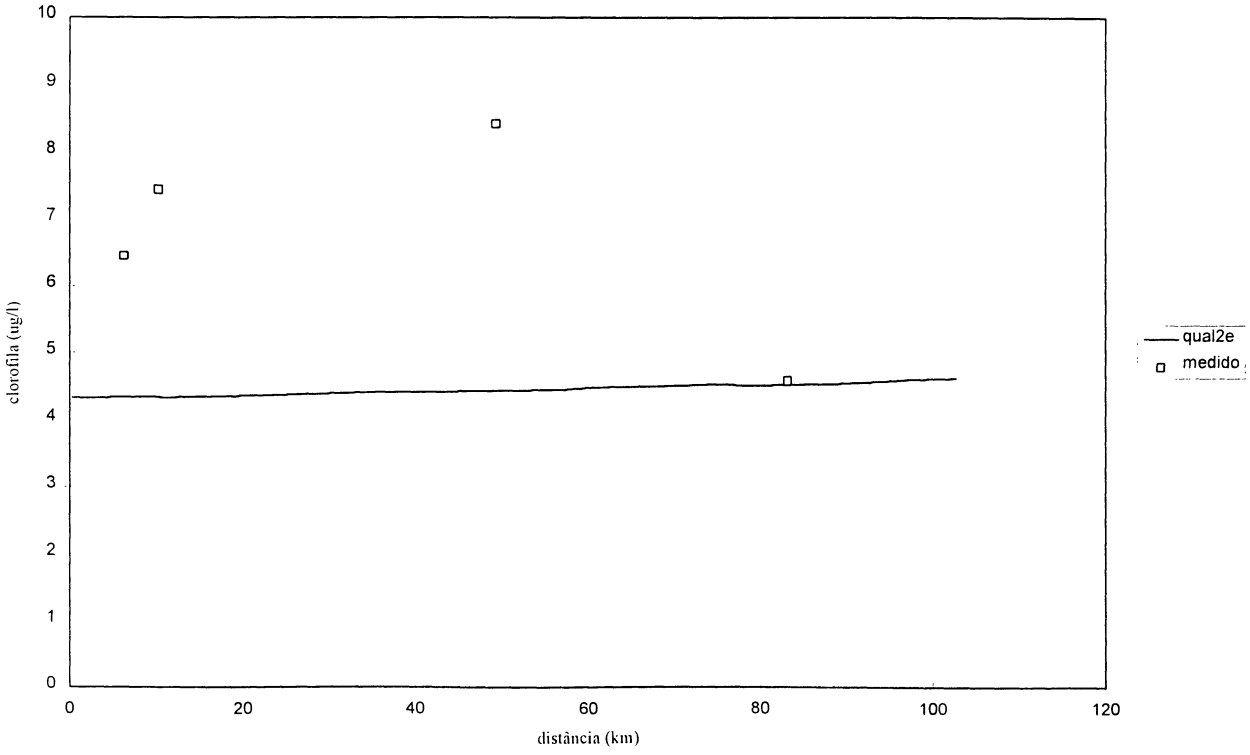


Figura 98

- Gráfico distância x Clorofila (Novembro/1997) -

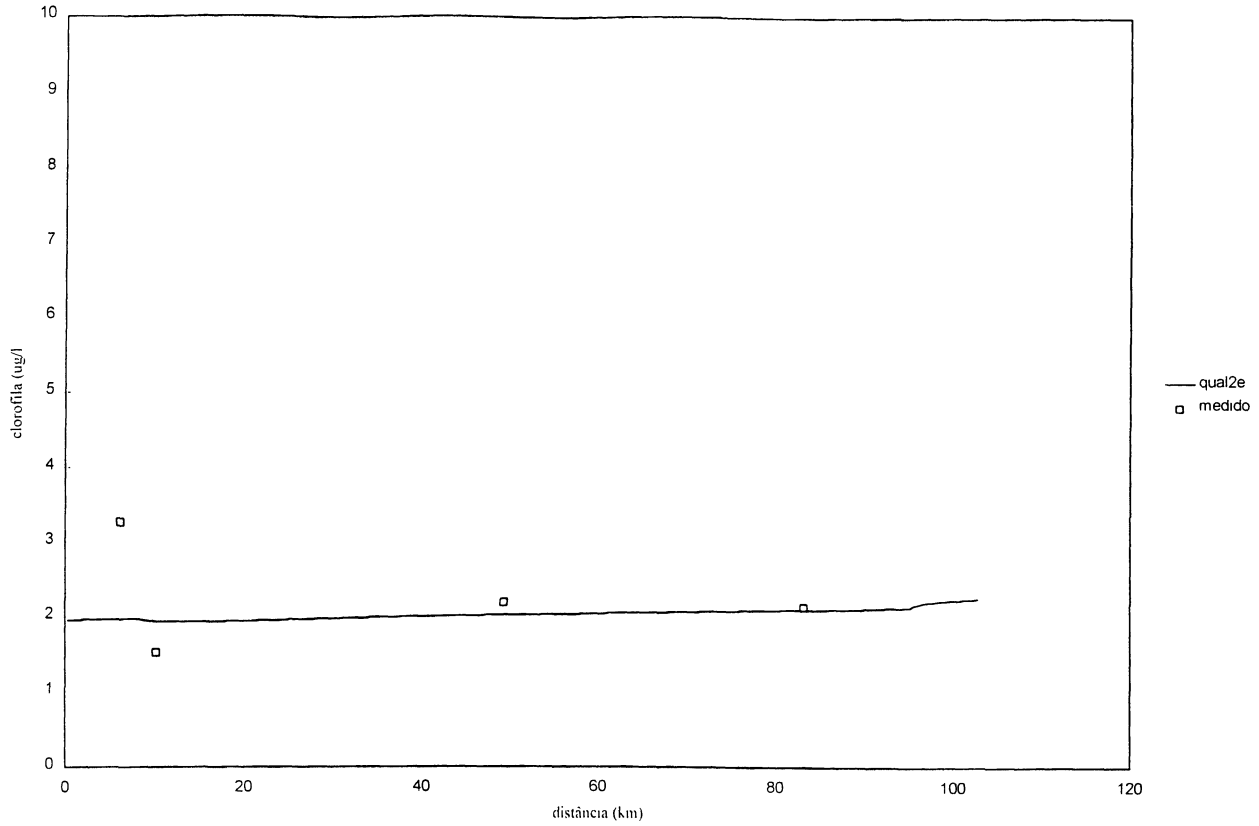


Figura 99

- Gráfico distância x Clorofila (Janeiro/1998) -

Como pode ser observado nas figuras 97 à 98, os resultados para os meses de maio e janeiro foram satisfatórios, com exceção do P03 em maio/97 e P01 em janeiro/98. É importante ressaltar que justamente o P01 de janeiro/98 é um ponto que não apresenta valor medido em campo, sendo este determinado proporcionalmente com relação à vazão. o mesmo ocorrendo para o mês de novembro/97, que também não apresentou bons resultados.

9 . 6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

9 . 6 . 1 VALORES DE OD E DBO

Foi então realizado um estudo comparativo entre os valores obtidos para OD e DBO, com nutrientes e algas e sem estes parâmetros, para se visualizar as alterações provocadas pela inclusão da simulação destes parâmetros. Não foram observadas alterações significativas em relação aos valores apresentados no item 9.1.1, onde não foram considerados algas e nutrientes.

9 . 6 . 2 VALORES DE DBO E COLIFORMES CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA PECUÁRIA

Como foram feitos os cálculos referentes à contribuição do rebanho existente na região da bacia hidrográfica nas simulações de nitrogênio e fósforo, também foram refeitos os cálculos dos valores de DBO e coliformes para o mês de novembro, que corresponde à maior vazão no período de estudo, ou seja, maior contribuição de carga difusa.

Como pode ser observado na figura 100, os valores de DBO não sofreram grandes alterações, ficando, como esperado, um pouco acima dos valores simulados sem a consideração da pecuária.

Com relação ao gráfico de coliformes (figura 101), mesmo com a alteração do valor do coeficiente de decaimento de 0,8 para 4,0, os valores ficaram bem acima dos obtidos anteriormente. A simulação que mais se aproxima dos valores medidos em campo são os simulados sem a inclusão da carga oriunda da pecuária. Uma explicação para isto seria o fato de ter sido considerada toda a carga atingindo o rio Iguaçu, sendo que na verdade uma porcentagem desta carga fica retida no solo. Além disto, foram usados valores de literatura para os valores de coliformes por rebanho, o que pode não corresponder à realidade da região. Para um resultado mais preciso seriam necessárias medições em campo, tanto do coeficiente de decaimento quanto do valor de coliformes fecais para cada rebanho.

