



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS DE
MONITORAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM
SÉRIE

TÁRCIO ARY TOSCANO SILVA FILHO

CAMPINA GRANDE
MARÇO/2001

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS DE
MONITORAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM
SÉRIE**

TÁRCIO ARY TOSCANO SILVA FILHO

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS DE
MONITORAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM
SÉRIE**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba -
UFPB, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

SUB-ÁREA: ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ORIENTADORES: Prof. Drº Salomão Anselmo Silva

Prof. Drº Rui de Oliveira

Campina Grande - Paraíba

Março/2001



S586a Silva Filho, Tércio Ary Toscano.
Análise multivariada de dados de monitoramento de lagoas de estabilização em série / Tércio Ary Toscano Silva Filho.
- Campina Grande, 2001.
111 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2001.
"Orientação : Prof. Dr. Salomão Anselmo Silva, Prof. Dr.
Rui de Oliveira".
Referências.

1. Lagoas de Estabilização. 2. Tratamento de Esgotos. 3.
Lagoas Anaeróbias. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I.
Silva, Salomão Anselmo. II. Oliveira, Rui de. III.
Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV.
Título

CDU 628.357.1(043)

TÁRCIO ARY TOSCANO SILVA FILHO

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS DE
MONITORAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM
SÉRIE**

Dissertação aprovada em 07/03/2001

COMISSÃO EXAMINADORA



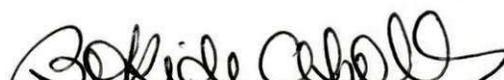
Prof. Dr.º Salomão Anselmo Silva

(Orientador)



Prof. Dr.º Rui de Oliveira

(Orientador)



Prof. Dr.ª Beatriz S. O. de Ceballos

(Examinadora Interna)



Prof. Dr.º André Luiz Calado de Araújo

(Examinador Externo)

Campina Grande- Paraíba

Março/2001

DEDICATÓRIA

À Maria Aureliano de Almeida (*in memoriam*), avó muito carinhosa e dedicada que sempre apoiou e torceu pelo sucesso de seus entes queridos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Tarcio e Socorro, que tanto contribuíram, com amor, dedicação e apoio, para meu desenvolvimento pessoal e profissional; e também aos meus irmãos Thiago e Tarciana.

Aos Professores Rui de Oliveira e Salomão Anselmo Silva pela orientação e apoio;

Ao amigo Rui de Oliveira que através de seu incentivo e dedicação à universidade permitiu a realização deste trabalho;

Aos professores da Área de Engenharia Sanitária e Ambiental – AESA – da Universidade Federal da Paraíba, pelos ensinamentos prestados durante o curso;

Aos meus amigos e irmãos João e André por todo apoio e companheirismo durante todo o curso;

Aos meus amigos de turma de mestrado Aline, Gorethe e Daniela;

Às amizades conquistadas em Campina Grande: Vladimir, Hilmer, Leandro, Marcelo, Luciano, Diego e Guaraci.

RESUMO

Este trabalho fez o mapeamento das diversas variáveis importantes na operação de séries de lagoas de estabilização com diferentes configurações e tempos de detenção hidráulica. Foi aplicada a análise fatorial aos dados das séries de lagoas do Sistema I, experimento 01 (Silva, 1982), e Sistema IX, experimentos 01 e 02 (de Oliveira, 1990), levados a efeito na EXTRABES-UFPB (Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários da Universidade Federal da Paraíba), na cidade de Campina Grande, Paraíba, nordeste do Brasil ($7^{\circ}13'11''$ S, $35^{\circ}52'31''$ O, 550 m acima do nível do mar). O Sistema I, experimento 01, tinha tempo de detenção hidráulica total de 29,1 dias, e profundidade das lagoas de 1,00 m (exceção da lagoa anaeróbia com profundidade de 1,25 m). O Sistema IX tinha profundidade de 2,20 m e tempo de detenção total de 25 dias, para o primeiro experimento e 40 dias para o segundo. As variáveis de análise foram clorofila "a", DBO_5 , DQO, coliformes fecais, oxigênio dissolvido, pH, sólidos suspensos, temperatura, radiação solar, tempo de detenção hidráulica, profundidade e cargas orgânicas superficial e volumétrica. Análises fatoriais foram levadas a efeito para conjuntos distintos de dados envolvendo reatores individuais, séries completas e outras combinações, tendo sido capaz de explicar mais de 70% da variância das variáveis em, aproximadamente, 95% dos casos analisados, com extração de 3 fatores artificiais principais em cada análise. Seis fatores artificiais foram, em princípio, identificados e usados para explicar os fenômenos bioquímicos inerentes às diversas lagoas e séries de lagoas: estabilidade do processo anaeróbio, concentração de material orgânico, crescimento algal, aerobicidade, temperatura e tempo de detenção hidráulica. A importância da evolução das condições aeróbias ao longo de uma série de lagoas associada ao desempenho eficiente desse sistema foi o resultado mais importante deste trabalho.

ABSTRACT

The aim of this work was to describe the structural behaviour of monitoring variables of series of waste stabilization ponds with different configurations and hydraulic retention times treating domestic wastewater from the municipal sewerage of Campina Grande (7° 13' 11" S, 35° 52' 31" W, 550 m above m. s. l.), Paraíba state, northeast Brazil. Data were obtained from two pilot-scale experimental systems, each having five ponds, being one anaerobic followed by a secondary facultative and three maturation ponds operated at EXTRABES (Federal University of Paraíba's Experimental Station for the Biological Treatment of Sewage). Both experimental systems have been already described: one experiment was carried out on System I, made up of shallow (one m deep, except the 1.25 m deep anaerobic pond) ponds and having a total hydraulic retention time of 29.1 days, being described by Silva (1982), and two experiments (experiments 1 and 2) were described by de Oliveira (1990) in the deeper (2.2 m deep) under total hydraulic retention times of 25 and 40 days, respectively. The analysed variables were chlorophyll "a", BOD₅, COD, faecal coliforms, dissolved oxygen, pH, suspended solids, temperature, solar radiation, hydraulic retention time, pond depth and surface and volumetric organic loadings. Factor analysis, carried out on different sets of data involving individual reactors, complete series and other combinations, was able to explain more than 70% of the variance of variables in 95% of the analysed cases, with the extraction of 3 artificial factors in each analysis. The following six artificial factors were identified as useful for the description of the phenomena inherent to several types of ponds and series of ponds: anaerobic process stability, organic material concentration, algal growing, aerobicity, temperature and hydraulic retention time. Efficiency of pond system directly associated with the evolution of aerobic conditions along pond series was the most important result of this work.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 – Lagoas de Estabilização.....	4
2.1.1 – Mecanismos de tratamento atuantes em lagoas de estabilização.....	6
2.1.1.1 – Digestão anaeróbia.....	7
2.1.1.2 – Oxidação aeróbia.....	7
2.1.2 – Classificação das Lagoas de Estabilização.....	8
2.1.2.1 – Lagoas Anaeróbias.....	8
2.1.2.2 – Lagoas Facultativas.....	10
2.1.2.3 – Lagoas de Maturação.....	13
2.1.3 – Lagoas de Estabilização em Série.....	15
2.1.4 – A pesquisa da EXTRABES sobre séries de lagoas de estabilização.....	16
2.2 – Tratamento estatístico dos dados.....	17
2.2.1 – Crescimento da estatística no tempo moderno.....	17
2.2.1.1 – Breve histórico.....	18
2.2.1.2 – A importância dos dados.....	18
2.2.2 – Análise Multivariada.....	19
2.2.2.1 – Análise Fatorial.....	24
2.2.2.2 – Análise de Componentes Principais.....	26
2.2.2.2.1 – Passos da análise fatorial.....	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 – Coleta de Dados.....	33
3.2 – Descrição dos Sistemas.....	33
3.2.1 – Sistema I.....	34
3.2.1.1 – Alimentação das lagoas.....	35
3.2.1.2 – Coleta de amostras.....	37
3.2.2 – Sistema IX.....	38

