

# Estabelecimento de critérios para dimensionamento de lagoa de estabilização

HIDEO KAWAI(\*)  
TSUTOUM YANO(\*)  
MARIA J.M. ROCHA(\*)  
AYLSON LIMAS(\*)  
BORIS SCHENEIDERMAN(\*)

## RESUMO

O presente estudo foi realizado com o objetivo de estabelecer critério de projeto de lagoa de estabilização mais adequado, para condição brasileira, principalmente no Estado de São Paulo.

Foi efetuado o levantamento de parâmetros de funcionamento nas 7 lagoas em operação e em duas lagoas experimentais, baseado no qual foi verificada a aplicabilidade de vários modelos para dimensionamento de lagoa de estabilização.

## 1. INTRODUÇÃO

A lagoa de estabilização é um dos sistemas de tratamento mais utilizado no Brasil, devido ao seu baixo custo de construção e simplicidade de operação.

Entretanto, levantamentos baseados em projetos e sistemas em operação mostram a grande diversidade de critérios para o dimensionamento das lagoas, criando uma série de dificuldades para utilização deste sistema. Este fato é decorrente da insuficiência de estudos para o estabelecimento de critérios adaptados às condições brasileiras.

Considerando as observações acima expostas, foi realizado o presente estudo com o propósito de verificar a aplicabilidade de critérios já existentes e/ou estabelecer um novo critério no Estado de São Paulo. Para atender a esse objetivo, foram realizados levantamentos de dados em diversas lagoas de estabilização, situadas principalmente em São Paulo, durante o período de 1977 a 1981.

Embora tenham sido estudados vários parâmetros de funcionamento das lagoas, será enfocado, na presente, somente o comportamento da DBO, considerado o parâmetro fundamental para o dimensionamento de lagoas.

Cumpra ressaltar que, no desenvolvimento do estudo, grande parte dos recursos financeiros foi obtida através do Departamento de Pesquisa do Banco Nacional da Habitação - BNH, Contrato CTS-0057/77, BNH-CETESB.

Registre-se aqui também os agradecimentos às Prefeituras de Itapira, Valparaíso, Pradópolis, Guararapes e Maringá, bem como aos Escritórios Regionais da SABESP de Nhandeara, Pindamonhangaba, Mairiporã e Tatuí que prestaram valiosas colaborações para a realização do presente estudo.

## 2. TEORIA BÁSICA DO MODELO DE DIMENSIONAMENTO

Dada a complexidade do problema, não foi elaborado até hoje um método satisfatório que englobe todos os processos envolvidos numa lagoa de estabilização. Atualmente, na prática, recorre-se a métodos empíricos, procurando aproveitar a experiência obtida em lagoas existentes e a modelos que equiparam a lagoa a um reator processando uma reação química.

O primeiro enfoque talvez seja até mais seguro no estágio atual de nosso conhecimento mas apresenta a grande dificuldade em julgar o funcionamento da lagoa nos locais que apresentam características e circunstâncias diferentes do padrão.

O recurso à modelagem é mais genérico e mais promissor, a longo prazo, pois procura interrelacionar os vários fatores relevantes com o objetivo de prever quantitativamente os efeitos decorrentes de sua variação. Infelizmente, nesse tipo alternativo surgem também dificuldades ligadas à escolha dos fatores a serem considerados nos modelos e das hipóteses simplificadoras, que todo modelo matemático deve introduzir para possibilitar tanto a sua elaboração como sua aplicação prática.

(\*) Superintendência de Pesquisa - DTD - CETESB.

Os vários modelos elaborados até hoje, tendo em vista a constituição e a aplicabilidade, podem ser assim resumidos: modelo construído por Vicente et al.<sup>(1)</sup> para lagoa anaeróbia, modelo elaborado por Hermann e Gloyna<sup>(2)</sup>, Marais e Shaw<sup>(3)</sup> e MacGarry e Pescod<sup>(4)</sup> para lagoa facultativa.

O modelo de lagoa anaeróbia é aproximado, com base na teoria do reator de mistura completa, através de resultados de experimentos obtidos no tanque séptico e "aquapriva" nos Estados Unidos e África do Sul para utilização nas regiões subtropical e tropical. A adaptação deste modelo, conforme a característica da região, é possível de ser feita, por meio de ajuste de dois coeficientes, porém, sem levar em conta o efeito específico relativo à temperatura.

O modelo de Hermann e Gloyna baseia-se na lei de Arrhenius, que rege a influência da temperatura sobre a velocidade das reações químicas e permite prever a carga superficial admissível em termos de DBO, para garantir uma eficiência de remoção em torno de 90%, em função da temperatura e da profundidade. O modelo tem a vantagem de sua fácil aplicabilidade, exigindo um mínimo de informações prévias — temperatura e profundidade. Entretanto, ele não permite avaliar a variação da eficiência em função de diferentes cargas aplicadas. Também, não foi levado em consideração o fator referente à influência do material depositado no funcionamento da lagoa.

Para corrigir esses últimos inconvenientes, Marais e Shaw desenvolveram um modelo, equiparando o funcionamento de uma lagoa de estabilização ao de um reator de mistura completa, com lodo acumulado, processando uma reação de primeira ordem, seguindo a lei de Arrhenius, quanto à temperatura.

Do ponto de vista prático, o modelo de Marais e Shaw deve ser considerado como uma extensão do modelo de Hermann e Gloyna, porém ainda com falhas na sua constituição.

Primeiramente, não ocorre na prática a circulação do líquido em regime de mistura completa, hipótese essa que serviu como elemento básico para a elaboração do modelo.

O regime de mistura que se verifica na lagoa de estabilização pode caracterizar-se como intermediário entre mistura completa e escoamento tubular ("plug flow").

Em segundo lugar, foram adotados nos modelos citados uma única reação

hipotética de primeira ordem e um único valor global da constante de velocidade de reação para estimar o progresso da degradação de matéria orgânica. Na condição real, entretanto, a reação bioquímica que ocorre na lagoa não se processa somente em ordem unitária e com uma única constante de velocidade da reação, havendo variação contínua desses valores à medida que a matéria orgânica sofre degradação.

Thirumurthi<sup>(5)</sup>, a fim de equacionar melhor tal fator hidráulico, elaborou uma expressão introduzindo um parâmetro relativo à dispersão axial que permite ajustar, de forma satisfatória, o movimento líquido na lagoa, cuja determinação, porém, ofereceu dificuldades práticas.

O modelo de MacGarry e Pescod, de constituição puramente estatística, foi elaborado com base nos dados levantados nas regiões temperada e subtropical, correlacionando-se os valores de cargas aplicadas e eficiências de remoção. Recentemente, tem-se elaborado o mesmo tipo de modelo citado por Mara e Silva para a região norte do Brasil<sup>(6)</sup> e por Yanez et al.<sup>(7)</sup> para a região de San Juan, Peru.

Como se verifica em qualquer modelo desse gênero, ele pode ser utilizado dentro das faixas de variação dos valores obtidos e assim mesmo verifica-se uma significativa discrepância na previsão de dimensionamento decorrente, devido à variação de temperatura.