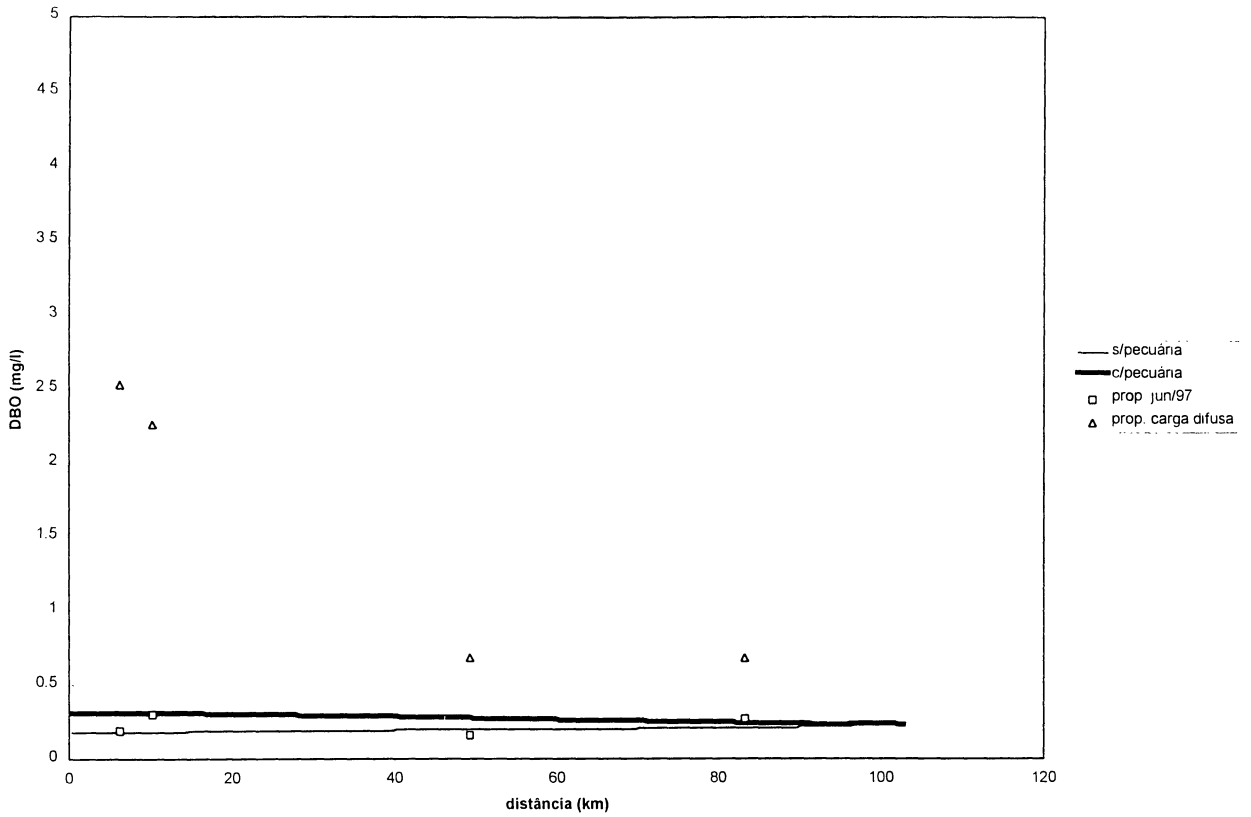


Figura 100

- Gráfico distância x DBO (Novembro/97) -

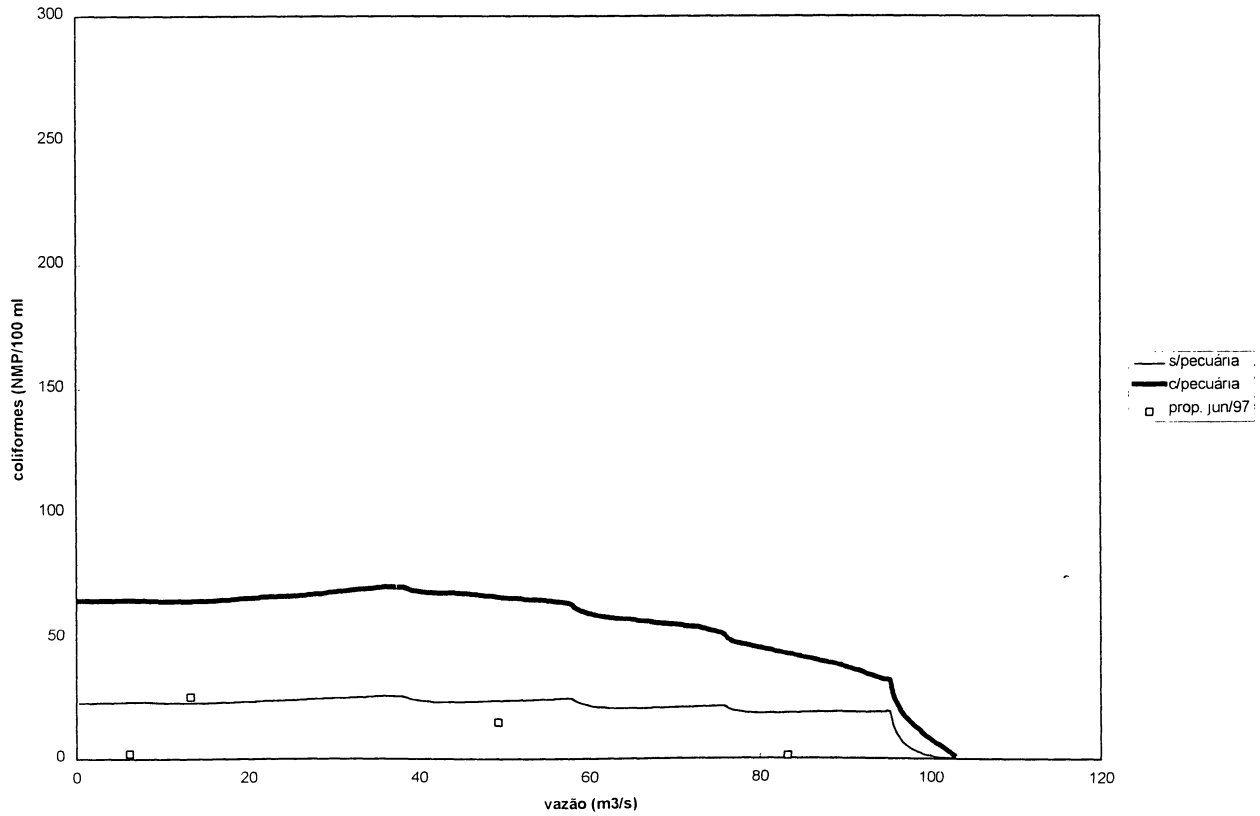


Figura 101

- Gráfico distância x Coliformes (Novembro/97)

9 . 6 . 3 GRÁFICOS NUTRIENTES x VAZÃO

Como ilustração, nas figuras 102 a 109 encontram-se os gráficos de vazão x concentração de fósforo e nitrogênio, sendo plotados tanto os valores medidos quantos os simulados, nos pontos P01, P03, P07 e P13.

Com respeito aos gráficos de nitrogênio, foram plotados os melhores valores obtidos através das simulações, ou seja:

Para o mês de maio foi utilizado um coeficiente k_n de 0,02, e uma carga de 20 mg/l na vazão incremental; para o mês de novembro também foi utilizado um coeficiente k_n de 0,02, com uma carga na vazão incremental de 30 mg/l; para o mês de janeiro foi utilizado um coeficiente k_n de 0,4, com uma carga na vazão incremental de 45 mg/l.

Nota-se tendência de proporcionalidade direta entre nutrientes e vazão, sem contudo, ser possível formular conclusões genéricas.