3.2.2.1 – Alimentação das lagoas.....	38
3.2.2.2 – Coleta de amostras.....	40
3.3 – Variáveis estudadas.....	40
3.3.1 – Análises físico-químicas e microbiológicas.....	40
3.4 – Análise Estatística.....	42
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	43
4.1 – Dados médios das variáveis de monitoramento.....	43
4.1 – Análises estatísticas empregadas.....	45
4.2 – Análise fatorial.....	48
4.2.1 – Interpretação dos fatores resultantes da análise fatorial.....	50
4.2.2 – Análise fatorial do Sistema I, experimento 01.....	60
4.2.3 – Análise fatorial do Sistema IX, experimento 01.....	69
4.2.4 – Análise Fatorial do Sistema IX, Experimento 02.....	77
4.3 – Análise conjunta dos dados de diversos sistemas e experimentos.....	84
4.3.1 – Sistema IX, experimentos 01 e 02.....	85
4.3.2 – Sistemas I e IX, experimento 01.....	86
4.3.3 – Sistema I, experimento 01 e Sistema IX, experimentos 01 e 02.....	87
4.3.4 – Lagoas anaeróbias, facultativas secundárias e de maturação.....	89
4.3.5 – Conjunto de séries de lagoas de maturação.....	93
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO.....	97
5.1 – Considerações sobre as séries de lagoas analisadas.....	97
5.2 – Desempenho da análise fatorial.....	98
5.3 – Considerações sobre as várias lagoas estudadas.....	99
5.3.1 – Lagoas anaeróbias.....	99
5.3.2 – Lagoas facultativas secundárias.....	100

5.3.3 – Lagoas de maturação.....	101
5.3.4 – Séries de lagoas de estabilização.....	103
5.4 – Outras considerações sobre a análise fatorial	104
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	105
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Revisão de Literatura

Figura 2.1 – Exemplo de extração dos fatores pelo método gráfico.....29

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Figura 3.1 – Representação esquemática da EXTRABES (de 1977 a 1990)....34

Figura 3.2 – Planta baixa da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01.....35

Figura 3.3 – Corte AA da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01.....35

Figura 3.4 – Representação esquemática da saída de uma lagoa, mostrando o ponto de coleta das amostras (retentor de espuma).....37

Figura 3.5 – Corte AA da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimentos 01 e 02.....38

Figura 3.6 – Representação esquemática da entrada das lagoas da série.....38

Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados

Figura 4.1 – Exemplo de diagrama de dispersão.....49

Figura 4.2 – Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das ordenadas) bem correlacionado com o pH.....51

Figura 4.3 – Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das abscissas) bem correlacionado com pH, radiação solar e concentração de matéria orgânica.....51

Figura 4.4 – Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das abscissas) bem correlacionado com pH, radiação solar e temperatura.....52

Figura 4.5 – Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das ordenadas) bem correlacionado com pH e coliformes fecais.....52

Figura 4.6 – Exemplo de fator concentração de material orgânico devido às variáveis medidoras desse material.....53

Figura 4.7 – Exemplo de fator crescimento algal (eixo das ordenadas), representado exclusivamente pela clorofila "a".....	55
Figura 4.8 – Exemplo de fator crescimento algal (eixo das abscissas), representado por várias variáveis.....	55
Figura 4.9 – Exemplo de fator crescimento algal (eixo das ordenadas), relacionado à clorofila "a" e radiação solar.....	55
Figura 4.10 – Exemplo de fator aerobividade (eixo das ordenadas), demonstrando a relação entre oxigênio dissolvido e pH.....	56
Figura 4.11 – Exemplo de fator aerobividade (eixo das abscissas), explicitando o comportamento de diversas variáveis frente à clorofila "a" e, principalmente, ao oxigênio dissolvido.....	56
Figura 4.12 – Exemplo de fator aerobividade (eixo das ordenadas), demonstrando a influência das condições aeróbias da lagoa na remoção de coliformes fecais.....	57
Figura 4.13 – Exemplo de fator temperatura, com influência principal dessa variável no fator.....	58
Figura 4.14 – Exemplo de fator temperatura, com influência conjunta da temperatura e radiação solar sobre o fator.....	58
Figura 4.15 – Exemplo de fator temperatura, sendo a principal correlação a da radiação solar.....	58
Figura 4.16 – Exemplo de fator tempo de detenção hidráulica (TDH _a).....	59
Figura 4.17 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A1 (Sistema I, experimento 01).....	61
Figura 4.18 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A1 (Sistema I, experimento 01).....	61
Figura 4.19 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F1 (Sistema I, experimento 01).....	62
Figura 4.20 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F1 (Sistema I, experimento 01).....	62
Figura 4.21 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M1 (Sistema I, experimento 01).....	63
Figura 4.22 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M2 (Sistema I, experimento 01).....	64

Figura 4.23 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M3 (Sistema I, experimento 01).....	65
Figura 4.24 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema I, experimento 01.....	66
Figura 4.25 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema I, experimento 01.....	66
Figura 4.26 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01.....	67
Figura 4.27 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 01).....	69
Figura 4.28 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 01).....	70
Figura 4.29 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 01).....	71
Figura 4.30 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 01).....	71
Figura 4.31 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 01).....	73
Figura 4.32 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 01).....	73
Figura 4.33 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 01).....	73
Figura 4.34 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 01).....	73
Figura 4.35 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema IX, experimento 01.....	74
Figura 4.36 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema IX, experimento 01.....	74
Figura 4.37 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimento 01.....	75
Figura 4.38 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 02).....	77

Figura 4.39 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 02).....	77
Figura 4.40 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 02).....	79
Figura 4.41 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 02).....	79
Figura 4.42 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 02).....	80
Figura 4.43 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 02).....	80
Figura 4.44 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 02).....	81
Figura 4.45 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 02).....	81
Figura 4.46 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 02).....	82
Figura 4.47 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 02).....	82
Figura 4.48 – Diagrama de dispersão das variáveis da série completa do Sistema IX, experimento 02.....	82
Figura 4.49 – Diagrama de dispersão das variáveis da série completa do Sistema IX, experimento 02.....	82
Figura 4.50 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimento 02.....	83
Figura 4.51 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados do Sistema IX, experimentos 01 e 02.....	86
Figura 4.52 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados dos Sistemas I e IX, experimento 01.....	87
Figura 4.53 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados dos Sistemas I e IX, experimentos 01 e 02.....	88
Figura 4.54 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas anaeróbias.....	91

Figura 4.55 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas facultativas secundárias.....93

Figura 4.56 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas de maturação primária.....93

Figura 4.57 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de todas as lagoas de maturação.....95

Figura 4.58 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de todas as lagoas de maturação.....95

Capítulo 5 – Discussão

Capítulo 6 – Conclusões

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Revisão de Literatura

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Tabela 3.1 – Características físicas e operacionais do Sistema I, experimento 01.....	36
---	----

Tabela 3.2 – Características físicas e operacionais do Sistema IX, experimentos 01 e 02.....	39
--	----

Tabela 3.3 – Métodos empregados nas análises dos parâmetros físico-químicos utilizados neste trabalho.....	41
--	----

Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados

Tabela 4.1 – Dados médios das variáveis empregadas em cada experimento.....	44
---	----

Tabela 4.2 – Autovalores e percentuais da variância das variáveis explicadas por cada fator artificial.....	47
---	----

Tabela 4.3 – Fatores de carga ou coeficientes de correlação entre as variáveis e os fatores artificiais.....	48
--	----

Tabela 4.4 – Autovalores e percentual de explicação da variância das variáveis de cada fator artificial obtido no experimento 01 do Sistema I.....	68
--	----

Tabela 4.5 – Autovalores e percentual de explicação da variância das variáveis de cada fator artificial obtido no experimento 01 do Sistema IX.....	76
---	----

Tabela 4.6 – Resumo dos autovalores e percentuais de explicação da variância das variáveis das lagoas e série completa do Sistema IX, experimento 02.....	78
---	----

Tabela 4.7 – Fatores artificiais extraídos em análises levadas a efeito para conjuntos de lagoas anaeróbias, facultativas secundárias e de maturação primária, secundária e terciária.....	90
--	----

Tabela 4.8 – Fatores artificiais extraídos em análises levadas a efeito para conjuntos das três lagoas de maturação das séries do Sistema I, experimento 01, e Sistema IX, experimentos 01 e 02.....	94
--	----

Tabela 4.9 – Resumo dos fatores artificiais extraídos nas análises com conjuntos de dados de séries de lagoas de experimentos combinados.....	95
---	----

Tabela 4.10 – Resumo dos fatores artificiais extraídos nas análises de lagoas individuais e das séries.....96

Capítulo 5 – Discussão

Capítulo 6 – Conclusões

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial e estabelecimento dos centros urbanos próximos a corpos de água contribuem para a contaminação dessas fontes de abastecimento, devido ao grande volume de resíduos, tanto sólidos como líquidos, produzidos pelas sociedades atuais. Uma maneira de diminuir o impacto desses despejos, especialmente, os líquidos é tratá-los antes do lançamento. Assim, diversos sistemas de tratamento biológico de águas residuárias foram desenvolvidos ao longo dos anos, dentre os quais as lagoas de estabilização.