Quanto à questão de quais desses modelos apresentam melhor aplicabilidade em nosso meio ambiente, ela poderá ser esclarecida somente através de investigações detalhadas com o levantamento de parâmetros de funcionamento em diversas condições operacionais e climatológicas.

### 3. PROCEDIMENTO DO TRABALHO

#### 3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

Embora existam aproximadamente 60 lagoas no Estado de São Paulo e mais outras dezenas de lagoas nos demais Estados do Brasil para o tratamento de esgotos domésticos, existem poucos dados em disponibilidade para se avaliar o funcionamento em vários níveis de cargas aplicadas.

Por esse motivo, foram selecionadas inicialmente 7 lagoas de estabilização no Estado de São Paulo, das quais, 4 funcionam no sistema australiano e 3 em facultativa unicelular, a fim de levantar parâmetros de funcionamento em função de cargas apli-

cadas e condições ambientais. Para a seleção destas lagoas foram levados em consideração: localização geográfica, condição climatológica, condição de manutenção e operação, tipo de lagoa, cargas aplicadas, etc.

Além destas 7 lagoas, escolheram-se outras duas lagoas experimentais com o objetivo de verificar o funcionamento em diferentes níveis de cargas de DBO, bem como estabelecer a máxima carga admissível em função de fatores ambientais.

Uma das lagoas experimentais está localizada no município de Maringá, Estado do Paraná. O sistema é composto de duas séries de lagoas anaeróbia e facultativa, possibilitando utilizar uma das séries para efetuar experimentos com diferentes cargas por meio de alimentação total de esgoto afluente na estação.

Foram realizados nestas lagoas levantamentos de dados em cinco diferentes cargas de DBO no sistema australiano (anaeróbia e facultativa) e um levantamento para lagoa facultativa primária. Inexistindo sistema hidráulico para alimentar o esgoto sanitário afluente diretamente à lagoa facultativa, para a realização de experimento da lagoa facultativa primária, a lagoa anaeróbia foi transformada em facultativa, mediante diminuição da profundidade e alteração da fase biológica.

Paralelamente, foi escolhida uma lagoa facultativa localizada no município de Tatuí — São Paulo, na qual se efetuaram obras de compartimentação com objetivo de formar 3 células de lagoas experimentais, ou seja, 2 lagoas anaeróbias e 1 facultativa. O trabalho nesta lagoa foi iniciado em janeiro de 1980. Entretanto, logo após o término da 1ª campanha de coleta (maio/80), ocorreram sucessivos acidentes, como o rompimento de emissário, o lançamento clandestino de despejos industriais, a falta de água para abastecimento, etc.

Por esse motivo, decidiu-se substituir a lagoa de Tatuí por uma das células da lagoa de Mairiporã — São Paulo, embora esta não possua condições tão favoráveis como a de Tatuí, tais como: estrutura hidráulica, condição climática, etc. para o prosseguimento das experiências de lagoa facultativa primária. Na lagoa experimental de Mairiporã foram efetuadas 3 campanhas de coleta em 3 diferentes cargas aplicadas.

Os dados de localização, hidráulicos e o período de levantamento das lagoas estudadas são resumidos no Quadro 1.

| Local e tipo de lagoa  | Área (m <sup>2</sup> )   | Volume (m <sup>3</sup> )  | Profundidade (m)  |
|--|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| GUARARAPES<br>facultativa primária                                       | 13.000                   | 20.800                    | 1,6               |
| NHANDEARA<br>facultativa primária  | 7.200                    | 6.480                     | 0,9               |
| ITAPIRA<br>anaeróbia<br>facultativa secundária                           | 38.500<br>45.000         | 57.750<br>45.000          | 1,5<br>1,0        |
| PINDAMONHANGABA<br>anaeróbia<br>facultativa secundária                   | 10.400<br>43.200         | 31.200<br>38.880          | 3,0<br>0,9        |
| PRADÓPOLIS<br>anaeróbia<br>facultativa secundária                        | 4.000<br>11.000          | 6.000<br>10.000           | 1,5<br>0,9        |
| VALPARAÍSO<br>facultativa primária                                       | 8.575                    | 8.575                     | 1,0               |
| MAIRIPORÃ<br>anaeróbia<br>facultativa secundária<br>facultativa primária | 2.556<br>11.656<br>2.556 | 7.668<br>11.656<br>6.390  | 3,0<br>1,0<br>2,2 |
| MARINGÁ<br>anaeróbia<br>facultativa secundária<br>facultativa primária   | 4.000<br>18.500<br>4.000 | 10.000<br>37.000<br>6.000 | 2,5<br>2,0<br>1,5 |
| TATUI<br>anaeróbia<br>facultativa secundária                             | 2.425                    | 500<br>3.637              | 1,5               |

QUADRO 1

### 3.2. COLETA DE AMOSTRAS

As campanhas de coleta de amostras nas 7 lagoas citadas anteriormente foram realizadas em dois períodos distintos. A primeira campanha foi desenvolvida nos meses de outubro e novembro de 1977 e a segunda em julho e agosto de 1978, a fim de se verificar a interferência dos fatores climatológicos no funcionamento da lagoa de estabilização em períodos mais quente e mais frio do ano.

A amostragem foi efetuada duas vezes por semana, durante seis semanas consecutivas em cada período de estudo. Normalmente, as amostras foram coletadas de hora em hora, obtendo-se uma amostra composta de duas horas, durante 24 horas. Foram medidas vazões do esgoto afluente de hora em hora, acompanhando a coleta de amostras para análise.

Os dados relativos aos fatores climatológicos, tais como velocidade e direção do vento, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, etc. foram

obtidos nos postos meteorológicos próximos às lagoas estudadas.

Para cada carga experimental, as coletas de amostras foram efetuadas durante aproximadamente 15 dias, intercalando-se 10 coletas em regime de 12 horas no período diurno, e 3 coletas em regime de 24 horas. Na lagoa experimental de Mairiporã, as coletas diurnas foram substituídas por coletas de 24 horas, formando, através da mistura de amostras horárias, uma única amostra composta diária.

Antes de se iniciar as coletas, houve a espera de um período de 1 a 2 meses para estabilização da fase biológica das lagoas para cada carga aplicada.

Na lagoa facultativa de Maringá efetuou-se investigação intensiva da variação vertical das características das águas. Foram instalados junto à lagoa um anemógrafo (Lambrecht, modelo 1482) e um actinógrafo (Fuess, tipo Robtzh) para medição da direção e velocidade do vento e radiação solar, respectivamente. Os demais procedi-

mentos adotados nas lagoas experimentais são basicamente análogos aos das 7 lagoas de estabilização.

Todos os valores de DBO e temperatura, utilizados na presente apresentação, são de DBO<sub>20°C</sub><sup>5d</sup> (incluindo algas) e temperatura do ar, respectivamente.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CONTRIBUIÇÕES DA VAZÃO DO ESGOTO E DBO

As contribuições de vazão dos esgotos e DBO por habitante são os parâmetros básicos para o projeto de qualquer tipo de tratamento.