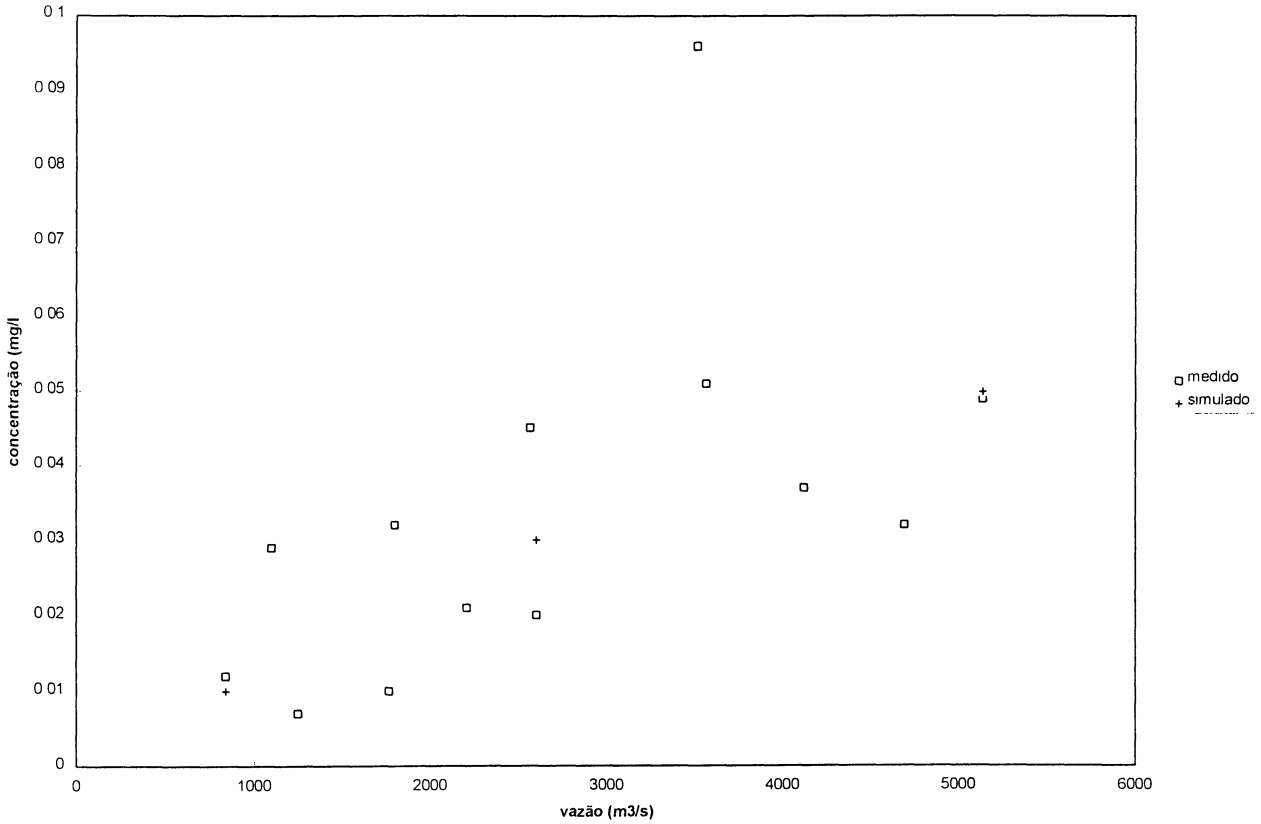


Figura 102

- Gráfico vazão x concentração de fósforo - P01 -

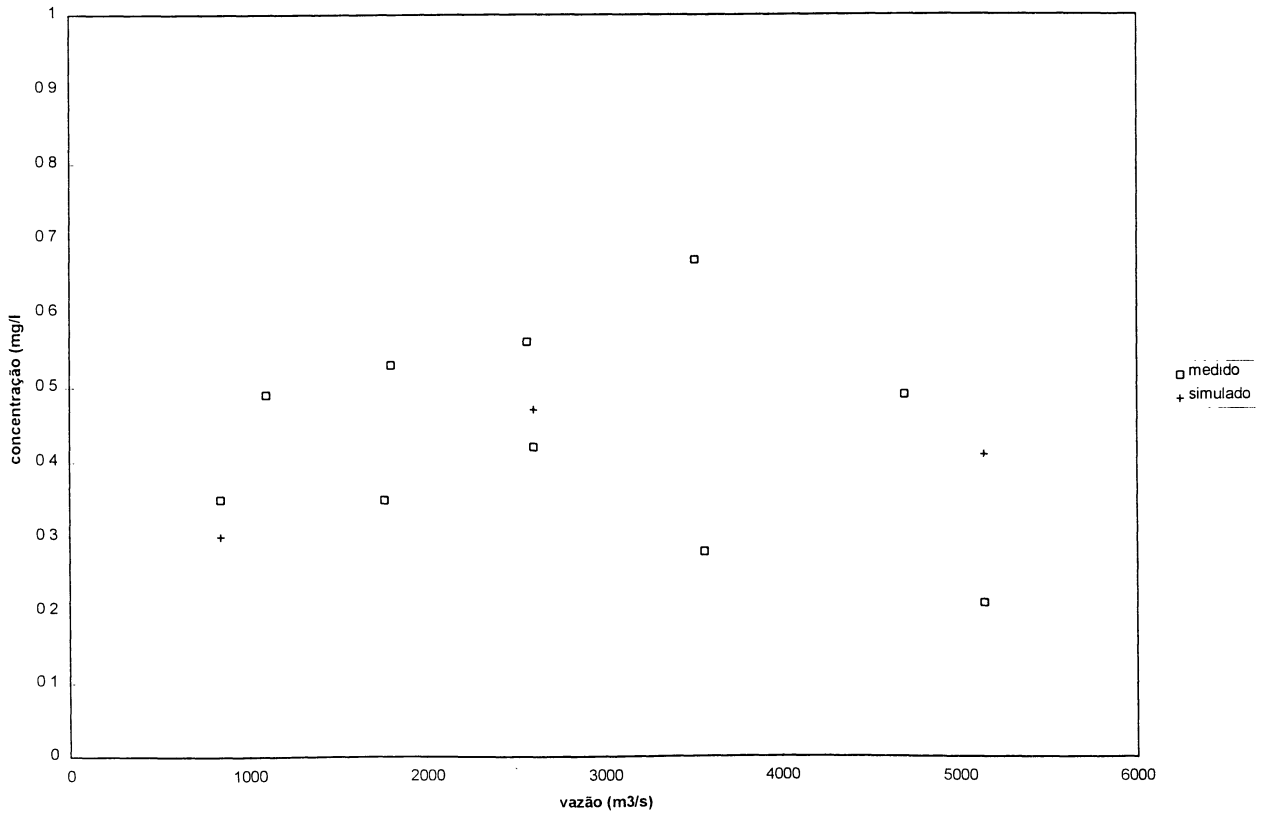


Figura 103

- Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P01 -

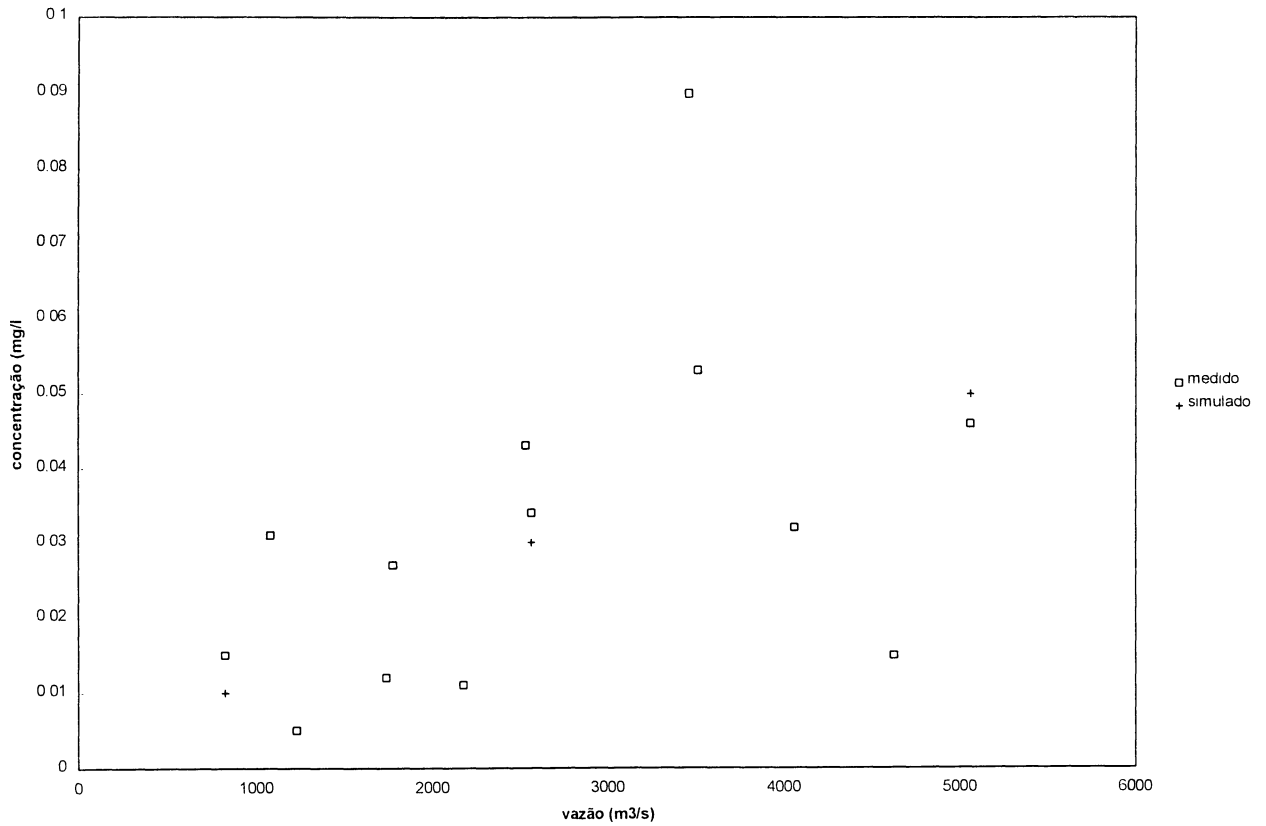


Figura 104

- Gráfico vazão x concentração de fósforo - P03 -

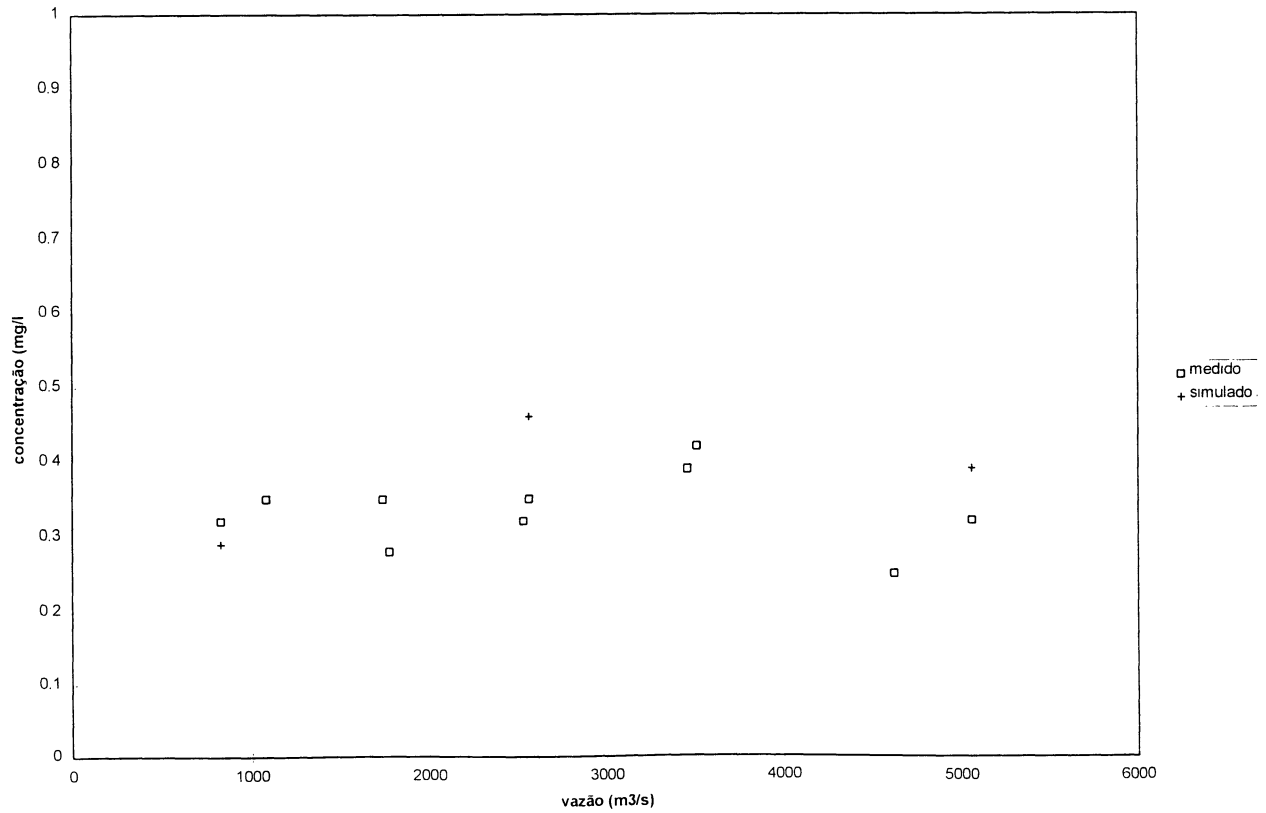


Figura 105

- Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P03 -

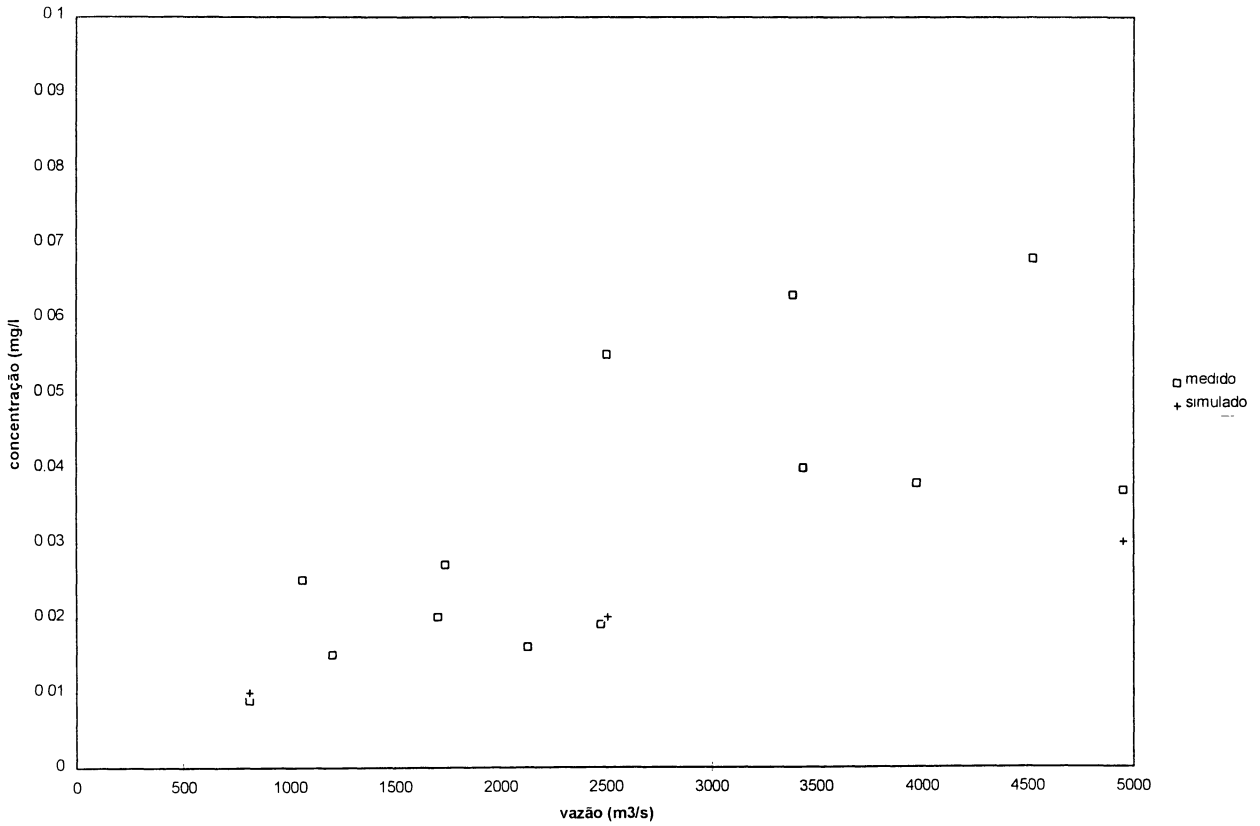


Figura 106

- Gráfico vazão x concentração de fósforo - P07 -

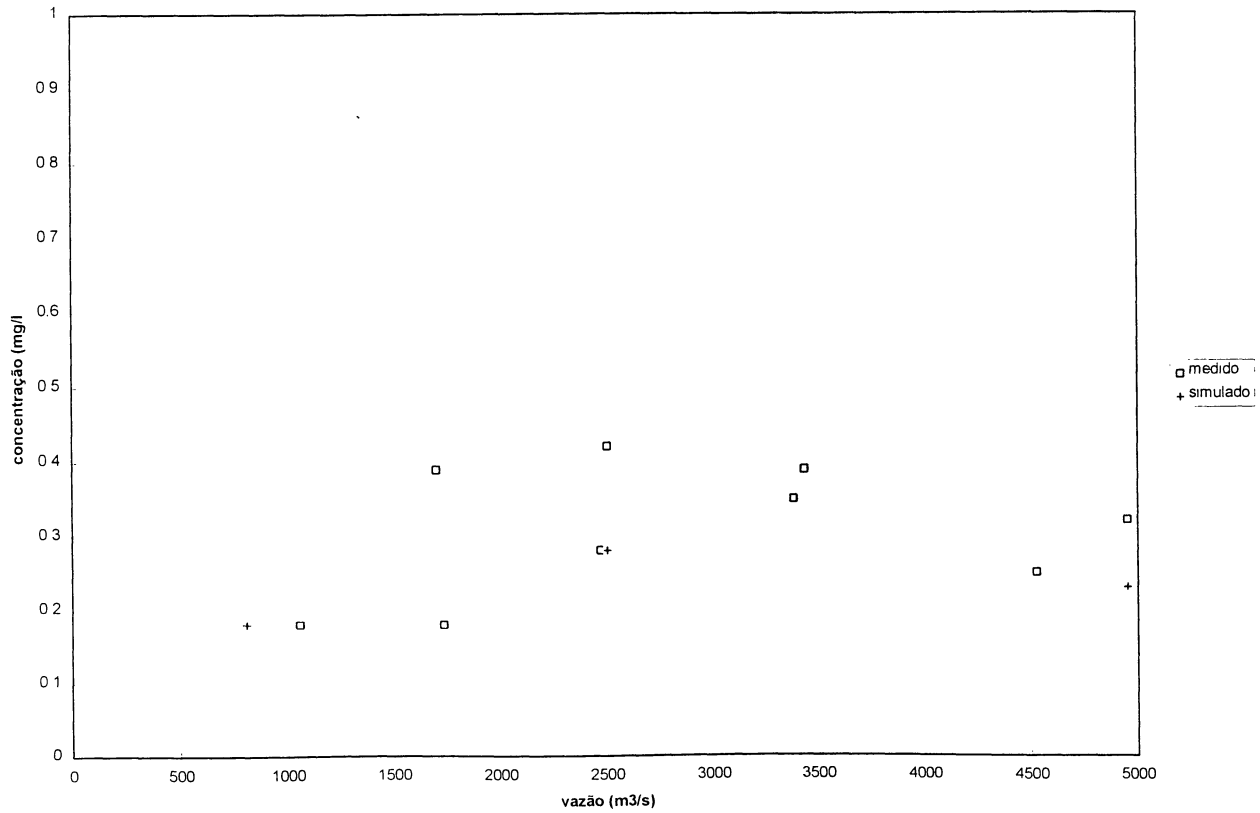


Figura 107

- Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P07 -

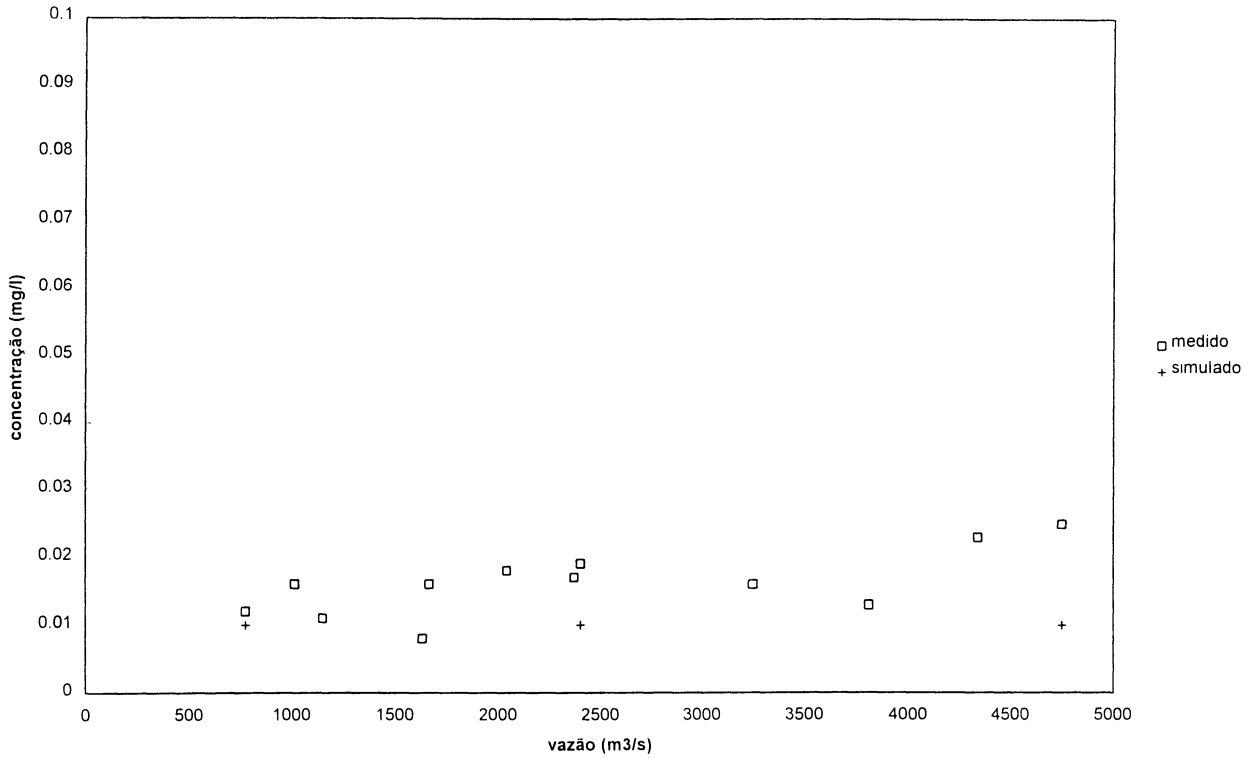


Figura 108

- Gráfico vazão x concentração de fósforo - P13 -

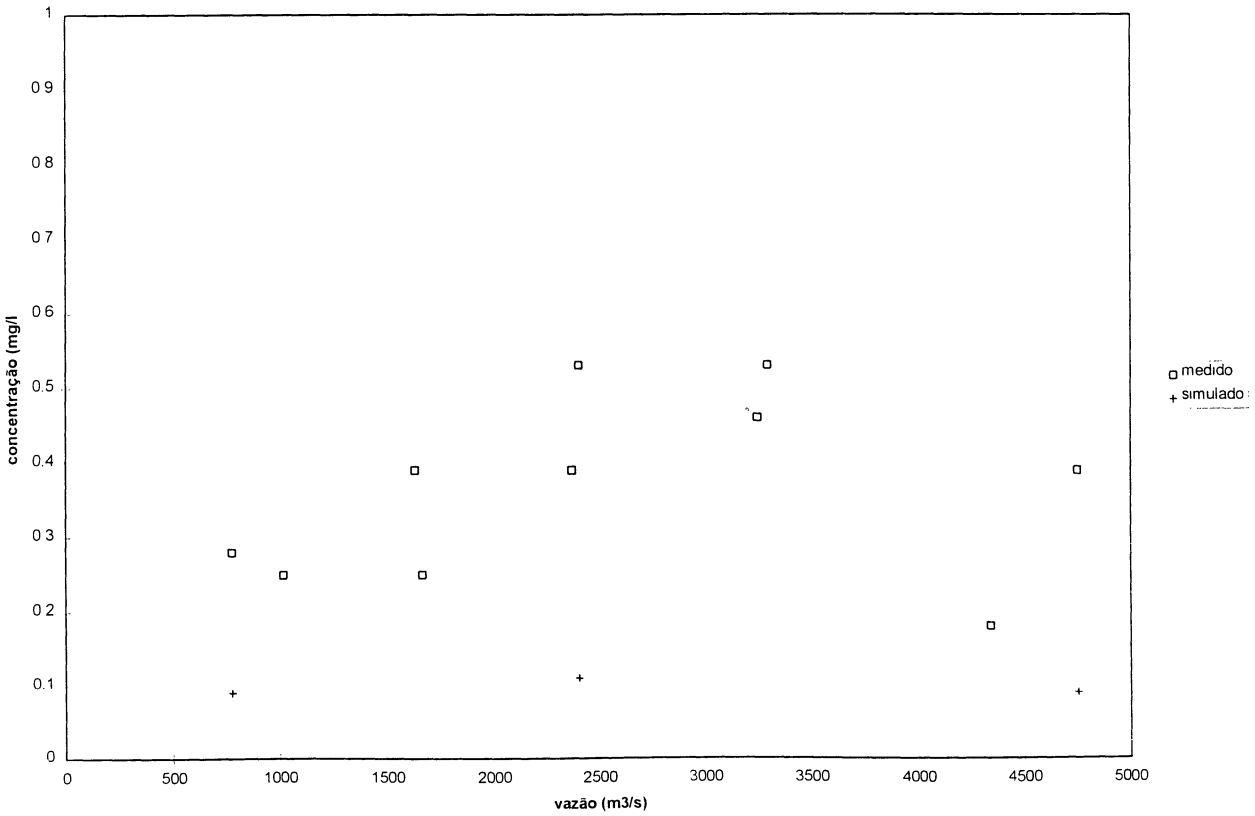


Figura 109

- Gráfico vazão x concentração de nitrogênio - P13 -

10 . CONCLUSÕES

O levantamento de dados realizado permitiu caracterizar fisicamente a bacia hidrográfica com relação a relevo, hidrografia, ocupação humana e instalação de industrias. Com base nestes dados foi possível definir as fontes potenciais de poluição e a maneira pela qual esta atinge o rio Iguaçu. No entanto, diversos parâmetros foram estimados, devido à falta de dados experimentais para sua determinação.

As diversas simulações realizadas mostraram que os valores obtidos para OD e temperatura foram satisfatórios, sendo o modelo computacional considerado válido para aplicações futuras. Já com relação a DBO, apesar dos resultados obtidos também serem satisfatórios, diversos meses não apresentam valores medidos em campo, que foram determinados de forma aproximada. O mesmo ocorreu com relação à simulação de coliformes. É importante ressaltar que tanto o coeficiente de decaimento da DBO quanto o coeficiente de decaimento de coliformes foram obtidos junto à literatura, não sendo realizado nenhuma determinação em campo.

Nas simulações realizadas na seqüência, nitrogênio e fósforo, pode-se observar a influência da carga difusa resultante da ocupação da bacia. Para uma correta caracterização da bacia hidrográfica seria necessário um levantamento detalhado da atividade agrícola na região.

Com relação às algas, novamente alguns meses não apresentaram valores medidos em campo, sendo a comparação feita entre os valores simulados e valores calculados de forma aproximada, que podem não coincidir com os dados reais.

Assim, o mérito do presente trabalho é o desenvolvimento inicial de um modelo de simulação da qualidade da água no rio Iguaçu na região de influência de Salto Caxias, que pode ser utilizado como instrumento de gestão da bacia e para comparação com a situação após a formação do reservatório. Além disso, o processo de modelagem permite identificar deficiências na atual política de coleta de dados, como por exemplo a determinação de DBO apenas para alguns meses, e a necessidade de determinação experimental de alguns coeficientes e parâmetros essenciais para o aumento da confiabilidade do modelo.