Características desses sistemas como alta remoção de DBO_5 e organismos fecais, capacidade para suportar sobrecargas hidráulicas e/ou orgânicas, simplicidade e baixo custo de construção, operação e manutenção do sistema permitem que as lagoas de estabilização sejam um dos sistemas de tratamento de águas residuárias mais difundidos pelo mundo. Esse sistema ainda se torna mais eficiente em regiões tropicais e subtropicais, devido à predominância de elevada intensidade luminosa e altas temperaturas, fatores que aceleram o processo de degradação biológica da matéria orgânica. Apenas duas desvantagens são apontadas para as lagoas de estabilização: a necessidade de grandes áreas de terreno em virtude do alto tempo de detenção hidráulica requerido para a ocorrência dos processos naturais, e relativamente altas concentrações de sólidos suspensos no efluente.

As séries de lagoas de estabilização são constituídas, normalmente, por uma lagoa anaeróbia, uma facultativa secundária e várias de maturação. Como cada lagoa da série apresenta características bem particulares, por sofrer inúmeras influências externas e também devido às inúmeras reações bioquímicas processadas na massa líquida, o entendimento dos fenômenos inerentes a essas lagoas e o desenvolvimento de critérios de

dimensionamento tornam-se tarefas complexas. Para superar essas dificuldades, métodos de análise de dados mais sofisticados devem ser adotados para atingir tais objetivos: alcançar o máximo de entendimento de lagoas e séries de lagoas de estabilização e, assim, a adoção de critérios de dimensionamento que permitam uma alta eficiência do sistema no tratamento de águas residuárias.

A literatura tem, tradicionalmente, estudado o comportamento de lagoas de estabilização através da avaliação da eficiência alcançada por determinados sistemas observados. Esta não é a maneira mais adequada de análise de tais sistemas de tratamento, uma vez que são inúmeros os fatores físicos, químicos e biológicos que, através de diversas interações, influenciam os diferentes tipos de lagoas.

A análise multivariada é um ramo da Estatística que trata da análise de dados em um espaço multidimensional, descrito por diversas variáveis ou indivíduos. Dentre as técnicas estatísticas que fazem parte da análise multivariada é encontrada a análise fatorial, que permite explicar relações entre numerosas variáveis correlacionadas em termos de relativamente poucos fatores artificiais (Overall e Klett, 1972). Fazendo uso de uma outra técnica multivariada, a análise de componentes principais, a análise fatorial permite simplificar e organizar as informações inerentes a um grupo de variáveis ou indivíduos de uma determinada observação, através de um menor número de fatores artificiais não correlacionados. Em um diagrama de dispersão, cujos eixos são representados pelos fatores extraídos, as variáveis empregadas no estudo são distribuídas ao longo desses eixos, demonstrando o comportamento dessas variáveis em uma lagoa ou série de lagoas.

Este trabalho objetiva, então, fazer um mapeamento completo das diversas variáveis importantes na operação de séries de lagoas de estabilização com diferentes configurações e tempos de detenção hidráulica. Para tal, foram levadas a efeito análises

fatoriais para três séries de lagoas de estabilização, o primeiro experimento do Sistema I (Silva, 1982) e os dois experimentos do Sistema IX (de Oliveira, 1990).

Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Lagoas de estabilização

De acordo com uma definição que tem se tornado clássica na literatura lagoas de estabilização são grandes reservatórios, geralmente com pequena profundidade, definidos por diques de terra, nos quais águas residuárias brutas ou efluentes de um tratamento precedente são depuradas unicamente por processos naturais envolvendo principalmente bactérias e/ou algas (Mara, 1976, Silva, 1982). De fato, um número maior de mecanismos e processos naturais contribuem para a depuração das águas residuárias em lagoas de estabilização. Esses mecanismos são constituídos de ações físicas, químicas e biológicas responsáveis pelo desenvolvimento de ecossistemas aquáticos de diferentes graus de trofia, nos quais é característica a manutenção de uma teia alimentar baseada na decomposição de materiais orgânicos residuais. Assim, a lagoa de estabilização funciona como um reator biológico onde a matéria orgânica biodegradável (proteínas, carboidratos e gorduras) é oxidada biologicamente, sendo transformada em moléculas simples e estáveis tais como dióxido de carbono, água, nitrato, fosfato e sulfato. Os processos naturais de estabilização biológica que ocorrem nas lagoas são baseados na atividade microbiana envolvendo, principalmente, bactérias e algas, tendo como fonte de energia a luz solar, além da energia liberada nas reações químicas inerentes (de Oliveira, 1995). A atividade dos microrganismos é influenciada por diferentes fatores que afetam o ambiente aquático em que vivem, como carga orgânica, temperatura, radiação solar e características físicas das lagoas (como profundidade e nível de dispersão).

As lagoas de estabilização podem ser utilizadas no tratamento de quaisquer águas residuárias passíveis de serem biodegradadas, sejam domésticas ou agro-industriais

(com algumas exceções, como quando há presença de substâncias tóxicas), oferecendo a flexibilidade de se poder produzir um efluente final com o grau de purificação que se deseje para lançamento em corpos receptores (de acordo com a legislação), ou utilizá-lo para irrigação agrícola ou na aquicultura (Silva, 1982; Barros, 1999).

Entre as principais vantagens de sistemas de lagoas de estabilização no tratamento de águas residuárias, Mara (1976), Silva (1982), Arthur (1983), Mara e Pearson (1986), Pearson (1987), os três últimos citados por de Oliveira (1990), relatam:

a) Alta eficiência na remoção de DBO_5 e organismos fecais (bactérias, vírus, protozoários e helmintos), o que possibilita o reuso de seus efluentes;

b) Capacidade para suportar sobrecargas hidráulicas ou orgânicas, como também absorver concentração de metais pesados da ordem de 30 mg/l (Mara, 1976, citando experimentos conduzidos em Israel, afirma que foram necessários 60 mg/l de concentração de metais pesados para afetar o desempenho de lagoas de estabilização) sem comprometer a qualidade do efluente;

c) Simplicidade de construção, operação e manutenção do sistema. Economia de energia elétrica uma vez que a energia necessária para o processo de degradação provém da luz solar e das reações químicas;

d) O baixo custo de construção, operação e manutenção fazem com que as lagoas de estabilização sejam citadas como o sistema de tratamento de água residuária mais barato.

No entanto, os sistemas de lagoas de estabilização têm como principal desvantagem a necessidade de grandes áreas de terreno em virtude do alto tempo de detenção hidráulica requerido para a ocorrência dos processos naturais, e relativamente altas concentrações de sólidos suspensos no efluente.

Entretanto, na prática, em regiões tropicais e subtropicais, existem áreas suficientes e a baixo preço, possibilitando a aquisição de terra para a implantação de sistema de lagoas de estabilização por um baixo custo. Já os sólidos suspensos presentes em excesso no efluente, são devidos à biomassa de fitoplâncton que se forma nas lagoas facultativas e de maturação. Mas Gloyna & Tischler (1981) (*apud* de Oliveira, 1990) citam que a U.S. Environmental Protection Agency (EPA) reconhece que sólidos devidos a algas vivas nos efluentes de lagoas, têm características diferentes dos sólidos do esgoto bruto ou de outros processos de tratamento. De Oliveira (1995) citando Mara *et al.* (1992) comenta a distinção entre DBO algal e DBO de esgoto bruto feita pelo Conselho Diretor da Comunidade Européia para o tratamento de águas residuárias urbanas (CEC, 1991), o qual admite, para o lançamento de efluentes de lagoas de estabilização, a alta concentração de 150 mg/l de sólidos em suspensão respeitado, também, o limite de 25 mg/l para a DBO₅ filtrada. Essas mudanças encontram respaldo numa discussão em nível mundial cujo teor é aquele anunciado no trabalho de Gloyna & Tischler (1981). Nesse trabalho os autores, entre outros aspectos, afirmam que as algas dos efluentes de lagoas de estabilização têm pouca chance de exercer demanda de oxigênio, porque são consumidas pelo zooplâncton dos corpos receptores.

2.1.1 – Mecanismos de tratamento atuantes em lagoas de estabilização

No ecossistema das lagoas de estabilização, Arthur (1983), citado por de Oliveira (1990), relata que os principais processos de tratamento de águas residuárias são (1) o efeito reservatório, que permite a absorção de choques de cargas orgânica e hidráulica, (2) a sedimentação, responsável pela deposição de sólidos sedimentáveis no fundo da lagoa, e (3) a biodegradação da matéria orgânica via digestão anaeróbia e oxidação aeróbia.

2.1.1.1 – Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia tem sido descrita como um processo que consiste em quatro passos principais (van Haandel e Lettinga, 1994; van Haandel e Marais, 1999): (1) **hidrólise**, onde material orgânico particulado é convertido para compostos dissolvidos de menor peso molecular, (2) **acidogênese**, que consiste na absorção dos compostos formados na etapa anterior por células de bactérias fermentativas, para em seguida excretá-las como substâncias orgânicas simples (ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido lático e compostos minerais como CO₂, H₂, NH₃, H₂S etc.); (3) **acetogênese**, etapa da conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono); e (4) **metanogênese**, onde os produtos da fermentação ácida (entre os quais predomina o ácido acético) são convertidos em produtos gasosos estáveis (metano e dióxido de carbono).