De modo geral, todos os afluentes dos esgotos estudados apresentam comportamentos semelhantes quanto às variações horárias de vazão e à concentração de DBO, verificando-se curvas com dois picos: o mais elevado, em torno de 10 a 14 horas, e um mais baixo no período entre 18 e 22 horas aproximadamente.

A concentração média ponderada da DBO e as contribuições diárias por habitante da vazão do esgoto e DBO estimada com base na população servida pela rede de esgoto (5 pessoas por ligação), em cada município ao qual pertence a lagoa de estabilização estudada, são apresentadas no Quadro 2.

Não se levou em consideração no cálculo do valor médio das concentrações de DBO, a contribuição da vazão do esgoto do município de Pindamonhangaba, tendo em vista significativa infiltração observada na rede de esgoto durante o período do levantamento.

Conforme se verifica no Quadro 2, quanto à contribuição diária da vazão "per capita", o estudo mostrou que se pode contar com dados estáveis estatisticamente, da ordem de 160 l/hab.d, sendo este valor próximo dos valores utilizados na Europa em geral e bem menor do que nos Estados Unidos<sup>(8)</sup>. Como o tempo de detenção de uma dada lagoa é inversamente proporcional à vazão, conclui-se que, quanto a esse fator, a prática européia de dimensionamento está mais próxima das condições reinantes na região em estudo do que a norte-americana. Deve-se acrescentar que o levantamento realizado em dez bairros da cidade de São Paulo<sup>(9)</sup> resultou numa média de 168 l/hab.dia.

Como relação à carga de DBO, verificou-se que a população estudada

Concentração média ponderada da DBO e contribuição diária da vazão do esgoto e DBO por habitante em cada município estudado

| Local da lagoa         | Concentração de DBO (mg/l) | Contribuição de esgoto (l/hab.d) | Contribuição de DBO (g/hab.d.) |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Guararapes             | 232,0                      | 175                              | 40,5                           |
| Itapira                | 286,5                      | 171                              | 47,0                           |
| Pradópolis             | 271,1                      | 189                              | 51,6                           |
| Nhandeara              | 221,9                      | 154                              | 34,3                           |
| Pindamonhangaba        | 140,3                      | 287                              | 40,4                           |
| Mairiporã              | 286,1                      | 180                              | 52,0                           |
| Valparaíso             | 251,6                      | 133                              | 33,4                           |
| Maringá                | 381,5                      | 133                              | 51,0                           |
| MÉDIA COM $\sum_{n-1}$ | 275,8 ± 53,0               | 162,1 ± 22,5                     | 43,7 ± 7,6                     |

QUADRO 2

contribui com 44 g/hab.dia, enquanto que nos países europeus<sup>(10)</sup> essa carga se apresenta em níveis mais elevados; 54 g/hab.dia. Isso significa que, ao tomar por base a população servida pela rede de esgotos para efeito de dimensionamento, as lagoas a serem projetadas poderão ter dimensões inferiores às dos países europeus.

#### 4.2. FUNCIONAMENTO DAS LAGOAS

Todos os dados levantados nas lagoas anaeróbias e nas lagoas facultativas, primária e secundária, encontram-se resumidos nos Quadros 3 e 4.

Dados operacionais levantados nas várias lagoas anaeróbias

| Local da lagoa  | Carga aplicada (DBO kg/ha.d) | Carga removida (DBO kg/h.d) | Tempo de detenção (dias) | Temperatura (°C) | Profundidade (m) | Conc. da DBO afluente (mg/l) | Conc. da DBO efluente (mg/l) | Eficiência (%) |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| ITAPIRA         | 375                          | 225                         | 9,4                      | 23,3             | 1,5              | 240,0                        | 77,4                         | 68             |
| PINDAMONHANGABA | 1.164                        | 449                         | 3,6                      | 24,2             | 3,0              | 140,0                        | 81,6                         | 42             |
| PRADÓPOLIS      | 528                          | 308                         | 7,5                      | 25,2             | 1,5              | 265,8                        | 73,5                         | 72             |
| PRADÓPOLIS      | 527                          | 321                         | 8,0                      | 19,0             | 1,5              | 276,3                        | 107,4                        | 61             |
| ITAPIRA         | 450                          | 257                         | 10,5                     | 18,0             | 1,5              | 333,0                        | 142,0                        | 57             |
| MARINGÁ         | 825                          | 586                         | 10,5                     | 21,6             | 2,5              | 346,0                        | 101,0                        | 71             |
| MARINGÁ         | 1.100                        | 825                         | 8,3                      | 19,5             | 2,5              | 364,0                        | 91,0                         | 75             |
| MARINGÁ         | 1.450                        | 1.073                       | 7,2                      | 24,9             | 2,5              | 416,0                        | 108,0                        | 74             |
| MARINGÁ         | 2.025                        | 1.357                       | 4,8                      | 25,1             | 2,5              | 391,0                        | 128,0                        | 67             |
| MARINGÁ         | 2.275                        | 1.479                       | 4,3                      | 19,7             | 2,5              | 389,0                        | 138,0                        | 65             |
| TATUI           | 4.032                        | 1.249                       | 1,2                      | 25,2             | 2,1              | 228,0                        | 158,0                        | 31             |

QUADRO 3

Dados operacionais levantados nas várias lagoas facultativas primárias e secundárias