11 . SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros têm-se a continuidade do estudo da qualidade da água na região, após a formação do reservatório da usina hidrelétrica de Salto Caxias, e um acompanhamento futuro desta região, com coletas sistemáticas de amostras de água.

Seria interessante também, dentro do possível, a determinação experimental dos diversos coeficientes utilizados no programa QUAL2E, para uma correta caracterização da região em estudo. Além disso, estes coeficientes determinados experimentalmente também serviriam para estudos em outras regiões de características semelhantes.

Uma maior freqüência na determinação do valor da DBO seria importante para a correta calibração do modelo, pois como pode ser observado nos gráficos obtidos, os resultados foram bons para os meses em que existem determinações em laboratório. Adicionalmente, poderia ser feita nova calibração correlacionando-se o valor da DBO com o valor de OD, ao invés do valor da vazão, como foi feito no presente trabalho.

Novos estudos poderiam ser feitos para a calibração do modelo para diferentes faixas de vazão, isto é, determinando-se um modelo de simulação para vazões baixas, um para vazões médias e um para vazões altas.

Outra sugestão de trabalho futuro seria a coleta de novas amostra com a determinação em laboratório de todas as parcelas da equação 9.3.1, a fim de se determinar com exatidão a parcela relativa a fósforo inorgânico, para a verificação da simplificação (P inorgânico em suspensão = 0) utilizada no presente trabalho.

Um levantamento detalhado da atividade agrícola na região, com a classificação do solo sob o ponto de vista da composição orgânica e levantamento de produtos utilizados na lavoura (adubos e fertilizantes), seria importante para uma determinação mais precisa da poluição decorrente de cargas difusas.

Uma análise das características físico-químicas da vazão efluente de Salto Osório seria interessante para a determinação exata dos dados de cabeceira utilizados no programa.

Adicionalmente, a continuidade da aplicação do modelo computacional QUAL2E, com o uso da análise de sensibilidade, permitiria uma análise estatística dos resultados obtidos.

APÊNDICE

Neste apêndice são descritos alguns problemas encontrados nos dados disponíveis para a região de Salto Caxias, bem como as soluções adotadas para o presente trabalho.

Localização das seções transversais: As seções transversais do Rio Iguaçu utilizadas são as constantes no relatório técnico final "Estudos Hidrológicos Para o Projeto Básico - UHE Salto Caxias", de outubro de 1993.

As coordenadas constantes da tabela 4.7.3 do relatório acima citado (coordenadas corrigidas) estão localizadas no mapa da figura 4.7.2 do mesmo relatório. Destas, mais da metade tem localização na figura 4.7.2 não coincidente com a tabela 4.7.3. Alguns pontos, como a seção SCAX33, tem um desvio de quase 500 metros, o que corresponde a 0,60 cm na figura 4.7.2.