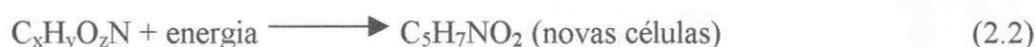
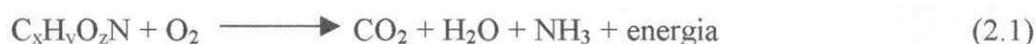
Os três primeiros passos da digestão anaeróbia podem, por simplificação, ser considerados como fazendo parte de apenas um, **a fermentação ácida**, e **a fermentação metanogênica**, última etapa, é, geralmente considerado, o fator limitante do processo (*Ibid*). Isso é devido ao fato de que as bactérias metanogênicas são altamente sensíveis a diversos fatores tais como baixas temperaturas, presença de metais pesados e detergentes, altas concentrações de nitrogênio amoniacal e sulfeto, alterações na alcalinidade e pH. Com relação ao pH a literatura tem, tradicionalmente, considerado uma estreita faixa, 6,3-7,8 (van Haandel e Lettinga, 1994) e 6,6-7,6 (Metcalf e Eddy, 1991), para uma eficiente metanogênese.

2.1.1.2 – Oxidação aeróbia

A oxidação aeróbia, levada a efeito por bactérias aeróbias e facultativas, as quais utilizam a respiração aeróbia para extrair energia de compostos orgânicos assimilados, é um processo bioquímico em que a matéria orgânica é metabolizada com a

geração de novas células e produtos finais como dióxido de carbono, água, fosfato e amônia (de Oliveira, 1990).

O metabolismo oxidativo é composto por dois processos simultâneos e interdependentes, denominados de catabolismo (oxidação da molécula orgânica para produção de energia, Eq. 2.1) e anabolismo (síntese de material celular, Eq. 2.2) de acordo com as seguintes equações (de Oliveira, 1995):



No metabolismo oxidativo, a fração anabolizada corresponde a 67% da massa metabolizada e a fração catabolizada a 33%. Já na digestão anaeróbia, esses percentuais são respectivamente, 3 e 97% (van Haandel e Lettinga, 1994).

2.1.2 – Classificação das Lagoas de Estabilização

A classificação das lagoas de estabilização é baseada na predominância relativa de um dos dois processos bioquímicos, citados acima, sob o qual a matéria orgânica é degradada, digestão anaeróbia e/ou oxidação aeróbia. Assim, são comumente considerados três tipos de lagoas:

2.1.2.1 – Lagoas Anaeróbias

São lagoas projetadas para receber uma carga orgânica suficientemente alta para que não exista oxigênio dissolvido na massa líquida da lagoa. Assim, o material orgânico é degradado, unicamente, pelo processo de digestão anaeróbia. Elas são usadas para reduzir cargas orgânicas destinadas a outras unidades de tratamento subsequente, o que pode contribuir para diminuir significativamente a área ocupada por uma série de lagoas de estabilização, uma vez que grande parte do material biodegradável afluyente é removido nesta unidade. De acordo com Mara e Pearson (1986) e Mara (1988), citados por de Oliveira (1990), as lagoas anaeróbias são vantajosamente empregadas para o tratamento

de águas residuárias com $DBO_5 > 300 \text{ mg/l}$ ou aquelas com alta concentração de sólidos suspensos ($SS > 300 \text{ mg/l}$).

São lagoas comumente mais profundas (2 a 5 m), para permitir a predominância das condições anaeróbias em toda a massa líquida e uma minimização da área requerida. Assim, a biomassa de algas, nesse tipo de lagoa, é muito limitada, podendo formar apenas um filme superficial, com predominância de gêneros flagelados, particularmente *Chlamydomonas* (Pearson, 1987 *apud* Araújo, 1993).

Fatores físicos, físico-químicos e biológicos afetam o desempenho de reatores anaeróbios, entre os quais podem ser citados os nutrientes, população de bactérias, presença de substâncias tóxicas, o tempo de detenção hidráulica e alcalinidade (Back, 1986). O delicado equilíbrio entre acidogênese e metanogênese é favorecido por concentração nula de oxigênio, temperatura superior a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\text{pH} > 6$ (Mara, 1976).

As vantagens desse tipo de lagoa estão relacionadas à economia de terreno, diminuição da camada de lodo em lagoas facultativas, caso elas sejam o tratamento secundário (Benefield e Randall, 1980 *apud* Barros, 1999) e, principalmente, a eficiência na redução da DBO_5 . Silva (1982) obteve remoções de DBO_5 variando de 68 a 75%, com tempos de detenção de 2 a 6,8 dias e temperatura média do efluente de $24,8$ a $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$, em três lagoas anaeróbias, com profundidade de 1,25 m, pertencentes a três diferentes séries de lagoas de estabilização (Sistema I, experimentos 01, 02 e 03). De Oliveira (1990) operando um sistema de lagoas profundas (2,20 m), com dois experimentos, obteve remoção de DBO_5 de 51,30%, para lagoa anaeróbia com tempo de detenção de 5 dias, e de 50,40% para lagoa com TDH de 8 dias.

O maior problema relacionado ao uso da lagoa anaeróbia é o odor. Ele é causado, principalmente, pela liberação do gás sulfídrico (H_2S) proveniente da redução dissimilatória de sulfato (basicamente uma reação de respiração anaeróbia promovida por

vários gêneros de bactérias, entre os quais *Desulfovibrio*, na qual o radical sulfato é o aceptor final de elétrons, quando a matéria orgânica contendo enxofre é oxidada) (Silva, 1999). Entretanto, para valores de pH normalmente encontrados em lagoas anaeróbias bem dimensionadas (em torno de 7,5), cerca de metade do sulfeto está na forma do inodoro íon bissulfeto (HS^-) (de Oliveira, 1995).

O dimensionamento de lagoas anaeróbias é feito empiricamente com base no tempo de detenção (de Oliveira, 1990; von Sperling, 1996) e em uma carga orgânica volumétrica, embora alguns projetistas utilizem a carga orgânica superficial como critério de projeto (Silva, 1982; de Oliveira, 1990). Silva (1982), afirma que ao projetar uma lagoa anaeróbia com uma carga de $300\text{g DBO}_5/\text{m}^3\text{dia}$, uma eficiência de 70% na remoção da DBO_5 de esgoto doméstico é, comumente, obtida em região de clima tropical, a exemplo de Campina Grande.

2.1.2.2 – Lagoas Facultativas

A principal característica das lagoas facultativas é a coexistência da oxidação aeróbia, na camada superior, onde o oxigênio molecular está dissolvido, e a digestão anaeróbia, nas camadas mais profundas e na camada de lodo depositada no fundo da lagoa, onde a concentração de oxigênio dissolvido é nula. Essas lagoas são classificadas em facultativas primárias, que recebem esgoto bruto, e secundárias, que recebem os efluentes de uma lagoa anaeróbia, tanque séptico, ou tanques de sedimentação convencionais (de Oliveira, 1990).

A principal função das lagoas facultativas é, ainda, a remoção da matéria orgânica. Os processos responsáveis por essa remoção são a sedimentação e a atividade bioquímica. Ambos são atuantes em lagoas facultativas primárias, mas em facultativas secundárias o processo de sedimentação é minimizado (*Ibid*).

Tipicamente, fazem parte da biota de uma lagoa facultativa, organismos decompositores como bactérias, que degradam a matéria orgânica, organismos produtores, como algas, que sintetizam o substrato orgânico, e, organismos consumidores, como protozoários que assimilam substrato orgânico sintetizado (Gloyne, 1976 *apud* de Oliveira, 1995).

Na camada aeróbia, próxima à superfície, a relação simbiótica entre bactérias decompositoras e algas fotossintetizantes (mutualismo) é responsável pela estabilização do material biodegradável finamente particulado e dissolvido. Nessa camada, os microrganismos heterótrofos liberam para o meio líquido dióxido de carbono, água e nutrientes inorgânicos, resultantes do seu metabolismo. Simultaneamente, as algas consomem essas substâncias, na sua fotossíntese, gerando novo material celular e oxigênio molecular essencial ao metabolismo dos microrganismos heterótrofos. Nas camadas mais profundas, sem a penetração da luz solar não é possível o desenvolvimento da biomassa algal, implicando em produção nula de oxigênio e, por conseguinte, estabilização da matéria orgânica via digestão anaeróbia.