| Local de lagoa               | Carga aplicada (DBO kg/ha.d) | Carga removida (DBO kg/ha.d) | Tempo de detenção (dias) | Temperatura (°C) | Profundidade (m) | Conc. da DBO afluente (mg/l) | Conc. da DBO efluente (mg/l) | Eficiência (%) |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| Lagoa facultativa primária   |                              |                              |                          |                  |                  |                              |                              |                |
| GUARARAPES                   | 162                          | 134                          | 21,0                     | 26,9             | 1,6              | 212,6                        | 36,5                         | 83             |
| NHANDEARA                    | 200                          | 168                          | 10,0                     | 26,9             | 0,9              | 221,9                        | 31,4                         | 81             |
| GUARARAPES                   | 212                          | 176                          | 19,0                     | 22,4             | 1,6              | 251,3                        | 42,2                         | 83             |
| PRADÓPOLIS                   | 75                           | 58                           | 14,5                     | 19,3             | 1,0              | 107,4                        | 24,2                         | 77             |
| VALPARAÍSO                   | 89                           | 80                           | 28,4                     | 22,4             | 1,0              | 251,6                        | 24,0                         | 90             |
| MARINGÁ                      | 500                          | 345                          | 11,6                     | 17,9             | 1,5              | 382                          | 158,0                        | 69             |
| MAIRIPORÃ                    | 257                          | 146                          | 14,0                     | 22,0             | 2,2              | 172                          | 73,0                         | 57             |
| MAIRIPORÃ                    | 376                          | 248                          | 14,4                     | 21,0             | 2,2              | 252                          | 85,0                         | 66             |
| Lagoa facultativa secundária |                              |                              |                          |                  |                  |                              |                              |                |
| ITAPIRA                      | 105                          | 78                           | 7,4                      | 23,3             | 1,0              | 77,4                         | 20,0                         | 74             |
| PINDAMONHANGABA              | 164                          | 114                          | 4,5                      | 24,2             | 0,9              | 81,6                         | 24,1                         | 70             |
| PRADÓPOLIS                   | 53                           | 27                           | 12,6                     | 25,0             | 1,1              | 73,5                         | 36,9                         | 49             |
| ITAPIRA                      | 163                          | 122                          | 8,5                      | 18,0             | 1,0              | 142,0                        | 35,7                         | 75             |
| MAIRIPORÃ                    | 113                          | 91                           | 15,7                     | 16,8             | 1,0              | 178,3                        | 36,5                         | 81             |
| MARINGÁ                      | 50                           | 36                           | 38,9                     | 21,6             | 2,0              | 101,0                        | 29,0                         | 72             |
| MARINGÁ                      | 60                           | 44                           | 30,6                     | 19,5             | 2,0              | 91,0                         | 24,0                         | 73             |
| MARINGÁ                      | 140                          | 102                          | 17,8                     | 25,1             | 2,0              | 128,0                        | 35,0                         | 73             |
| MARINGÁ                      | 80                           | 52                           | 26,8                     | 24,9             | 2,0              | 108,0                        | 38,0                         | 65             |
| MARINGÁ                      | 170                          | 111                          | 15,9                     | 19,7             | 2,0              | 138,0                        | 48,0                         | 65             |
| TATUI                        | 320                          | 214                          | 8,6                      | 25,2             | 1,5              | 158,0                        | 53,0                         | 67             |

QUADRO 4

Nas lagoas anaeróbias, as cargas de DBO aplicadas variaram de 375 a 4.032 kg/ha.d com tempo de detenção entre 1,2 e 10,5 dias. As temperaturas médias do ar em cada período de levantamento oscilaram na faixa de 18,0 a 25,2°C. As profundidades das lagoas levantadas variaram de 1,5 a 3,0 metros.

Com exceção das lagoas dos municípios de Tatuí e Pindamonhangaba, as eficiências na remoção da DBO, de modo geral, apresentaram-se elevadas. Na lagoa anaeróbia de Maringá, embora com alta carga aplicada (870 a 2.300 kg/ha.d), obtiveram-se eficiências de 65 a 75%

A lagoa anaeróbia de Tatuí, que foi operada com tempo de detenção de 1,2 dias e com carga de 4.032 kg/ha.d., apresentou eficiência praticamente idêntica à de um decantador.

Na lagoa facultativa de Pindamonhangaba, notou-se apreciável assoreamento durante os períodos de levantamento, podendo ter ocasionado baixa eficiência da remoção de DBO.

Problemas de odor foram registrados nas lagoas de Tatuí e Itapira. Porém, durante todo o período de estudo na lagoa anaeróbia de Maringá, não houve problema quanto à produção de gás sulfídrico, mesmo com carga elevada. Os valores de pH, medidos no período de máxima carga aplicada (2.300 kg/ha.d), variaram de 6,5 a 7,2.

Com relação às lagoas facultativas, foram efetuados oito levantamentos nas lagoas primárias e dez nas lagoas secundárias.

Foram observados funcionamento e eficiências satisfatórias (81 e 83%) nas lagoas primárias de Nhandeara e Guararapes com cargas da ordem de 200 kg/ha.d.

Com a elevada carga testada (500 kg/ha.d) na lagoa primária de Maringá, resultou uma eficiência de 69%. Durante o levantamento de dados, a coloração da água tornou-se verde pálida, dando sinal de inibição da produção de algas. A temperatura média durante o estudo foi de 17,9°C.

Foi detectado o mesmo nível de eficiência na lagoa facultativa primária experimental de Mairiporã, com carga de 375 kg/ha.d. Conforme verificou-se na lagoa de Maringá, a produção de algas foi reduzida em relação à encontrada normalmente na lagoa facultativa em funcionamento normal. As concentrações de oxigênio, medidas em várias profundidades da água, mostraram a presença de camada aeróbia

apenas em alguns centímetros de espessura a partir da superfície.

Deve-se ressaltar que, na maioria dos casos, as épocas dos estudos realizados com maiores cargas aplicadas foram no período de outono e início de inverno (março a maio), quando não ocorreram condições climáticas favoráveis para funcionamento de lagoa de estabilização. Com temperatura elevada e intensidade de radiação maior, é possível obter melhores eficiências do que nos períodos acima mencionados. De fato, em experimento realizado em Campina Grande, Estado da Paraíba, obteve-se 80% de eficiência com carga de 400 kg/ha.d na lagoa primária<sup>(6)</sup>.

Convém acrescentar, também, que a mesma ordem de eficiência de 80%, foi obtida nas lagoas experimentais de San Juan, Peru, com carga de DBO extremamente elevada (1.100kg/ha.d), embora as condições climáticas sejam semelhantes às da região próxima à cidade de São Paulo.

Com relação à lagoa secundária, a máxima carga de DBO estudada foi de 320 kg/ha.d e a mínima de 50 kg/ha.d, variando a eficiência de 49 a 72%.

Não se verificou uma relação proporcional entre carga aplicada e eficiência, ou seja, as cargas menores nem sempre apresentaram as maiores eficiências. Por exemplo, nas lagoas de Pradópolis e num dos levantamentos realizados na lagoa secundária de Maringá, elas foram avaliadas em apenas 49 e 65%, respectivamente, aplicando-se cargas baixas de 53 e 80 kg/ha.d, enquanto que na lagoa de Itapira e na mesma lagoa acima citada (de Maringá) o nível de 75% de eficiência foi obtido em carga de 140 e também de 163 kg/ha.d.

O fato importante que deve-se ressaltar no projeto da lagoa facultativa secundária, é que cerca de 90% da matéria orgânica contida no esgoto doméstico é passível de ser biodegradada pelo sistema biológico de tratamento convencional.

Assim, em caso do sistema de lagoa australiano (anaeróbia e facultativa), a eficiência da remoção da DBO na lagoa facultativa secundária depende da eficiência da lagoa anaeróbia. Se ocorrer maior remoção da DBO na lagoa anaeróbia, a eficiência na lagoa secundária é automaticamente menor. De fato, ocorreram 72 e 65% das remoções da DBO, respectivamente, nas lagoas anaeróbias de Pradópolis e Maringá, não havendo praticamente possibilidade de se obter maiores eficiências

do que as verificadas nas lagoas secundárias correspondentes.

A explanação sugere que o tempo de detenção excessivamente prolongado, ou seja, a carga aplicada extremamente menor, não traz nenhum benefício na melhoria da eficiência e, conseqüentemente, no uso econômico do terreno.