A localização destas mesmas seções nos mapas na escala 1:50.000, do Departamento de Engenharia e Comunicações do Ministério do Exército (MI-2834/3, MI-2834/4, MI-2835/3, MI-2849/1, MI-2849/2, MI-2850/1, MI-2849/3, MI-2850/3) apresenta erros ainda maiores e em maior quantidade de seções. Uma das possíveis fontes de erro seria uma correção necessária nos mapas do Ministério do Exército, devido à uma mudança de datum, (vertical: Imbituba/SC, permanece o mesmo; horizontal: de Córrego Alegre/MG para SAD69). Entretanto, esta correção seria de cerca 30 metros e 60 metros, nas direções leste-oeste e norte-sul, respectivamente, o que é muito inferior às discrepâncias observadas.

Na tabela 46 encontram-se as coordenadas das seções. As coordenadas corrigidas, conforme recomendação do próprio estudo, foram obtidas subtraindo-se 603.000 m das coordenadas Este e adicionando-se 2.360 m às coordenadas Norte. A fonte desta tabela são estudos realizados anteriormente, sendo as coordenadas estimadas em função da locação em planta (Sugai, 1997). A coordenada este da seção SCAX10 contém um erro, provavelmente de datilografia, pois o correto é 881900, e não 581900 como consta na tabela 4.7.3 (a transcrição da tabela, na seqüência, já contém todas as correções necessárias). Outros dois erros encontrados na tabela 4.7.3 estão nas coordenadas corrigidas: na seção SCAX28 o correto é 291390, no lugar de 291391 (coordenada este); e na seção SCAX33 o correto é 296706, no lugar de 296140.

Tabela 46

- Coordenadas das seções utilizadas no trecho UHE Salto Caxias - UHE Salto Osório -

Seção		Coordenadas		Coordenadas Corrigidas	
		Este	Norte	Este	Norte
UHE S. Caxias	SCAX00	852500	7170300	249500	7172660
	SCAX01	857080	7171600	254080	7173960
	SCAX02	860600	7174120	257600	7176480
	SCAX03	864040	7172700	261040	7175060
	SCAX04	867820	7171700	264820	7174060
	SCAX05	871000	7172980	268000	7175340
	SCAX06	871140	7169240	268140	7171600
	SCAX07	875500	7168300	272500	7170660
	SCAX08	876300	7164500	273300	7166860
	SCAX09	878320	7166080	275320	7168440
	SCAX10	881900	7166420	278900	7168780
	SCAX11	882960	7172340	279960	7174700
	SCAX12	888080	7171840	285080	7174200
	SCAX17	888300	7168960	285300	7171320
	SCAX16	888300	7167200	285300	7169560
	SCAX15	890050	7167060	287050	7169420
UHE Cruzeiro	SCAX13	891700	7169640	288700	7172000
	SCAX26	892382	7170830	289382	7173190
	SCAX27	893961	7170530	290961	7172890
	SCAX28	894390	7169266	291390	7171626
	SCAX23	895000	7166500	292000	7168860
	SCAX29	895406	7166107	292406	7168467
	SCAX24	895800	7165800	292800	7168160
	SCAX30	896734	7165364	293734	7167724
	SCAX25	898150	7166100	295150	7168460
	SCAX31	898224	7167059	295224	7169419
	SCAX32	898316	7168148	295316	7170508
	SCAX14	899140	7169000	296140	7171360
UHE S. Osório	SCAX33	899706	7169297	296706	7171657

fonte: Sugai, 1993

Os dados da tabela 4.7.4 do relatório técnico estão de acordo com aqueles constantes do relatório já citado anteriormente (Sugai, 1997).

Outro Relatório de interesse para a locação das seções transversais é "Usina Hidrelétrica de Salto Caxias - Revisão do Estudo de Viabilidade (Volume 3 - Estudos de Remanso)" (COPEL, 1997). Neste relatório encontram-se as coordenadas dos pontos extremos das seções SCAX26 a SCAX33. Todas as coordenadas, locadas no mapa em escala 1:50.000, apresentam problemas similares aos citados anteriormente, ficando, no entanto, em acordo com a locação dos pontos constantes na tabela 4.7.3. Adotou-se, no presente estudo, as coordenadas corrigidas apresentadas no relatório técnico citado (Sugai, 1993), assim como as distâncias entre as seções ali estabelecidas.

Áreas de drenagem: Por ocasião da preparação dos dados de vazão para a utilização do modelo computacional QUAL2E, verificou-se discrepância entre a área de drenagem do rio Guarani, constante do relatório (Sugai, 1997) e aquela listada pelo DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica para Porto Santo Antônio, no rio Guarani. Foram então traçados novamente os divisores de água e planimetradas todas as áreas de drenagem, resultando nos seguintes valores (tabela 47):

Tabela 47

- Áreas de drenagem dos afluentes principais -

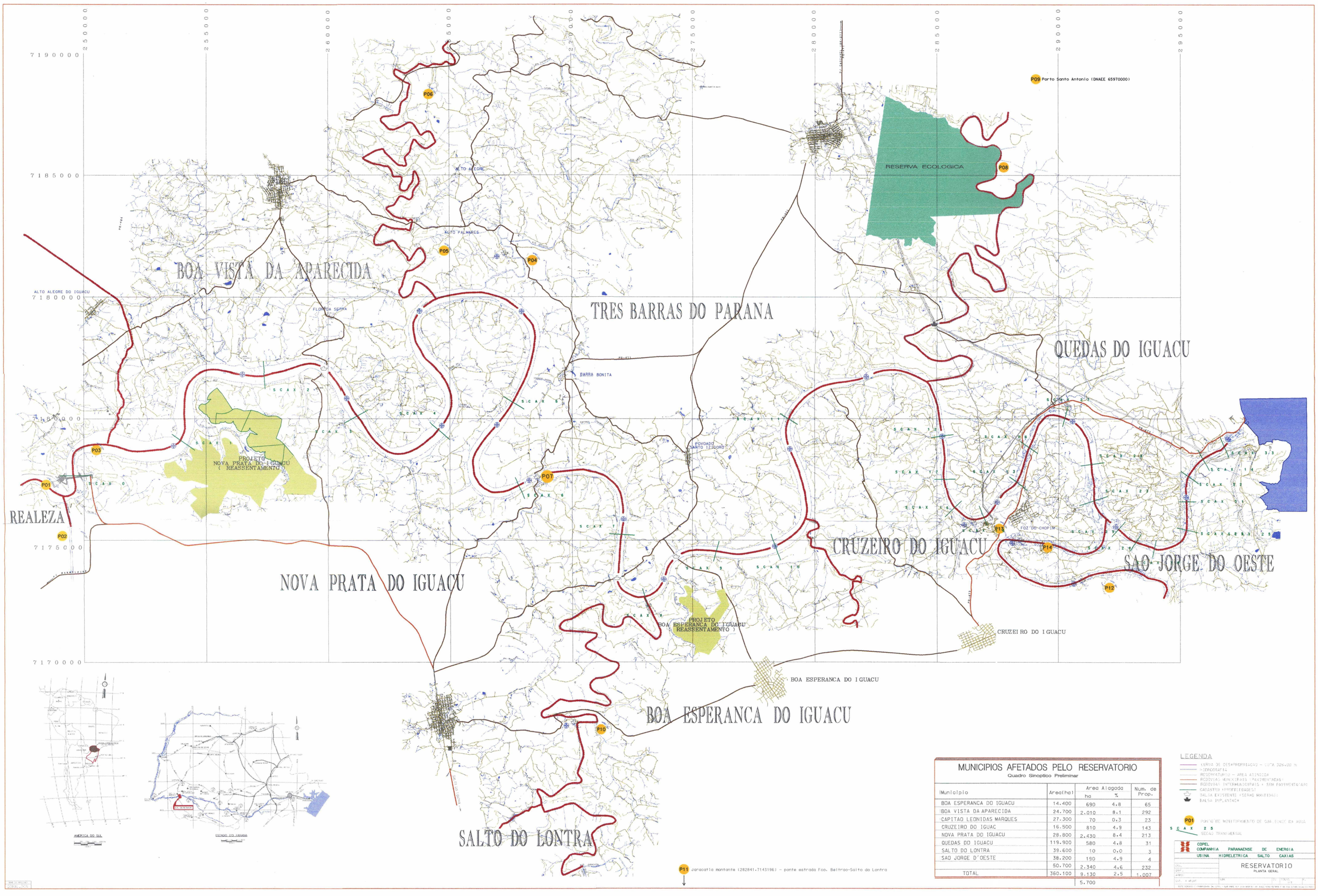
Afluente	Área de Drenagem	
	(relatório)	(planimetradas)
Adelaide	549	508
Chopim	7.500	7.431
Cotejipe	977	831
Guarani	1.823	1.315
Jaracatiá	668	629
Tormenta	438	385

Adotou-se, para o presente estudo, os valores planimetrados.

ANEXOS

Anexo 01

- Mapa da região em estudo (localização das seções transversais, pontos de coleta e afluentes) -



MUNICIPIOS AFETADOS PELO RESERVATORIO

Quadro Sinoptico Preliminar

Municipio	Area(ha)	Area Alagada ha	Area Alagada %	Num. de Prop.
BOA ESPERANCA DO IGUACU	14.400	690	4.8	65
BOA VISTA DA APARECIDA	24.700	2.010	8.1	292
CAPITAO LEONIDAS MARQUES	27.300	70	0.3	23
CRUZEIRO DO IGUAC	16.500	810	4.9	143
NOVA PRATA DO IGUACU	28.800	2.430	8.4	213
QUEDAS DO IGUACU	119.900	580	4.8	31
SALTO DO LONTRA	39.600	10	0.0	3
SAO JORGE D'OESTE	38.200	190	4.9	4
	50.700	2.340	4.6	232
TOTAL	360.100	9.130	2.5	1.007
		5.700		

LEGENDA

- CURVA DE DESAPROPRIACAO - COTA 325x100 m
- HIDROGRAFIA
- RESERVATORIO - AREA ATINGIDA
- RODOVIAS MUNICIPAIS PAVIMENTADAS
- RODOVIAS INTERMUNICIPAIS E SEM PAVIMENTACAO
- CADASTRO PROPRIEDADES
- BALSA EXISTENTE (SERAO MANTIDAS)
- BALSA IMPLANTADA