Uma outra forma de oxigenação, a atmosférica, das camadas superficiais de uma lagoa facultativa é feita através da interface ar/líquido, pela diferença das pressões parciais do oxigênio nesses dois ambientes. Além disso, o vento tem grande importância na eficiência de operação dessas lagoas na medida em que contribui para a mistura da massa líquida da lagoa. Nos trópicos, é comum que a intensa radiação solar provoque o aquecimento das camadas superficiais da lagoa, enquanto que os níveis inferiores permanecem a uma temperatura menor. Essa diferença de temperatura ao longo da profundidade da lagoa é chamada de estratificação térmica. Por ser menos densa, a camada superior aquecida não se mistura com a inferior, ocorrendo entre elas a formação da termoclina, estreita zona observada ao longo da profundidade da lagoa onde ocorre uma

repentina mudança de temperatura. A estratificação da massa líquida da lagoa faz com que as algas sem mobilidade sedimentem para camadas mais profundas exercendo demanda de oxigênio, acentuando o estado de anaerobiose da camada inferior. Por outro lado, as algas móveis migram da superfície para níveis mais baixos. Assim, pode ser formada uma espessa camada de algas flageladas, a cerca de 300 a 500 mm da superfície, que impede a penetração da luz solar (auto-sombreamento), com diminuição do número de algas acima dessa camada algal e queda na produção de oxigênio (Mara, 1976).

No início da noite, a camada superior aquecida da lagoa perde calor mais rapidamente que a inferior, provocando uma inversão térmica na lagoa e a mistura da massa líquida. No início da manhã, ocorre o contrário, sendo caracterizado um ciclo diário de estratificação e mistura. A mistura permite uma melhor distribuição vertical do oxigênio, DBO₅ e algas, impedindo a formação de áreas estagnadas e curto-circuitos hidráulicos, que diminuem a eficiência da lagoa.

Araújo (1993), citando König (1984) e de Oliveira (1990), afirma que as lagoas facultativas são propícias ao desenvolvimento de uma grande biomassa de algas, com predomínio de gêneros flagelados, particularmente *Euglena*, *Chlamydomonas* e *Pyrobotrys*. Eles também observaram que o número de gêneros tende a aumentar com a diminuição da carga orgânica.

A profundidade para as lagoas facultativas varia de 1 a 2 m, sendo a mais usada 1,5 m, o que permite a coexistência de ambos os processos bioquímicos de degradação da matéria orgânica no mesmo reator (de Oliveira, 1990).

No auge da atividade fotossintética, as algas podem exercer demanda de CO₂ superior ao produzido pela comunidade biológica, sendo esta deficiência suprida pela dissociação dos íons bicarbonato que, além do CO₂, libera, íons hidroxila que, não raro, elevam, o pH até valores acima de 9 (de Oliveira, 1995).

Silva (1982) obteve remoções de DBO_5 que variaram de 10 a 29%, com tempos de detenção de 1,6 a 5,5 dias, para lagoas facultativas secundárias com profundidade de 1 m. Já de Oliveira (1990), operando lagoas facultativas secundárias profundas (2,20 m) encontrou remoções de DBO_5 de 42,7% e 49,2% com tempos de detenção de 5 e 8 dias, respectivamente. Vale salientar, que os baixos percentuais da eficiência para remoção de matéria orgânica da lagoa facultativa secundária, quando comparada com uma primária (78% encontrado por Silva, 1982 e 78,6%, no trabalho de Oliveira, 1990) não quer dizer que esta última seja, em princípio, a melhor opção. O que deve ser avaliado é a eficiência do conjunto de lagoa anaeróbia e facultativa secundária, que é superior ao de uma lagoa facultativa primária de mesma área.

Os métodos de dimensionamento de lagoas facultativas mais utilizados são aqueles baseados (1) nas cargas superficiais (método empírico) (Silva, 1982; von Sperling, 1996) e (2) na cinética de primeira ordem (em função do regime de fluxo que prevalece na lagoa) (Silva, 1982; de Oliveira, 1990).

2.1.2.3 - Lagoas de Maturação

São reatores que recebem efluentes de outras unidades de tratamento, comumente lagoas facultativas ou outra lagoa de maturação, em uma série, nas quais o conteúdo orgânico decresce a níveis cada vez mais baixos (de Oliveira, 1990). Elas são predominantemente aeróbias, uma vez que com menores níveis de turbidez e carga orgânica aplicada, há uma maior penetração da luz solar e, assim, atividade fotossintética ao longo de toda a coluna líquida.

A função principal dessas lagoas é a destruição de organismos patogênicos. Os vírus e bactérias são rapidamente eliminados, pois o meio aquático lhes é extremamente adverso. Já os cistos e ovos de parasitas são removidos por sedimentação até o fundo da lagoa, lá permanecendo até morrerem (Mara, 1976). Muitos fatores como pH elevado,

radiação solar, competição por nutrientes, substâncias tóxicas liberadas pelas algas, temperatura elevada e predatismo por espécies do zooplâncton são mencionados como causas prováveis para o decaimento dos coliformes nas lagoas de maturação (James, 1987 *apud* Barros, 1999). Mara *et al.* (1992) *apud* de Oliveira (1993) afirmam que tempo e temperatura, pH elevado (>9) e alta intensidade de luz são os principais fatores envolvidos na remoção de bactérias fecais em lagoas de maturação.

A vantagem associada às lagoas de maturação é a alta qualidade do seu efluente que pode ser utilizado na prática do reuso de águas, principalmente para a irrigação. Além disso, a liberação de odores é muito improvável, pois as condições aeróbias, os altos valores de pH e as baixas concentrações de sulfeto total tornam essa possibilidade praticamente nula (Barros, 1999).

Konig (1984), citada por Araújo (1993), observou que a diversidade de algas em lagoas de maturação é maior que nas lagoas facultativas, com diminuição dos gêneros flagelados e aumento dos não flagelados.

Silva (1982), trabalhando com uma série de 5 lagoas de estabilização rasas, das quais as três últimas eram lagoas de maturação (profundidade de 1 m), obteve remoção final de coliformes fecais que variou de 99 a 99,99994%, com tempo de retenção hidráulica total que variou de 8,5 a 29,1 dias, em três experimentos. De Oliveira (1990) estudando uma série de lagoas com a mesma configuração de Silva (1982), mas com profundidade de 2,20 m, encontrou eficiência na remoção de coliformes fecais de 99,975% e 99,9993% para tempo de retenção hidráulica da série de 25 e 40 dias, respectivamente.

Para o dimensionamento das lagoas de maturação, a redução de bactérias fecais é considerada como seguindo uma cinética de primeira ordem sendo recomendável o projeto de 3 ou mais unidades de maturação em série (de Oliveira, 1990; von Sperling,

1996). Além disso, é necessário respeitar o padrão de qualidade do efluente requerido para o destino final (Silva, 1982).

2.1.3 – Lagoas de Estabilização em Série

Diversas pesquisas realizadas com séries de lagoas de estabilização têm comprovado, na prática, os princípios de projeto de reatores segundo os quais o efluente final de uma série apresenta um nível de tratamento superior ao de uma lagoa única com mesma área. Isso, basicamente, é devido a dois fatores:

(1) Regime hidráulico: o regime hidráulico de uma série de lagoas se aproxima do fluxo pistão, mais eficiente que o fluxo parcialmente disperso, das lagoas individuais (de Oliveira, 1995);

(2) Diversidade das reações bioquímicas: inúmeros fatores, como população microbiana, nutrientes, oxigênio dissolvido, tempo de detenção, temperatura, pH e alcalinidade, influenciam diretamente e de maneira variada, as reações que ocorrem nas lagoas, durante o processo de degradação da matéria orgânica. Por exemplo, as algas produzem oxigênio, mas as bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbias; as algas, também podem elevar consideravelmente o pH (valores acima de 9), enquanto que a oxidação bacteriana ocorre mais efetivamente em pH em torno de 8,3. Assim, o sistema de tratamento deve ser compartimentado em reatores que sejam capazes de efetuar conjuntos particulares de reações em seu interior, pois não é possível reunir em um só reator todas as condições necessárias para um eficiente processo de tratamento (*Ibid*).

Das definições das diversas lagoas de estabilização e avaliando o desempenho desses reatores, é possível afirmar que a melhor configuração para uma série de lagoas de estabilização é a de lagoa anaeróbia + facultativa secundária + uma ou mais de maturação. Segundo Mara e Pearson (1986), citado por de Oliveira (1995), uma série com tal configuração tem se tornado, na prática, a configuração mais usual no tratamento de águas

residuárias domésticas. O Teorema de Marais, citado por Mara (1976), afirma que a máxima eficiência de uma série de lagoas é alcançada quando o tempo de detenção hidráulica é o mesmo em cada lagoa. Mas, na prática do projeto de lagoas de estabilização é recomendável que seja adotado iguais tempos de detenção hidráulica apenas para as lagoas de maturação.