Os dados obtidos na lagoa facultativa secundária de Tatuí representam uma indicação importante para o limite máximo de carga aplicável. Porém, não se justifica a aplicação da carga excessivamente elevada na lagoa secundária, pois, a distribuição racional de cargas aplicadas nas lagoas anaeróbia e facultativa poderá resultar em melhor rendimento global no sistema de lagoa de estabilização em série.

Acredita-se que, pelos resultados levantados no presente estudo, pode-se aplicar satisfatoriamente uma carga superficial de 150 kg/ha.d para lagoas secundárias em condição climática do Estado de São Paulo.

## 5. VERIFICAÇÃO DO MODELO DE DIMENSIONAMENTO

O presente item tem como finalidade verificar a aplicabilidade de vários modelos teóricos e estatísticos, já existentes, com os dados levantados nas lagoas em estudo. Em alguns casos, onde os modelos existentes não são aplicáveis, tal como no caso da lagoa anaeróbia, apresentado a seguir, tentou-se estabelecer um modelo que pudesse servir de orientação para o dimensionamento do sistema de tratamento em estudo.

### 5.1. LAGOA ANAERÓBIA

#### a) Aplicabilidade do modelo elaborado por Vincent et al.

É o único modelo encontrado até o presente momento para o projeto de lagoa anaeróbia. A equação abaixo foi desenvolvida por Vincent e seus colaboradores:

$$S = \frac{S_0}{K_n \left( \frac{S}{S_0} \right)^n R + 1} \dots \dots 1$$

$S_0$  e  $S$  = concentrações de DBO no afluente e efluente, respectivamente.

$R$  = tempo de detenção para sistema de mistura completa.

$n$  = expoente a ser determinado pelo experimento.

$K_n$  = coeficiente de projeto.

Através da técnica de aproximação sucessiva de mínimos quadrados, foi efetuado o ajuste dos valores de  $n$  e  $K_n$  que variaram de acordo com as características regionais do projeto, utilizando-se os dados levantados no presente estudo (Quadro 3). Os valores mais aproximados de  $n$  e  $K_n$  foram de 3,6 e 38,5 respectivamente.

No entanto, observou-se um alto coeficiente de variação (de 74%), mostrando aplicabilidade insatisfatória do modelo testado, de acordo com os dados levantados no presente estudo.

Deve-se mencionar que foram excluídos da verificação apresentada anteriormente, os dados obtidos na lagoa de Tatuí e Pindamonhangaba, devido à baixa eficiência registrada na primeira lagoa e intenso assoreamento ocorrido durante o levantamento da segunda lagoa, os quais foram considerados impróprios para o estabelecimento de critério do projeto.

### b) Modelo estatístico

Como não houve sucesso na aplicabilidade do modelo teórico e tendo em vista a complexidade dos processos físicos, químicos, biológicos e climatológicos que envolvem o funcionamento da lagoa anaeróbia, tentou-se estabelecer um modelo estatístico através de correlação dos dados coletados.

Na Figura 1, verifica-se uma correlação linear entre as cargas aplicadas e removidas provenientes das várias lagoas em estudo.

Foi estabelecida a seguinte correlação com coeficiente elevado de 0,9866 e baixo valor do coeficiente de variação (9%).

$$\lambda_{\delta} = -14,4555 + 0,6867 \lambda_s \dots\dots 2$$

onde:

$$\lambda_{\delta} = \text{DBO removida kg/ha.d}$$

$$\lambda_s = \text{carga de DBO aplicada kg/ha.d.}$$

Da mesma maneira, foram introduzidos na equação 2 os fatores de temperatura ( $T$ ) e tempo de detenção ( $t$ ), segundo dados constantes no Quadro 3, resultando as seguintes expressões:

$$\lambda_{\delta} = -86,0971 + 0,6543 \lambda_s + 3,3985T \dots\dots 3$$

coeficiente de correlação = 0,993

coeficiente de variação = 9%

$$\lambda_{\delta} = -265,0576 + 0,7491 \lambda_s + 23,5258t \dots\dots 4$$

coeficiente de correlação = 0,9948

coeficiente de variação = 8%

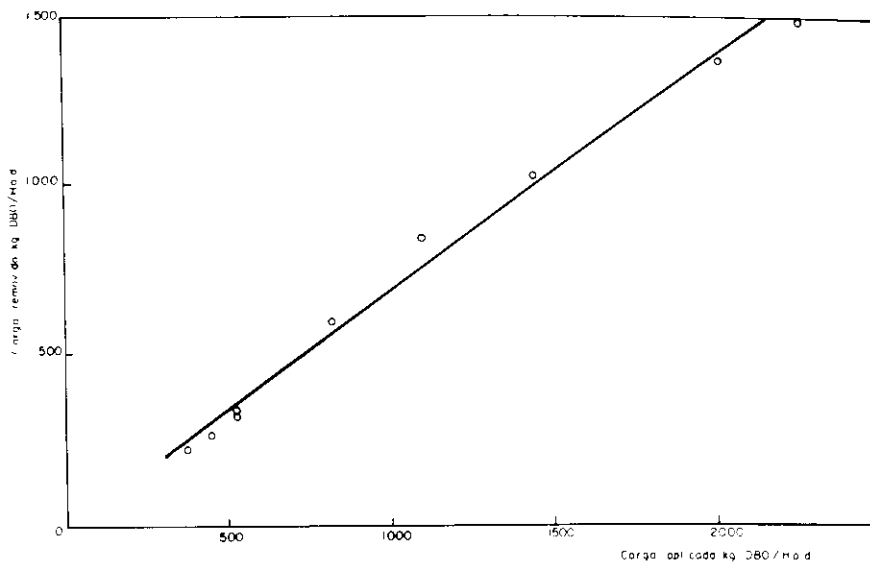


FIGURA 1 – Correlação entre Carga de DBO Aplicada e Removida estabelecida para Lagoa Anaeróbia.

As aplicações das expressões 2, 3 e 4 devem ser limitadas à faixa de carga aplicada de 530 a 2.300 kg/ha.d, temperatura de 18 a 25°C e tempo de detenção de 4,3 a 10 dias.

Deve-se esclarecer que o número de amostras consideradas na correlação estatística não basta para apresentação de um modelo suficientemente seguro a ser aplicado. É desejável realizar levantamento de mais dados de lagoas, não só na região do Estado de São Paulo, mas também em outras regiões do Brasil.

## 5.2. LAGOA FACULTATIVA

### a) Aplicabilidade do modelo elaborado por Marais e Shaw

A constituição teórica do modelo de Hermann e Gloyna, e Marais e Shaw é basicamente idêntica, porém, o modelo de Marais e Shaw apresenta maior flexibilidade em termos de avaliação da eficiência em função dos diferentes níveis das cargas aplicadas. Por esse motivo selecionou-se na presente investigação somente o modelo de Marais e Shaw.

O modelo básico dos autores citados é expresso por

$$S = \frac{S_0}{K_T t + 1} \dots\dots 5$$

onde:

$S$  e  $S_0$  = concentração da DBO  $5d^{20^\circ C}$  no afluente e efluente da lagoa, respectivamente.