P01 PONTO DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA AGUA

SCAX 25 SECAO TRANSVERSAL

COPEL COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA

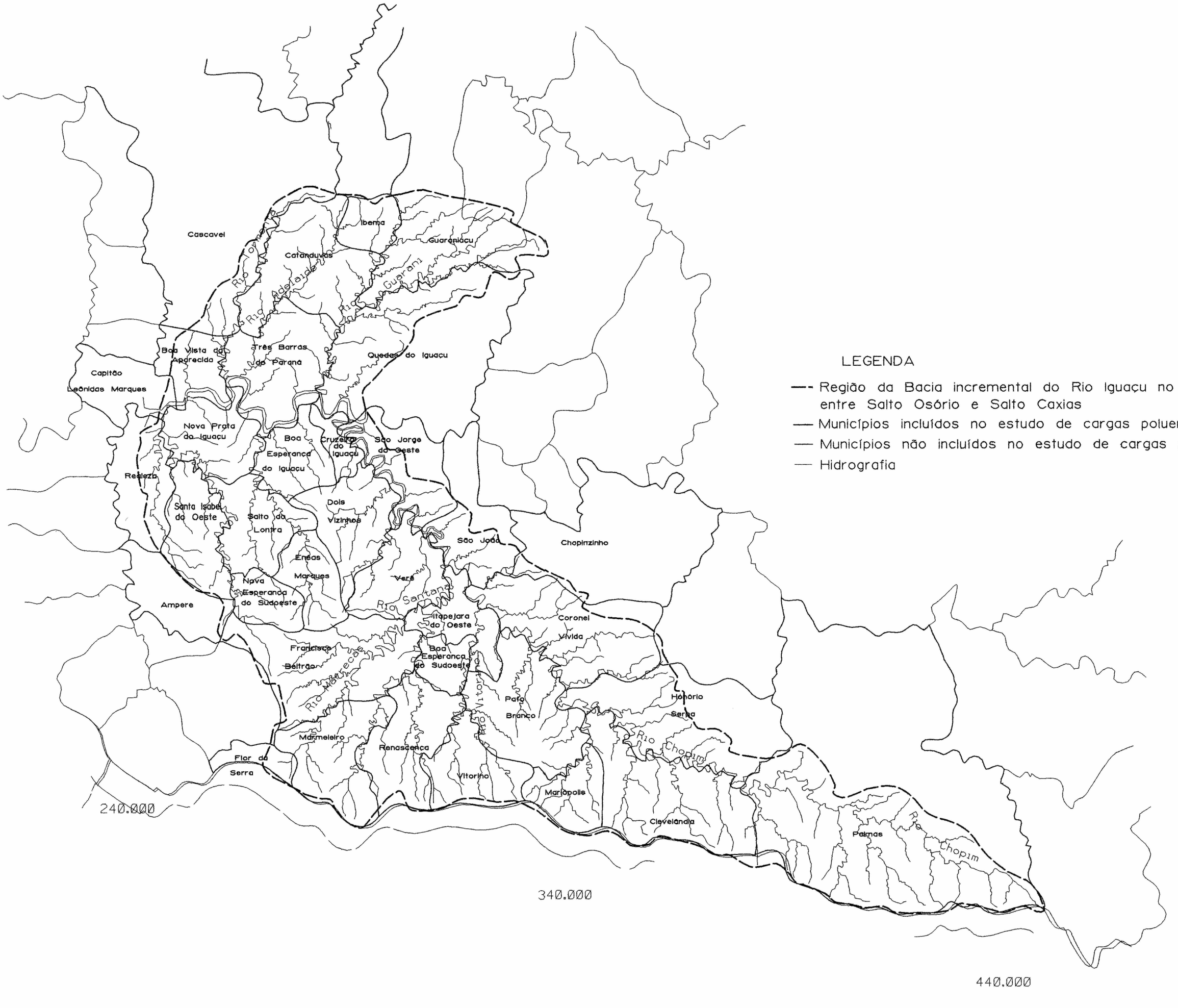
USINA HIDRELETRICA SALTO CAXIAS

RESERVATORIO

PLANTA GERAL

Anexo 02

- Mapa da região em estudo (bacia hidrográfica incremental entre Salto Osório e Salto Caxias) -



LEGENDA

- Região da Bacia incremental do Rio Iguaçu no trecho entre Salto Osório e Salto Caxias
- Municípios incluídos no estudo de cargas poluentes
- Municípios não incluídos no estudo de cargas poluentes
- Hidrografia