O sistema de lagoas em série é particularmente importante na remoção de coliformes fecais e patógenos existentes nos esgotos, pois a flexibilidade oferecida pelo uso de várias lagoas, permite a redução do número de organismos fecais existente no esgoto bruto ao nível necessário, dependendo da destinação a ser dada ao efluente final e das restrições legais porventura existentes quanto à descarga de efluentes no corpo receptor (Silva, 1982).

2.1.4 – A pesquisa da EXTRABES sobre séries de lagoas de estabilização

Objetivando avaliar a influência da configuração de séries de lagoas de estabilização na remoção de matéria orgânica e organismos patogênicos, diversos estudos foram realizados na EXTRABES. Dentre os sistemas estudados merecem destaque o Sistema I (Silva, 1982), série de 5 lagoas rasas (1 m de profundidade), o Sistema IX (de Oliveira, 1990), formado por 5 lagoas profundas (2,20 m) e o Sistema XVII (de Oliveira, 1995), série longa formada por 10 unidades (1,50 m). Em todos os casos a série era iniciada por uma lagoa anaeróbia, seguida por uma facultativa secundária e pelas de maturação.

No primeiro experimento de Silva (1982), série com tempo de detenção de 29,1 dias, foram alcançadas remoções para DBO_5 de 93%, para DQO, 82%, e para coliformes fecais de 99,99994%. No segundo experimento (tempo de detenção de 8,5 dias), os percentuais de remoção dos parâmetros referidos foram, respectivamente, 89%, 79% e 99%. Finalmente, para o terceiro experimento, com um tempo de detenção intermediário,

17 dias, foram obtidas remoções de DBO₅, DQO e coliformes fecais de 88%, 73% e 99,96%, respectivamente.

Dois experimentos foram conduzidos por de Oliveira (1990). No primeiro, com tempo de detenção hidráulica total de 25 dias, foram atingidas remoções de 92,8% (DBO₅), 75,2% (DQO) e 99,975% (coliformes fecais). O tempo de detenção do segundo experimento foi de 40 dias, apresentando remoções respectivas de 94,1%, 73,2% e 99,993%.

Durante a pesquisa da série longa, de Oliveira (1995) obteve eficiência na remoção de DBO₅ de 95% e 82% na remoção de DQO. Com tempo de detenção hidráulica total de 28,5 dias, este sistema removeu 99,9997% de coliformes fecais.

Por esses resultados, é evidente a grande eficiência das séries de lagoas de estabilização no tratamento de águas residuárias. Os altos percentuais de remoção de matéria orgânica e coliformes fecais indicam que o efluente desse sistema pode ser lançado em corpos receptores sem prejudicar a vida aquática. Em face de seu caráter eutrofizante, é preferível e vantajoso o reuso desse efluente na agricultura e aquicultura, reduzindo o uso de produtos químicos.

2.2 – Tratamento estatístico dos dados

2.2.1 - Crescimento da estatística no tempo moderno

Em Levine *et al.* (1998), é encontrado um pequeno histórico sobre o desenvolvimento da estatística, no qual são enfatizados os motivos que contribuíram para tal. Apesar do livro dar ênfase ao emprego da estatística na gerência de processos produtivos e na área da Administração como um todo, ele foi utilizado como consulta histórica e como referência sobre a importância da coleta de dados, como obtê-los e como manuseá-los.

2.2.1.1 - Breve histórico

A necessidade dos governos de coletar impostos dos cidadãos, o desenvolvimento da teoria da probabilidade e o advento da informática foram, isoladamente, os três fenômenos responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento da estatística moderna.

Durante as civilizações egípcia, grega e romana, os dados eram obtidos principalmente com o objetivo de recolher impostos e para o recenseamento militar. Na Idade Média, as instituições religiosas frequentemente mantinham registros relativos a nascimentos, mortes e casamentos. Os EUA obtinham diferentes dados sobre sua população durante o período colonial e, com a Constituição de 1790, o censo passou a ser realizado a cada 10 anos. Isso contribuiu para o desenvolvimento de equipamentos de tabulação no início do século XX e o surgimento dos computadores de grande porte (mainframe). Programas de estatística para esses grandes computadores (SAS e SPSS) foram popularizados nas décadas de 1960 e 70 e, com o desenvolvimento dos computadores pessoais, novos programas surgiram e os mais antigos foram aperfeiçoados. A difusão das planilhas eletrônicas em computadores pessoais também contribuiu para uma maior utilização da estatística na análise de dados em pesquisas ou na gerência de linhas de produção de indústrias.

2.2.1.2 - A importância dos dados

Dados podem ser entendidos como a informação numérica necessária para ajudar a tomar decisões mais bem fundamentadas em determinada situação. Mas, para que as informações expressem de forma correta o fenômeno em estudo há a necessidade da coleta adequada dos dados. A coleta de dados é importante por diversos motivos entre os quais: (1) oferecer o insumo necessário a uma pesquisa, (2) avaliar o desempenho de um processo de produção ou de um serviço em andamento, (3) assessorar na formulação de

cursos de ação alternativos em um processo de tomada de decisão, ou (4) satisfazer a curiosidade.

Existem muitos métodos pelos quais é possível obter os dados necessários. Primeiramente, podem ser procurados dados já publicados por fontes governamentais, industriais ou particulares, em visitas a bibliotecas e redes de comunicação (internet) ou mesmo pelo contato direto com o autor de determinado trabalho sobre o qual são desejadas maiores informações. Em segundo lugar, podem ser projetados e levados a efeito experimentos, ou realizadas pesquisas.

Assim, para que o resultado da análise estatística seja confiável, é importante que, inicialmente, o usuário seja coerente com a ferramenta estatística empregada e com a quantidade e qualidade dos dados coletados. Com a evolução das pesquisas e a necessidade de estudos mais detalhados, ferramentas estatísticas mais poderosas estão sendo empregadas nas mais diversas áreas do conhecimento. Um exemplo é a análise multivariada, especialmente quando o estudo envolve muitas variáveis e a interpretação do fenômeno fica complicada sem uma conveniente redução desse conjunto de variáveis. A utilidade das ferramentas estatísticas multivariadas no tratamento de dados analíticos e ambientais é refletida pelo crescimento do número de artigos citados na *Analytical Chemistry Reviews* (Brom *et al.*, 1994, 1996 *apud* Vega *et al.*, 1998).

2.2.2 - Análise Multivariada

A análise multivariada é o ramo da Estatística que trata da análise de dados em um espaço multidimensional, descrito por diversas variáveis ou indivíduos. Muitas áreas como Psicologia, Sociologia, Biologia, Medicina, Educação e Economia, já fazem uso dessa análise, pois estão sempre se deparando com observações de várias variáveis de uma amostra (ou população) de indivíduos, para explicar um determinado fenômeno de interesse.

Segundo Anderson (1958), os métodos estatísticos da análise multivariada podem ser classificados em 5 categorias:

a) Correlação: quando há a necessidade de métodos que meçam o grau de dependência entre duas variáveis de uma população ou amostra. Essa medida pode ser através de coeficientes de correlação múltipla, parcial, etc. Estes coeficientes são usados para estimar parâmetros de distribuição e para testar hipóteses, como as hipóteses de independência;

b) Comparação a métodos estatísticos univariados: alguns problemas levantados nas populações multivariadas são análogos a problemas levantados em populações univariadas; os métodos adequados para manusear estes problemas são semelhantes. Por exemplo, no caso univariado, um pesquisador deseja testar a hipótese de que a média de uma variável é zero; no caso multivariado, ele pode desejar testar a hipótese de que as médias de diversas variáveis são zero;

c) Problemas de sistemas coordenados: estes problemas são essencialmente problemas de escolha de sistemas coordenados. O entendimento das relações entre um grande conjunto de variáveis pode ser difícil, a não ser que sejam determinadas combinações lineares, com máxima ou mínima variância (componentes principais), para reduzir o número de variáveis a analisar. Esse conjunto de componentes principais define um novo sistema coordenado, menor, que facilita o estudo. Ainda assim, esse novo sistema pode ser rotacionado, definindo um outro sistema de coordenadas;

d) Problemas mais detalhados: quando grupos de variáveis são divididos em subgrupos, surge o interesse de testar hipóteses de independência desses subgrupos. Outros problemas são a respeito de hipóteses de simetria entre subgrupos ou dentro de cada subgrupo. Nesta categoria é incluída a análise fatorial;

e) Observações dependentes: na análise de séries temporais, observações de variáveis são feitas, sucessivamente, no tempo. Observações feitas em um tempo podem ser dependentes daquelas feitas mais cedo. Tais problemas conduzem ao estudo de correlações seriais e de equações estocásticas diferenciais.