$K_T$  = constante de primeira ordem em função da temperatura ( $^\circ C$ ).

$t$  = tempo de detenção (dias).

O valor de  $K_T$  igual a 1,2 foi avaliado experimentalmente, para temperatura de 35°C, com coeficiente de temperatura de 1.085.

Rearranjando a equação 5, a fim de facilitar o cálculo da eficiência ( $E$ ), e utilizando-se os valores da constante de reação e do fator da temperatura acima citados, obtém-se:

$$t = \frac{E}{1,2 \times 1,085^{T-35} (100-E)} \dots\dots 6$$

Introduzindo o termo da carga orgânica superficial ( $\lambda_s$ ) (kg DBO/ha.d) e rearranjando novamente a equação resulta:

$$\lambda_s = 12 \frac{100-E}{E} d \cdot 1,085^{(T-35)} \dots\dots 7$$

onde:

$d$  = profundidade água (m)

Para facilitar o cálculo da comparação com as eficiências obtidas em condições reais, a equação 7 foi alterada para:

$$E = \frac{1,200 \text{ Sod } (1,085)^{T-35}}{\lambda_s + 12 \text{ Sod } (1,085)^{T-35}} \dots\dots 8$$

No Quadro 5 são apresentados os valores comparativos das eficiências, determinadas em condições reais nos levantamentos, e calculadas pelo modelo de Marais e Shaw em várias lagoas facultativas primárias e secundárias.

Observou-se maior discrepância entre a eficiência determinada e a calculada principalmente nas lagoas secundárias com baixas cargas aplicadas. Esta discrepância pode ser explicada pelo fato da velocidade da constante de estabilização da matéria orgânica utilizada no modelo, é aquela determinada experimentalmente em função do tem-

Eficiência determinada e calculada nas lagoas facultativas primária e secundária

| Local da lagoa               | Carga aplicada (DBO kg/ha.d) | Carga removida (DBO kg/ha.d) | Eficiência determinada (%) | Eficiência calculada |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Lagoa facultativa primária   |                              |                              |                            |                      |
| GUARARAPES                   | 162                          | 134                          | 83                         | 93                   |
| NHANDEARA                    | 200                          | 168                          | 84                         | 86                   |
| GUARARAPES                   | 212                          | 176                          | 83                         | 89                   |
| PRADÓPOLIS                   | 75                           | 58                           | 77                         | 83                   |
| VALPARAÍSO                   | 89                           | 80                           | 90                         | 92                   |
| MARINGÁ                      | 500                          | 345                          | 69                         | 77                   |
| MAIRIPORÃ                    | 257                          | 146                          | 57                         | 86                   |
| MAIRIPORÃ                    | 376                          | 248                          | 66                         | 85                   |
| Lagoa facultativa secundária |                              |                              |                            |                      |
| ITAPIRA                      | 105                          | 78                           | 74                         | 77                   |
| PINDAMONHANGABA              | 164                          | 114                          | 70                         | 69                   |
| PRADÓPOLIS                   | 53                           | 27                           | 49                         | 89                   |
| ITAPIRA                      | 163                          | 122                          | 75                         | 72                   |
| MAIRIPORÃ                    | 113                          | 91                           | 81                         | 83                   |
| MARINGÁ                      | 50                           | 36                           | 72                         | 94                   |
| MARINGÁ                      | 60                           | 44                           | 73                         | 91                   |
| MARINGÁ                      | 140                          | 102                          | 73                         | 91                   |
| MARINGÁ                      | 80                           | 52                           | 65                         | 85                   |
| MARINGÁ                      | 170                          | 111                          | 65                         | 85                   |
| TATUI                        | 320                          | 214                          | 67                         | 80                   |

QUADRO 5

po de reação. Por conseguinte, o modelo calcula a eficiência de remoção da DBO, proporcionalmente ao aumento do tempo de detenção da lagoa, mesmo que não seja possível realizar, na prática, estabilização biológica acima de determinado nível de eficiência.

Conforme apresentado no item anterior, as lagoas secundárias recebem efluentes já parcialmente estabilizados das lagoas anaeróbias, podendo o processo biológico de estabilização ser completado com menor tempo de detenção do que os projetados em realidade.

Assim sendo, seria mais lógico admitir a causa da discrepância observada, não por motivo da baixa aplicabilidade do modelo, mas do mau dimensionamento das lagoas em questão.

Mesmo incluindo esta discrepância, o coeficiente de variação, calculado para as eficiências estimadas pelo modelo, é de 22%, podendo ser considerado satisfatório para o projeto de um sistema de tratamento com complexo processo biológico, tal como a lagoa de estabilização. Se eliminarmos os dados referentes às lagoas superdimensionadas, indicadas anteriormente, o coeficiente de variação será reduzido para 14%.

#### b) Aplicabilidade dos modelos estatísticos

O modelo estatístico desenvolvido

por McGarry e Pescod, baseado nos dados colhidos em lagoas primárias das regiões temperada e subtropical, conduziu à seguinte correlação com o elevado coeficiente de correlação de 0,995.

$$\lambda_g = 10,35 + 0,725 \lambda_s \dots 9$$

Esta correlação é válida na faixa da carga superficial de DBO 34 e 560 kg/ha.d.

Correlação semelhante à executada por McGarry e Pescod, foi estabelecida por experimento realizado em Campina Grande (PB) na região Nordeste do Brasil, por Mara e Silva:

$$\lambda_g = 2 + 0,79 \lambda_s \dots 10$$

A máxima carga observada com eficiência satisfatória (80%), neste experimento, foi de 400 kg/ha.d.

A carga aplicada extremamente elevada (200 a 1.158 kg/ha.d), verificada nas lagoas primárias, situadas na região de San Juan, Peru, resultou em torno de 80% de eficiência com a seguinte correlação.

$$\lambda_g = 7,67 + 0,8063 \lambda_s \dots 11$$

O valor do coeficiente de correlação calculado nesta expressão foi de 0,9962.

Para elaboração do modelo estatístico, com base nos dados obtidos no presente estudo, foram preparadas as Figuras 2 e 3, que correlacionam os valores de cargas aplicadas e removidas nas lagoas facultativas primárias e secundárias.

Na lagoa primária, nota-se um desvio da correlação quando ocorrem valores acima de aproximadamente 250 kg/ha.d nas cargas aplicadas.

A principal causa desta discrepância poderia ser atribuída à condição climática desfavorável da época em estudo (vide item 4.2), ou seja, interferência negativa do fator climático, de forma mais intensa no comportamento biológico, na lagoa com faixa superior de carga aplicada, proporcionando menor rendimento do funcionamento do sistema em questão.

Os pontos plotados na Figura 2, que representam os resultados provenientes da região Nordeste do Brasil, foram avaliados pela expressão 10, citada anteriormente.