Foto 01

- Ponto de coleta P01 → Rio Iguaçu -

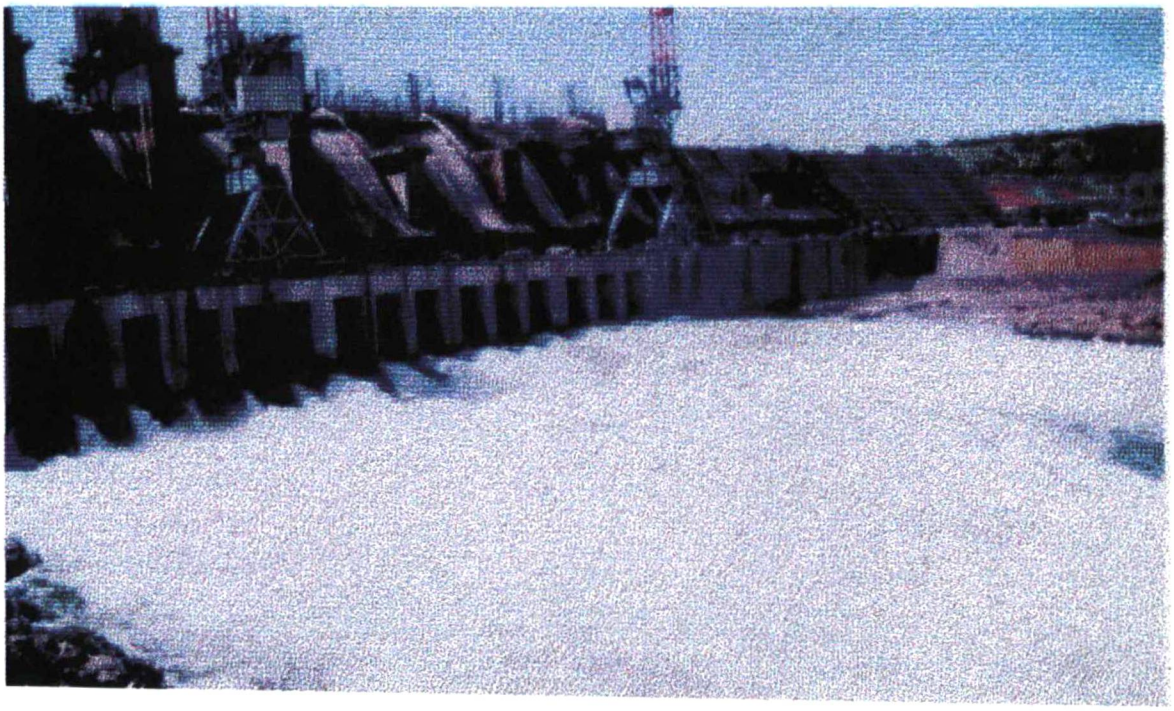


Foto 02

- Adufas -

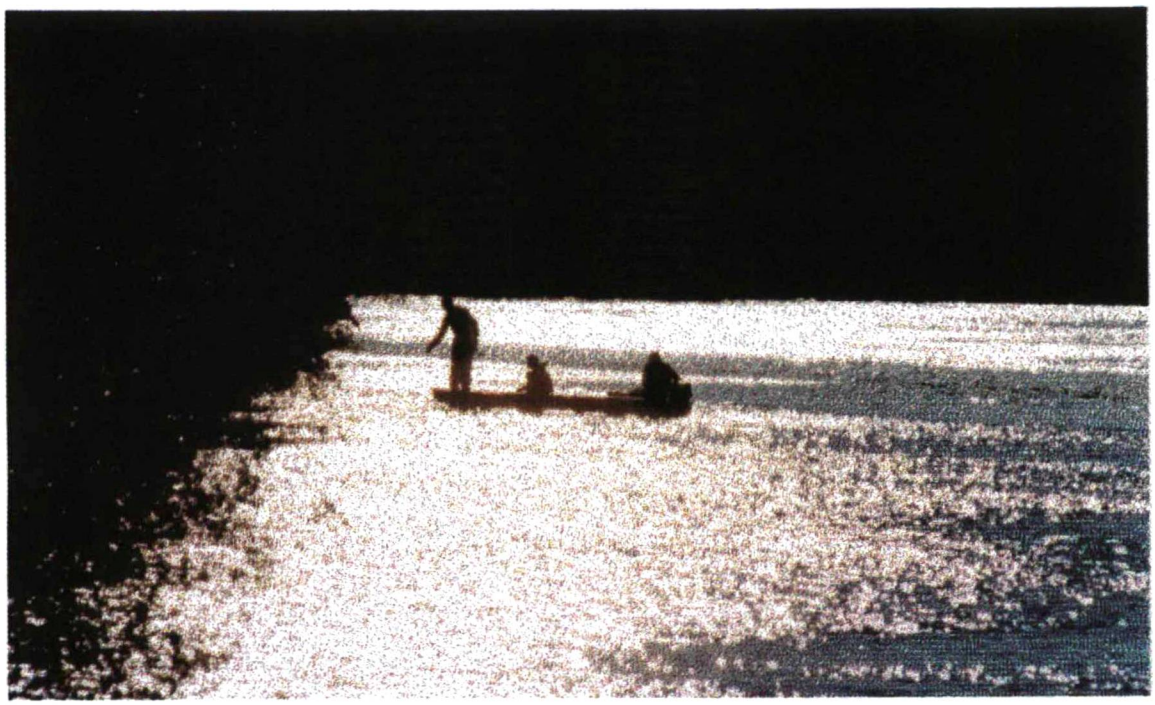


Foto 03

- Ponto de coleta P07 → Rio Iguaçu -

Foto 04

- Ponto de coleta P07 → Rio Iguaçu, vista da margem esquerda -

Foto 05

- Ponto de coleta P13 → Rio Iguaçu -

Foto 06

- Ponto de coleta P02 → Rio Cotejipe -

Foto 07

- Ponto de coleta P04 → Rio Adelaide -

Foto 08

- Ponto de coleta P05 → Rio Tormenta -

Foto 09

- Ponto de coleta P08 → Rio Guarani -

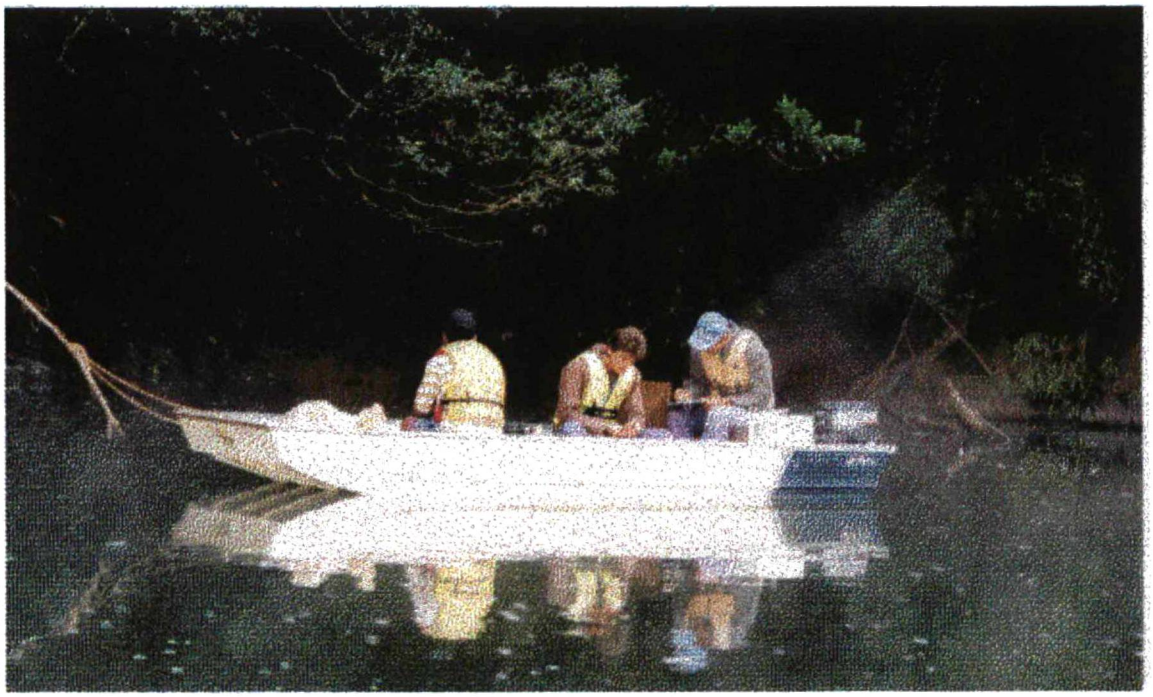


Foto 10

- Ponto de coleta P09 → Rio Guarani -

Foto 11

- Ponto de coleta P09 → Rio Guarani -

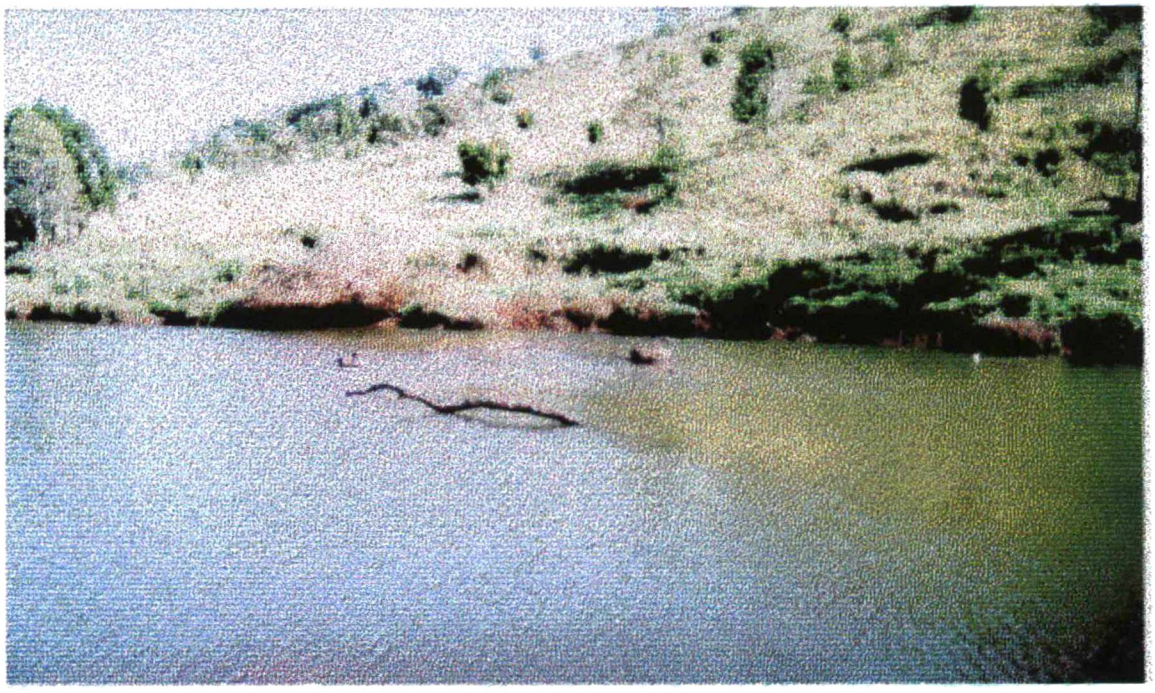


Foto 12

- Ponto de coleta P10 → Rio Jaracatiá -

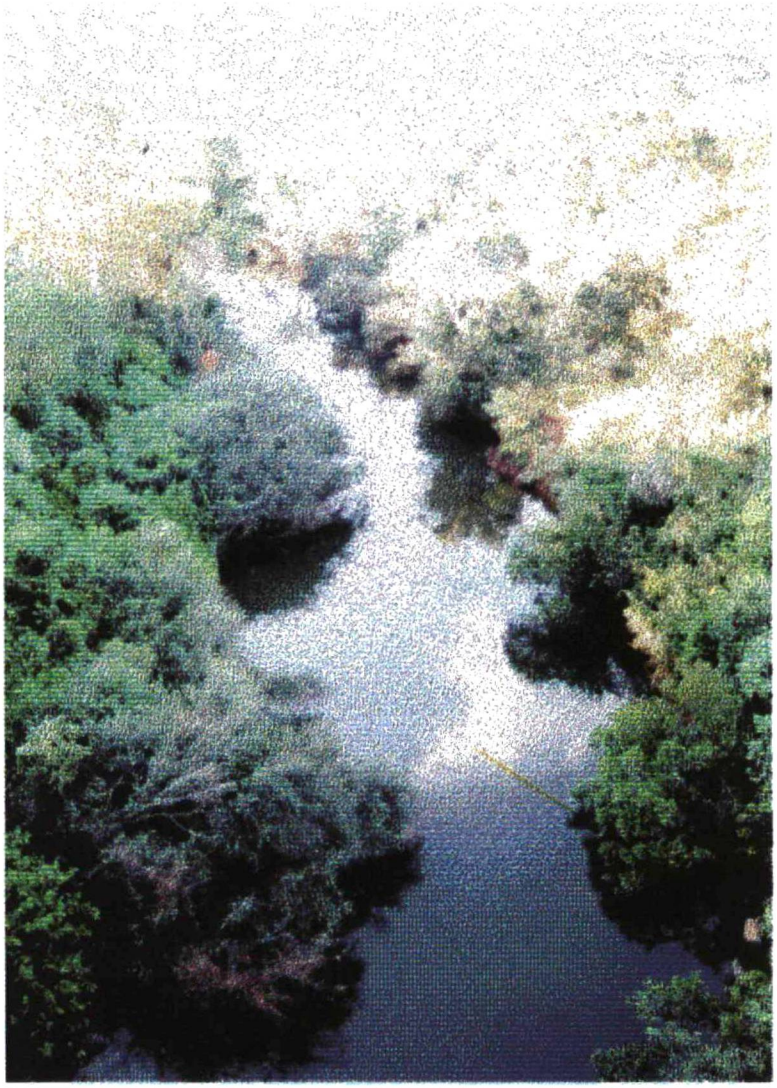


Foto 13

- Ponto de coleta P11 → Rio Jaracatiá -

Foto 14

- Ponto de coleta P12 → Rio Chopim -

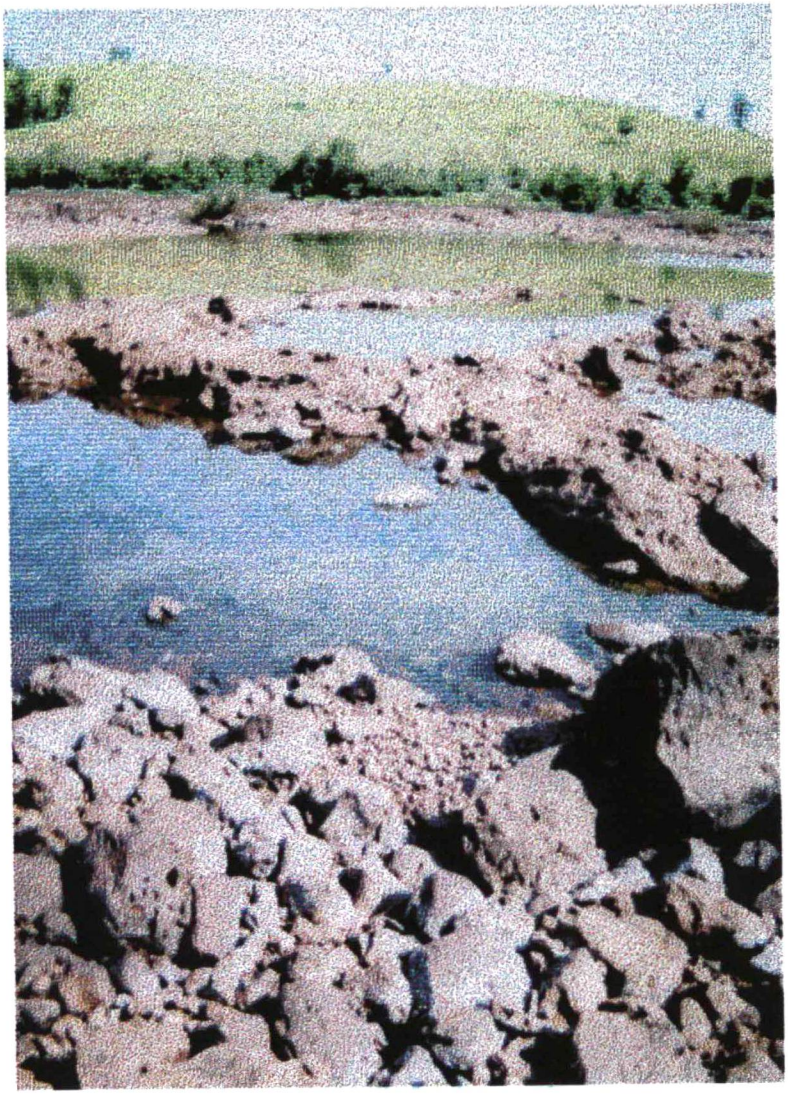


Foto 15

- Ponto de coleta P14 → Rio Chopim -

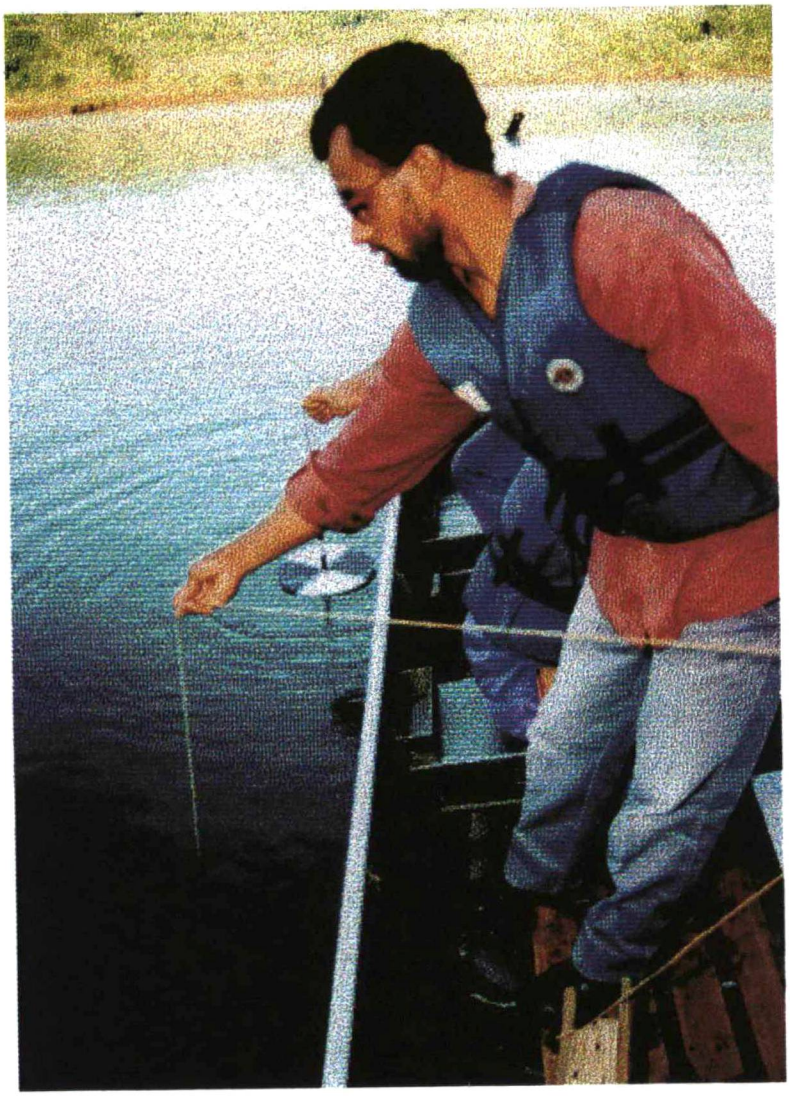


Foto 16

- Ponto de coleta P13 → Disco de Secchi -

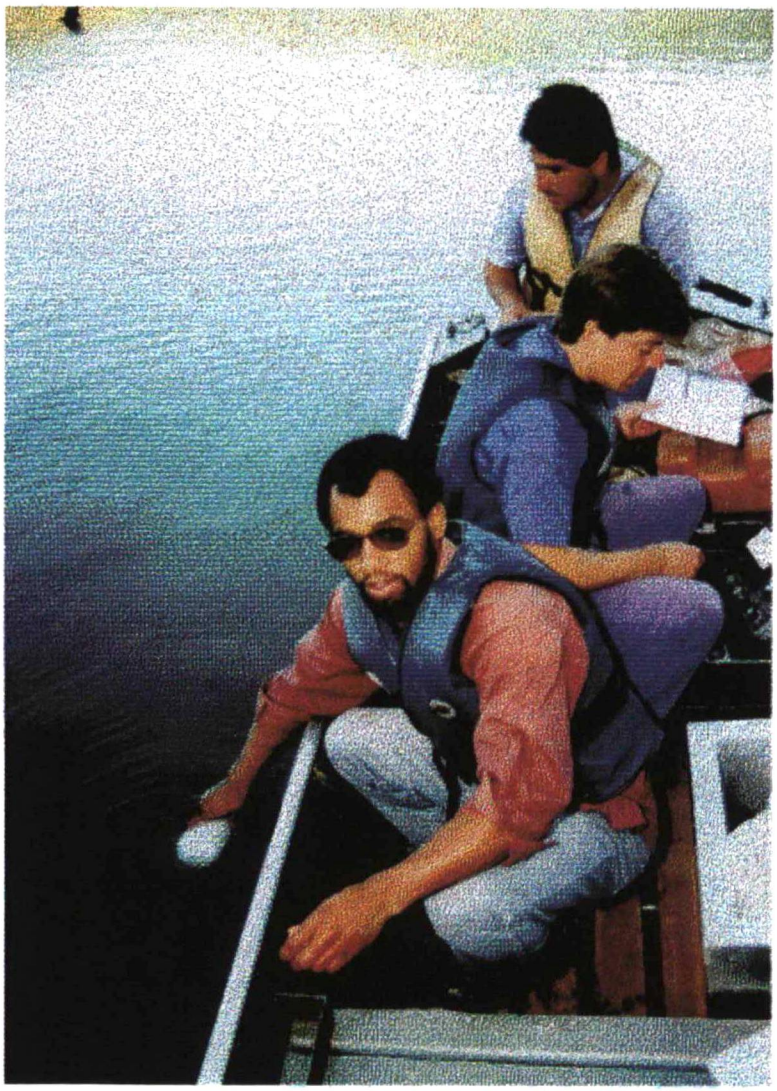


Foto 17

- Ponto de coleta P13 → Coleta de amostra -

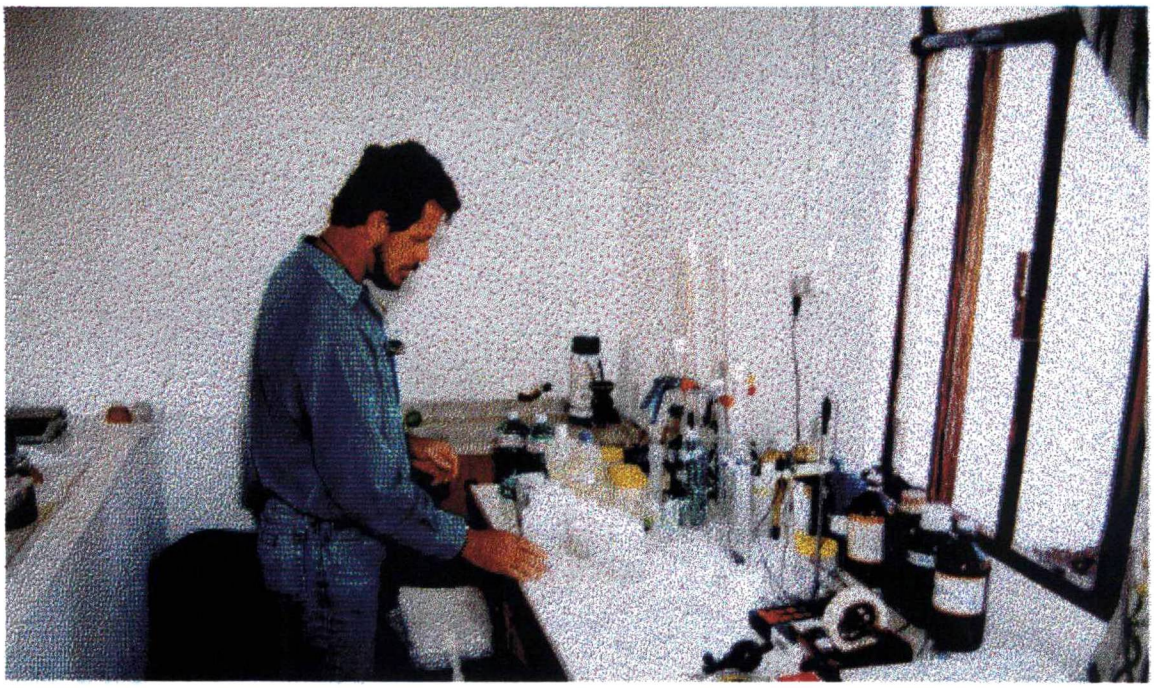


Foto 18

- Laboratório -

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01 - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater.* Washington, 1995.

02 - BACCHUS, A. *Field measurement of stream reaeration coefficient.* Toronto : Ontario Ministry of Environment, 1981. (Water Resources paper; 13)

03 - BICUDO, J. R.; JAMES, A. Measurement of reaeration in streams : comparison of techniques. *Journal of Environmental Engineering*, v. 115, n. 5, p. 992 - 1010, Oct, 1989.

04 - BRONSON, Richard. *Moderna introdução às equações diferenciais.* São Paulo : McGraw-Hill, 1976. 387p. (Coleção Schaum)

05 - CHAPRA, Steven. *Modelagem de qualidade da água em rios.* Curso realizado no Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, em junho de 1994.

06 - CHAPRA, Steven. Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill, 1997. (McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering)

07 - CHOW, Ven Te. *Handbook of applied hydrology* : a compendium of water resources technology. New York : McGraw-Hill, 1964.

08 - CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Applied hydrology.* New York : McGraw-Hill, 1988. 572 p. (McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering)

09 - CLEVELAND, Karen D. Predicting reaeration rates in Texas streams. *Journal of Environmental Engineering*, v. 115, n. 3, p. 620-632, June, 1989.

10 - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Diretoria de Engenharia e Construção. *Informe estatístico anual 1996.* Curitiba. 121p.

11 - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. *Balanço energético do Paraná 1980-1994*. Curitba, 1995. 126p.

12 - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA - Superintendência de Planejamento e Estudos. *Usina hidrelétrica de Salto Caxias; Revisão do estudo de viabilidade - Estudos de remanso*. Curitba, 1997.

13 - DAILY, James W.; HARLEMAN, Donald R. F. Fluid dynamics. Reading : Addison-Wesley, 1966. 453p.

14 - DZIEDZIC[a], Maurício. *Projeto HG-101. Estudos de qualidade da água no rio Iguaçu e no reservatório do aproveitamento hidrelétrico de Salto Caxias : relatório parcial de atividades n.º 01*. Curitiba, Oct. 1997.

15 - DZIEDZIC[b], Maurício; FERNANDES, Cristórvão; TOZZI, Marcos J. Coeficiente de reaeração - uma abordagem prática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12. ; 1997 ; Vitória. Anais. São Paulo : ABRH, 1997. v. 4, p.299-305.

16 - FERNANDES, Cristóvão; DZIEDZIC, Maurício; FILL, Heinz D.; TOZZI, Marcos J.; RAMALHO, Cristiane; CARVALHO, Maria C. F. *PEN - 04 ciências ambientais*. UFPR : CEHPAR. Curitiba, 1997.

17 - FISCHER, Hugo B. Dispersion prediction in natural streams. *Journal of the Sanitary Division*, v.94, n. SA5, p. 927-943, Oct. 1968.

18 - FISCHER, Hugo B. The mechanics of dispersion in natural streams. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 93, n. HY6, p. 187-216, Nov. 1967.

19 - FISCHER, Hugo B.; HANAMURA, Tetsuya. The effect of roughness strips on transverse mixing in hydraulic models. *Water Resources Research*, v . 11, n. 2, p. 362-364, Apr. 1975.

20 - FISCHER, Hugo B.; HOLLEY, E. R. Analysis in the use of distorted hydraulic models for dispersion studies. *Water Resources Research*, v. 7, n. 1, p. 46-51, Feb. 1971.