O interesse maior deste trabalho, empregando a análise multivariada, é avaliar as inter-relações entre diversas variáveis através das covariâncias¹ ou dos coeficientes de correlação entre essas variáveis. Como o número de variáveis é grande, há o interesse em simplificar e estruturar os dados, de maneira a conservar o máximo de informações dessas variáveis. Uma solução para este problema é encontrar fatores artificiais que sejam combinações lineares das variáveis observadas. Essas novas variáveis, agora responsáveis pela descrição do fenômeno, são mais facilmente estudadas por seu menor número (Possoli, 1984). Definir combinações lineares entre variáveis e fatores artificiais é uma das mais importantes ferramentas da análise fatorial, técnica estatística multivariada. Uma escolha adequada dessas combinações lineares pode facilitar o trabalho do pesquisador, porque há uma redução do espaço multidimensional gerado pelas variáveis originais em estudo.

Assim, a técnica estatística da análise fatorial, com o emprego da análise de componentes principais para a extração dos fatores artificiais, uma mescla de duas das categorias citadas, é responsável pela simplificação e organização das informações inerentes a um grupo de variáveis ou indivíduos de uma determinada observação. Ela

¹ Covariância é uma medida da relação linear entre duas variáveis aleatórias (variáveis numéricas às quais são associados modelos probabilísticos) (Bussab, 1987). Ela é útil para determinar se dois intervalos de dados se movem juntos, isto é, se os maiores valores de um conjunto estão associados aos maiores valores de outro (covariância positiva), se os menores valores de um conjunto estão associados aos maiores valores do outro (covariância negativa) ou se os valores dos dois conjuntos estão não correlacionados (covariância igual a zero) (Excel, 1997). A covariância é então definida, de uma maneira mais formal, como sendo o valor médio do produto dos desvios de X e Y em relação às suas respectivas médias:

divide o grupo inicial de variáveis em subgrupos (categoria d) que são combinações lineares entre as variáveis originais e um conjunto de fatores artificiais, que apresentam máxima ou mínima variância (categoria c).

A análise multivariada vem sendo aplicada por diversos pesquisadores, em diversas áreas, com o objetivo de interpretar fenômenos de interesse de maneira clara e simplificada. Como exemplo, são apresentados a seguir alguns trabalhos publicados, nos quais a análise multivariada foi empregada.

Possoli (1984) aplicando a análise fatorial, com a análise de fatores principais para a extração dos fatores artificiais, e a análise de agrupamento ("Cluster Analysis") fez um mapeamento do Estado do Rio Grande do Sul com relação à saúde da população de cada cidade do estado. A partir de um conjunto de 15 variáveis, ele obteve cinco fatores artificiais que explicaram 76,6% da variância total e as características gerais da saúde pública no estado. Pela interpretação do "Índice do Nível de Saúde" (fator que apresentou maior percentual de explicação da variância das variáveis) o autor pôde hierarquizar as cidades gaúchas em grupos com níveis de saúde semelhantes.

Simoneau (1986) estudou, através da análise de componentes principais, a variabilidade espacial da qualidade da água dos rios da província canadense de Quebec usando dados coletados durante um período de 5 anos. Esta análise foi útil para condensar as informações contidas na matriz de dados e identificar os parâmetros físico-químicos responsáveis pela maior porção da variância entre as estações. A análise de agrupamento foi levada a efeito para revelar a presença de regiões homogêneas com respeito à qualidade da água na província. A ACP produziu duas componentes principais que explicaram 76%

$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$. Se duas variáveis aleatórias X e Y são independentes, então $\text{cov}(X, Y) = 0$ e estas variáveis são não-correlacionadas (Bussab, 1987).

da variância. A primeira (51%), representou o gradiente de mineralização, enquanto a segunda (25%) representou o conteúdo orgânico.

Camardella (2000) objetivou avaliar o grau de redundância dos parâmetros adotados (7+1) para classificação da qualidade das águas superficiais na Itália e também propor uma metodologia, com pequena razão custo/benefício, para a determinação de um conjunto de parâmetros que possa ser utilizado nessa classificação. A autora, empregando a análise de componentes principais (ACP) a um conjunto de 13 variáveis, amostrados de 5 diferentes rios da região de Basilicata, concluiu que apenas 4 ou 5 parâmetros são suficientes para a classificação da qualidade da água superficial em corpos poluídos ou não, nas épocas de verão e inverno.

Lucena *et al.* (1996) realizaram uma investigação sobre indicadores de contaminação fecal em ambientes com poluição fecal antiga, como água subterrânea e marinha. A análise fatorial, com o método de componentes principais, dos dados de sedimentos marinhos e água subterrânea sugeriu que *Clostridium*, fagos do *Bacteroides fragilis* e, em alguns casos, enterovírus, são melhores microrganismos indicadores de poluição fecal antiga que os presentes indicadores bacterianos (coliformes fecais ou estreptococos fecais).

Reisenhofer *et al.* (1998) empregaram a ACP para caracterizar e diferenciar a água doce do sistema hidrológico complexo formado pelo Rio Timavo. Esse rio nasce no Monte Nevoso (Eslovênia), torna-se subterrâneo, e alimenta nascentes e lagos da região de Karst, perto de Trieste (Itália), até chegar ao Mar Adriático. Seis variáveis foram determinados em 84 amostras coletadas em 14 lugares selecionados. A análise permitiu afirmar a existência de um divisor de água comum para as águas doces da região de Karst examinadas, caracterizadas por 2 componentes principais: os solutos iônicos (cloreto,

nitrito e sulfato) e a condutividade foram associados com a primeira componente, enquanto temperatura e pH foram associados à segunda.

Ceballos (1995) empregou a análise fatorial, com extração dos fatores artificiais pelo método de componentes principais, na definição de um conjunto simplificado de parâmetros analíticos indicadores para a elucidação da tipologia de águas superficiais em regiões tropicais semi-áridas. O estudo realizado em três açudes, dois localizados na região de Campina Grande e um no município de Boqueirão, estado da Paraíba, indicou que a variabilidade entre os pontos amostrados dependeu de dois fatores artificiais: (1) biomassa fitoplanctônica, que expressou a dinâmica das variáveis físico-químicas associadas à intensidade da fotossíntese e da respiração e degradação do fitoplâncton; e (2) estado sanitário/eutrofização, que foi relacionado às atividades humanas na área de drenagem, representadas por práticas agro-pastoris e pelas águas de esgotos afluentes.

Diversos empregos da análise fatorial são verificados na caracterização de populações microbianas. Dentre eles é possível citar o trabalho de Oda e Ouchi (1989) que aplicaram a análise de componentes principais a 27 propriedades de leveduras necessárias para a obtenção de bons produtos de padaria; e o de Sundman (1970) que aplicou um método de análise fatorial para caracterizar quatro populações bacterianas de solos de áreas próximas.

No estudo de lagoas de estabilização, a análise multivariada também pode ter grande aplicação devido à complexidade dos processos naturais presentes nesses reatores, ou seja, grande quantidade de parâmetros influentes nas inúmeras reações de degradação biológica de esgotos. Assim, a adoção de ferramentas estatísticas poderosas, pode trazer benefícios na interpretação dos fenômenos que ocorrem nesses sistemas de tratamento.

2.2.2.1 – Análise Fatorial

λ_{pm} = parâmetro que reflete a importância do m-ésimo fator na composição da p-ésima variável. É chamado de fator de carga da p-ésima variável no m-ésimo fator comum. O somatório dos seus quadrados (communality) representa a variância de X_p comum com as outras variáveis;

e_p = p-ésimo fator artificial específico de cada variável. Este fator é responsável em explicar a variância específica de cada variável em estudo.

Assim, as variáveis originais são definidas por dois conjuntos de fatores artificiais. O primeiro, é aquele formado pelos fatores artificiais comuns (Y), ou seja, que explicam uma característica geral do fenômeno, e sua maior ou menor influência na variável é descrita pelo fator de carga (λ_{pm}). Já o segundo (e), descreve a influência específica que cada variável tem sobre o fenômeno, podendo também estar relacionado a algum distúrbio aleatório da variável.

Na forma matricial, o modelo fatorial é descrito mais facilmente:

$$\mathbf{x} = \Lambda \mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde: \mathbf{x} = é a matriz das variáveis observadas;

\mathbf{y} = é a matriz dos fatores artificiais;

Λ = é a matriz-fator de carga que relaciona os fatores artificiais às variáveis observadas;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ = é a matriz dos fatores específicos de cada variável.

Para a determinação dos parâmetros do modelo fatorial, técnicas estatísticas são empregadas. Um exemplo é a análise de componentes principais, um método para a redução de dados, que pode ser aplicada isoladamente ou em conjunto com a análise fatorial. Nesse segundo caso, a análise de componentes principais é apenas uma técnica empregada, durante a análise fatorial, para a extração dos fatores.