A correlação estabelecida no presente estudo, na faixa de 90 a 210 kg/ha.d de carga aplicada, é de:

$$\lambda_g = 0,2243 + 0,8332 \lambda_s \dots 12$$

$$(R = 0,9974)$$

$$(C.V. = 4\%)$$

Com a finalidade de se obter melhor comparação, foi preparada a Figura 4, onde são representadas, em retas, todas as correlações para a lagoa primária mencionada anteriormente.

A diferença entre o modelo estatístico desenvolvido no presente estudo e no estudo de Mara e Silva, na faixa de carga aplicada de 90 a 250 kg/ha.d, é insignificante em termos de utilização prática para projeto.

Desta maneira, pode-se concluir que o modelo estatístico elaborado para a região Nordeste do Brasil pode representar também satisfatoriamente a região Sul, de condições climatológicas semelhantes à do Estado de São Paulo.

Deve-se acrescentar que, de acordo com a observação feita anteriormente, a máxima carga aplicável na região do Estado de São Paulo deveria ser limitada em torno de 250 kg/ha.d, enquanto que na região Nordeste esse valor pode ser ampliado para 400 kg/ha.d para manter tratabilidade por volta de 80%. Se ultrapassar esses limites, haverá queda na eficiência de remoção da DBO, como já ocorreu no presente estudo quando se operou em faixa elevada de cargas aplicadas. Para efeito de referência, estabeleceu-se no presente estudo uma

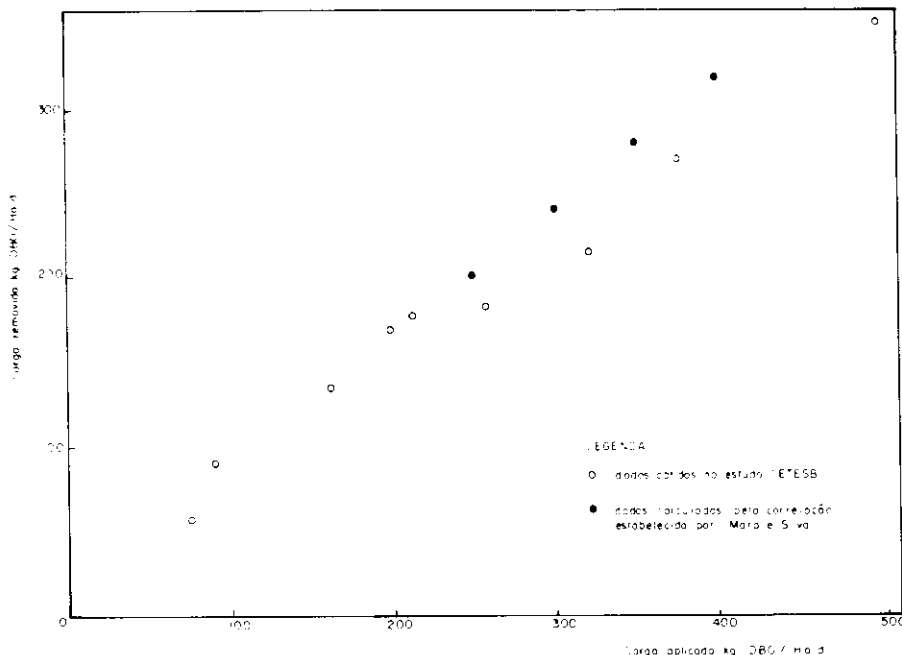


FIGURA 2 — Correlação entre Carga Aplicada e Removida obtida nas Regiões de São Paulo e do Nordeste do Brasil para Lagoa Facultativa Primária.

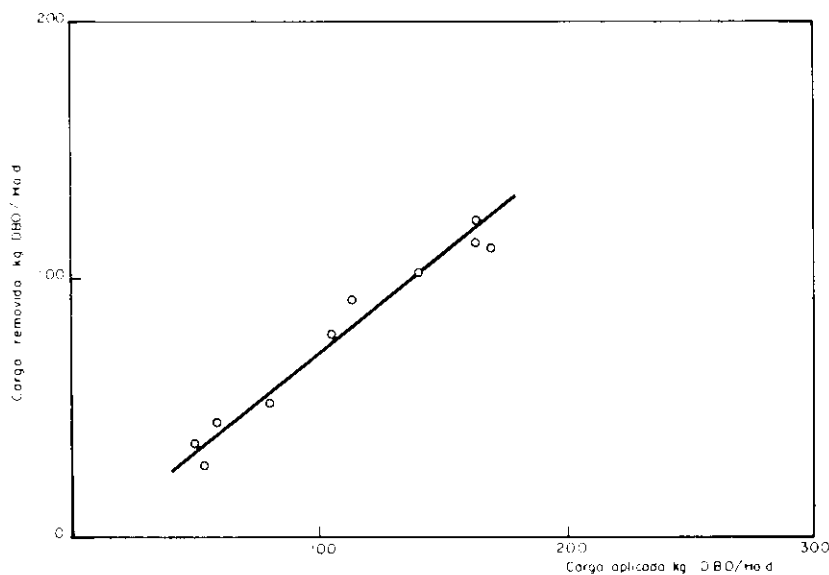


FIGURA 3 — Correlação entre Carga de DBO Aplicada e Removida estabelecida para Lagoa Secundária.

correlação com base em toda a faixa de cargas aplicadas (90 - 500 kg/ha.d).

$$\lambda_{\delta} = 19,4003 + 0,6327 \lambda_s \dots 13$$

(R = 0,9760)

(C.V. = 13%)

Com base na variação das temperaturas registradas em cada levantamento (18 - 27°C), introduziu-se o fator de temperatura na equação 13, obtendo-se:

$$\lambda_{\delta} = -54,0 + 0,6584 \lambda_s + 3,0740T \dots 14$$

(R = 0,976)

(C.V. = 12%)

Devido aos baixos rendimentos observados na faixa superior da car-

ga aplicada, as expressões 13 e 14 conduzem a baixas eficiências de remoção da DBO.

Com relação à lagoa secundária, foi estabelecida, para o presente estudo, a seguinte correlação:

$$\lambda_{\delta} = -5,4188 + 0,7702 \lambda_s \dots 15$$

(R = 0,9873)

(C.V. = 8%)

Introduzindo o fator de temperatura, apresenta:

$$\lambda_{\delta} = 26,9052 + 0,7592 \lambda_s - 1,4149T \dots 16$$

(R = 0,9956)

(C.V. = 5%)

A aplicabilidade das expressões apresentadas restringe-se à faixa de

50 a 170 kg/ha.d de carga aplicada e temperatura de 19,5 a 25°C.

Correlação semelhante à do presente estudo foi verificada em lagoas secundárias do Peru, com cargas variando de 40 a 210 kg/ha.d, conforme equação abaixo:

$$\lambda_{\delta} = 0,8 + 0,765 \lambda_s \dots 17$$

Um bom nível de coeficiente de correlação (0,9861) foi computado para esta correlação.

Ambas as correlações apresentadas resultam em eficiência ligeiramente menor do que na lagoa primária, o que pode ser justificado pelas características funcionais da lagoa facultativa secundária.