21 - FISCHER, Hugo B.; IMBERGER, Jörg; LIST, E. J.; KOH, Robert C. Y.; BROOKS, Norman H.. *Mixing in inland and coastal waters*. San Diego : Academic Press, 1979. 483p.

22 - GENEREUX, David P.; HEMOND, Harold F. Determination of gas exchage rate constant for a small stream on walker branch watershed, Tennessee. *Water Resources Research*, v. 28, n. 9, p. 2365 - 2374, Sept. 1992.

23 - GOLTERMAN, H. L.; CLYMO, R. S.; OHNSTAD, M. H. M. *Methods for physical and chemical analysis of fresh water*. Blackwell Scientific Publication, 1978. 213 p.

24 - HELOU, Luiz Carlos. *Acoplamento das equações da hidrodinâmica às da dispersão de poluentes*. São Paulo : EPUSP, 1994. 140p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

25 - HEMOND, Harold F.; FECHNER, Elizabeth J. *Chemical fate and transport in the environment*. San Diego : Academic Press, 1994. 338p.

26 - LAU, Y. L. *A review of conceptual models and predicting equations for reaeration in open-channel flow*. Ottawa : Inland Waters Branch, 1972. (Technical Bulletin: 61).

27 - LOUCKS, Daniel P.; STEDINGER, Jery R.; HAITH, Douglas A. *Water resource systems planning and analysis*. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1981. 559p.

28 - McGAUHEY, P. H. *Engineering management of water quality*. Berkeley : McGraw-Hill, 1968. (McGraw-Hill Series in Sanitary Science and Water Resources Engineering)

29 - MOOG, Douglas B.; JIRKA, Gerhard H. Macro-roughness effects on stream reaeration. In : Hydraulic Engineering '94 : proceedings of the 1994 Conference. New York : ASCE, 1994. P. 994-998

30 - O'CONNOR, Donald J.; DOBBINS, William E. Mechanism of reaeration in natural streams. *Transactions ASCE*, v. 123, p.641-666, 1958.

31 - OWEN, D. R. J.; HINTON, E. *A simple guide to finite elements*. Swansea : Pineridge, 1980. 136p.

32 - PINTO, Nelson L. de S.; HOLTZ, Antônio C. T.; MARTINS, José A.; GOMIDE, Francisco L. S. *Hidrologia básica*. São Paulo : E. Blücher, 1976. 278p.

33 - PORTO, Rubem L. L.; BRANCO, Samuel M.; CLEARY, Robert; COIMBRA, Roberto M.; EIGER, Sérgio; de LUCA, Sérgio J.; NOGUEIRA, Vicente de P. Q.; PORTO, Mônica, F. A. *Hidrologia ambiental*. São Paulo : ABRH, 1991. 514p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 3)

34 - RAMOS, Fábio; OCCHIPINTI, Antônio G.; VILLA NOVA, Nilson A.; MAGALHÃES, Paulo C.; CLEARY, Robert. *Engenharia hidrológica*. Rio de Janeiro : ABRH : UFRJ, 1982. 404p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 2)

35 - SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. *Qualidade das águas interiores do estado do Paraná 1987 - 1995.* Superintendência de desenvolvimento de recursos hídricos e saneamento ambiental. 1996.

36 - SISSOM, Leighton E.; PITTS, Donald R. *Fenômenos de transporte*. Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1979. 765p.

37 - SUGAI, Martha R. V. B., 1997. Comunicação pessoal.

38 - SUGAI, Martha R. V. B.; MESTRES, Pedro S.; GUGELMIN, José A.; COUTO, Fernando L. C. P.; SANTOS, Irani; CORADIN, Sueli T.; CAMARGO Jr, Aclélio R.; CHINASSO, Adriana. *Estudos Hidrológicos para o Projeto Básico - UHE Salto Caxias*. Curitiba : COPEL, 1993. (DPHE/VHID-011/93).

39 - THACKSTON, Edward L.; KRENKEL, Peter A. Reaeration prediction in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 95, n. SA1, p. 65-94, Feb. 1969.

40 - WYLIE, C. Ray. *Advanced engineering mathematics*. 4. Ed. New York : McGraw - Hill. 1975. 937p.

41 - INTERTECHNE[a] et al. *Usina hidrelétrica de Salto Caxias : relatório de impacto ambiental - RIMA*. Curitiba, nov. 1993.

42 - INTERTECHNE[b] et al. *Usina hidrelétrica de Salto Caxias : estudo de impacto ambiental - EIA*. Curitiba, nov. 1993.

43 - http://www.epa.gov/OST/QUAL2E-windows/

44 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC3770.html

45 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC5879.html

46 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC5880.html

47 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC5881.html

48 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC5882.html

49 - http://www.extension.umn.edu/Documents/D/C/DC6795.html

50 - http://www.inform.umd.edu:8080/Ed...QUALITY_THE_ANIMAL_COMPONENT.html

51 - http://www.inform.umd.edu:8080/Ed...RE_FROM_LIVESTOCK_OPERATIONS.html

52 - http://www.ravensdown.co.nz/html/newsletter/Summer97/html/page_8.html

53 - http://www2.ncsu.edu/bae/programs/extension/publicat/wqwm/ag439_1.html