## 6. CONCLUSÃO

- Com o objetivo de verificar a aplicabilidade dos principais modelos existentes, ao dimensionamento de lagoas de estabilização para tratamento de esgotos domésticos em condições brasileiras, notadamente na região do Estado de São Paulo, foram efetuados levantamentos de dados baseados no funcionamento das lagoas com diferentes modalidades, inclusive nas duas lagoas experimentais.
- A equação elaborada por Vincent et al. para lagoa anaeróbia resultou alto valor de coeficiente de variação (74%), demonstrando aplicabilidade insatisfatória com os dados obtidos no presente estudo.
- O modelo estatístico elaborado no presente estudo, apresentou correlação satisfatória entre parâmetros de carga da DBO aplicada e removida, temperatura e profundidade. No entanto, é desejável reunir maior número de dados, não só da região do Estado de São Paulo, mas também de outras regiões do Brasil, a fim de estabelecer um modelo suficientemente seguro.
- O modelo desenvolvido por Marais e Shaw mostrou boa aplicabilidade para lagoa facultativa primária e lagoa secundária. O coeficiente de variação foi avaliado entre 14% e 22%, dependendo dos dados levantados, nas lagoas em estudo. O modelo de Marais e Shaw é caracterizado por raciocínio teórico, apresentando, por esse motivo, maior flexibilidade e amplitude na sua aplicabilidade em relação ao modelo estatístico.
- Através da comparação de vários modelos estatísticos utilizados para lagoa facultativa primária, existentes e desenvolvidos pelo presente



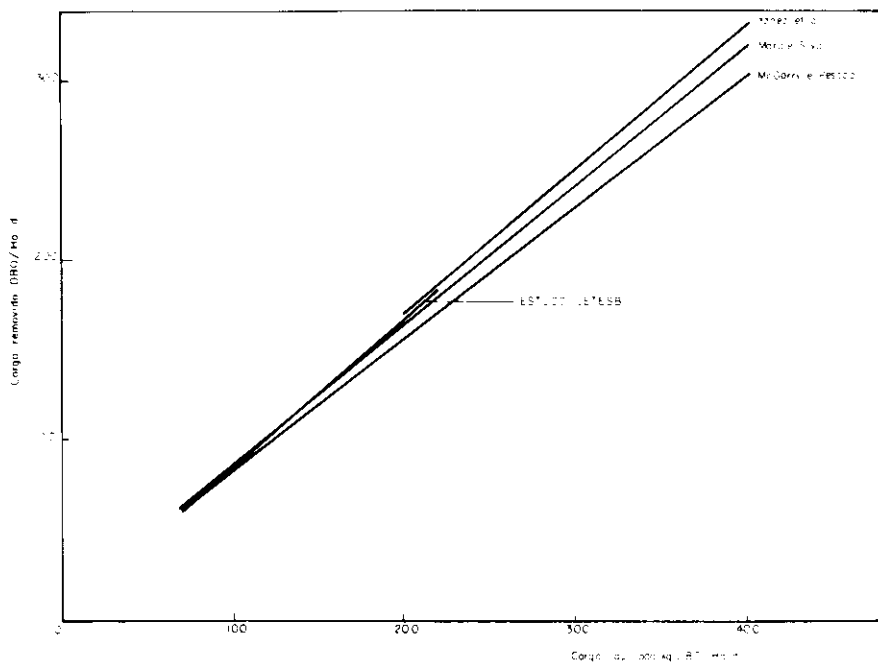


FIGURA 4 — Comparação de Correlação entre Carga Aplicada e Removida estabelecida por vários autores para Lagoa Primária.

estudo, conclui-se que o modelo de Mara e Silva, elaborado para a região Norte do Brasil, apresenta-se, também, satisfatório para a região Sul, onde há condições climatológicas semelhantes ao Estado de São Paulo.

- f) A máxima carga aplicável para a lagoa primária deverá situar-se em torno de 400 kg DBO/ha.d na região Norte e 250 kg/ha.d na região Sul para obter-se eficiência aproximada de 80%.
- g) As lagoas facultativas secundárias em estudo, apresentaram, de modo geral, eficiências ligeiramente menores do que a primária, devido à sua própria característica funcional. A máxima carga de DBO aplicável verificada no presente estudo foi de 150 kg DBO/hab. O modelo estatístico elaborado no estudo revelou elevado valor de

coeficiente da correlação e baixo valor de coeficiente de variação quando a carga de DBO encontra-se entre 50 a 170 kg/ha.d e temperatura entre 19,5 e 25°C.

## 7. RECOMENDAÇÃO

- a) Recomenda-se efetuar levantamento cadastral das várias modalidades de lagoa de estabilização em todo o território brasileiro, com a finalidade de avaliar a potencialidade de utilização e interrelacionar as informações técnicas do referido sistema.
- b) Embora tenha-se estabelecido no presente estudo um modelo estatístico de dimensionamento para lagoa anaeróbia, é recomendável realizar levantamento de mais dados, não só na região do Estado de São Paulo

mas também em outras regiões do Brasil, a fim de obter-se um modelo suficientemente seguro a ser aplicado.

O problema de odor, produzido em função das cargas aplicadas e fatores ambientais, é outra tarefa importante que deve ser investigada para uso mais eficiente deste sistema.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VINCENT, J.L.; ALGIE, W.E. & MARAIS, G.v.R. — A system of sanitation for low cost high density housing, Niamey, Londres, Commission for Technical Cooperation, South of Sahara, 1963.
2. HERMANN, E.R. & GLOYNA, E.F. — Waste stabilization ponds III. Formulation of Design Equations. Sewage and Industrial Wastes, 30, 8, 1958.
3. MARAIS, G.v.R. & SHAW, V.A. — A rational theory for the design of sewage stabilization ponds in Central and South Africa. Trans. S. Afr. Instr. Civ. Engrs., 3, 1964.
4. MCGARRY, M. G. & PESCOD, H.B. — Stabilization pond design criteria for tropical Asia. 2nd. International Symposium for Waste Treatment Lagoons. Missouri, 1970.
5. THIRUMURTHY, D. — Design principles of waste stabilization ponds. Jour. of the Sanitary Engineering Division, Proc. A.S.C.E., 95, SA2, 1969.
6. MARA, D.D. e SILVA, S.A. — Tratamentos biológicos de águas residuárias — lagoa de estabilização — Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1969.
7. YÁNEZ, F. and Project Staff — Evaluation of the San Juan stabilization ponds. Final research report of the first phase. IDRC/Peruvian Ministry of Health/PAHO/CEPIS. Research Project, 1980.
8. IMHOFF, K., MÜLLER, W.J. & THISLETHWAYTE, D.K.S. — Disposal of sewage and other waters borne waste. London, Butlerworths, 1971.
9. HAZEN AND SAWYER — Relatório sobre disposição de esgotos. São Paulo. Departamento de Águas e Esgotos do Governo do Estado de São Paulo, 1967.
10. IMHOFF, K. — Manual de tratamento de águas residuárias. Editora USP, 1966.