2.2.2.2 – Análise de Componentes Principais

Essa análise é um procedimento desenvolvido por Hotelling (1933) (*apud* Timm, 1975) que permite a redução de um grande grupo de variáveis correlacionadas em um pequeno número de componentes artificiais não correlacionadas (ortogonais), através de combinações lineares (*Ibid*), perdendo, nesse processo, o mínimo de informação possível (Mardia *et al.*, 1989).

A análise de componentes principais deve ser usada quando o objetivo é descrever diferenças entre indivíduos de uma amostra heterogênea em termos de relativamente poucas composições de variáveis e não deve ser usada quando o objetivo é caracterizar similaridades entre indivíduos dentro de uma amostra homogênea (Overall e Klett, 1972). Para caracterizar essas similaridades outras técnicas multivariadas podem ser empregadas, como, por exemplo, a análise de agrupamento (“Cluster Analysis”).

Na prática estatística, o método de componentes principais é usado para encontrar combinações lineares com grande variância. Em muitos estudos explanatórios, o número de variáveis sob consideração é grande demais para manuseá-las. Neste caso, um meio de reduzir o número de variáveis a serem trabalhadas consiste em descartar as combinações lineares que têm pequena variância e estudar apenas aquelas com grande variância (Anderson, 1958).

A primeira componente principal (Y_1) de uma amostra complexa de variáveis originais (X_1, \dots, X_p) é a seguinte combinação linear:

$$Y_1 = a_{11}X_1 + \dots + a_{p1}X_p \quad (\text{Eq. 2.5})$$

onde: a_{11}, \dots, a_{p1} = coeficientes que maximizam a variância da componente principal Y_1 .

Na forma matricial, temos:

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{a}_1\mathbf{X} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde: \mathbf{Y}_1 = primeira componente principal;

X = matriz das variáveis originais;

a_1 = matriz dos coeficientes que maximizam a variância da componente principal Y_1 .

A análise de componentes principais, geralmente, é um método para ilustrar, modelar, e combinar variáveis para análises adicionais (Timm, 1975). Daí seu grande emprego na análise fatorial, como uma técnica de extração dos fatores artificiais. As características das duas análises, empregadas em conjunto, simplificam o estudo de determinado fenômeno, através da redução e classificação das variáveis observadas.

As principais propriedades das componentes principais são:

— A primeira componente principal explica a maior parte da variância das variáveis originais, a segunda componente principal a segunda maior porção e assim por diante;

— As componentes principais são não-correlacionadas, ou seja, são ortogonais, ao contrário das variáveis originais;

— A soma dos 'k' primeiros autovalores² dividido pela soma total dos autovalores representa a proporção da variância total explicada pelas primeiras 'k' componentes principais;

— As componentes principais não são invariáveis com relação à mudança de escala. A análise fornece resultados diferentes se, para a obtenção de um resultado em escala diferente, as variáveis originais forem multiplicadas por uma constante ou se as componentes principais, após a análise, forem multiplicadas por essa mesma constante.

Contudo, se o número de componentes principais determinadas for igual ao número de variáveis originais a análise perde seu valor. Portanto, é avaliada e sempre

² Autovalor de uma componente principal é a porção da variância total das variáveis em estudo explicada por ela.

executada a extração de um número menor de componentes que o das variáveis para a continuidade do estudo. Critérios foram desenvolvidos por pesquisadores para facilitar esse trabalho:

a) Critério de Kaiser: selecionar aquelas componentes com autovalores maiores que 1. Em essência, as componentes extraídas devem ser, pelo menos, equivalentes a uma variável original. Este critério, proposto por Kaiser (1960) (*apud* Statsoft.com, 2000), é, provavelmente, o mais empregado.

b) Método gráfico: foi primeiramente proposto por Cattell (1966) (*Ibid*). Nele, os autovalores são plotados como uma curva simples em um plano onde são associados a cada fator (Figura 2.1). Nessa curva, são observados dois trechos distintos: o primeiro formado pelos fatores com maiores autovalores, onde a curva possui uma grande declividade; e um segundo trecho, em que a curva é suavizada. Cattell sugere que o ponto que separa os dois trechos da linha indica o número de fatores que devem ser extraídos (no exemplo da Figura 2.1, os três primeiros fatores seriam extraídos).

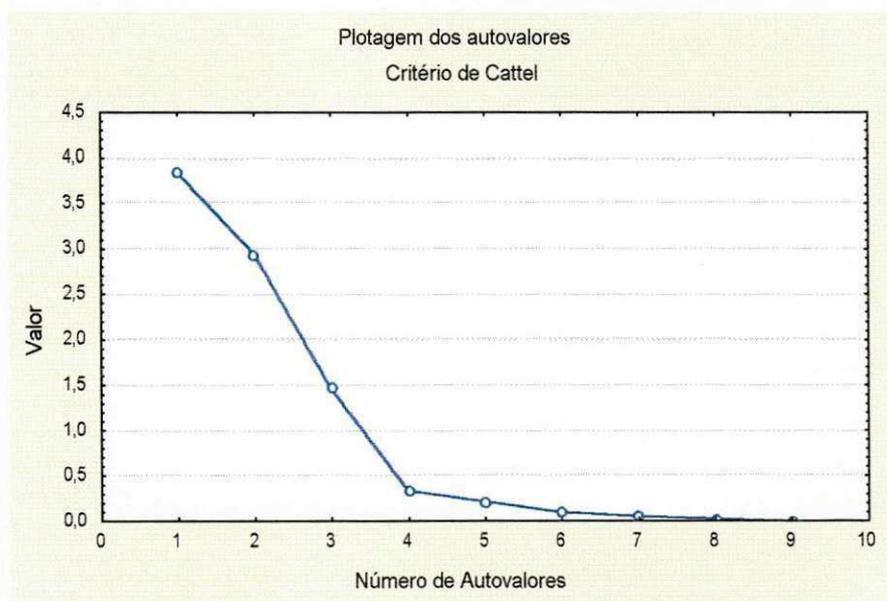


Figura 2.1 – Exemplo de extração dos fatores pelo método gráfico

Vale salientar que esses métodos de extração dos fatores artificiais não deverão ser seguidos de maneira aleatória. Pode haver estudos em que uma componente com autovalor menor que 1 é extraída e outros nos quais componentes com autovalores maiores que 1 são excluídas. Nesta análise, é recomendável que o pesquisador não se limite a regras restritas, como os critérios expostos anteriormente, mas permita a si mesmo alguma flexibilidade (Timm, 1975).

2.2.2.2.1 – Passos da análise fatorial

Para a realização dessa análise estatística, as variáveis em estudo devem ter distribuição normal. Caso contrário, transformações dos dados brutos devem ser levadas a efeito para que a normalização seja conseguida. A partir daí segue-se:

a) Determinação da matriz-correlação ou da matriz-covariância

A matriz-correlação é uma tabela simétrica dos coeficientes de correlação de cada par de variáveis, de uma amostra de dados. Essa matriz serve de ponto de partida para numerosas técnicas estatísticas (Sokal & Rohlf, 1981). De modo análogo, a matriz-covariância é uma tabela simétrica das covariâncias de cada par de variáveis, do conjunto de dados amostrais. Dado o desvio padrão de cada variável, a covariância para cada par de elementos da amostra pode ser obtida a partir da matriz-correlação³.

Estudos extensivos na análise multivariada, frequentemente, começam a partir da matriz correlação, para contornar a influência das diferentes unidades na variância das variáveis em estudo. Um exemplo é a medida da altura de uma amostra de pessoas. Ela pode ser descrita em polegadas ou milímetros. Com medidas cuidadosas, a mesma diferença individual pode ser representada nas duas unidades; contudo, a variância da

³ $Corr(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)}$ (Bussab, 1987)

medida em milímetros será muito maior. Já que o interesse está em quantificar as diferenças individuais, é frequentemente desejável converter todas as medidas para unidades que são padronizadas. Calcular coeficientes de correlação é precisamente equivalente a calcular covariâncias entre variáveis que foram primeiramente padronizadas. Em análises onde as variâncias das variáveis são muito diferentes, devido às diversas unidades, e onde o objetivo da análise é definir componentes principais que maximizem as diferenças entre as variáveis sob estudo, a aplicação da matriz-correlação, na análise de componentes principais, é recomendada (Overall e Klett, 1972).

Assim, fatores artificiais obtidos através do emprego de matriz-correlação e de matriz-covariância não são, em geral, os mesmos, mas é possível passar de uma solução para outra através de uma simples proporção dos coeficientes. (Anderson, 1963 *apud* Morrison, 1976).

b) Extração dos fatores

A técnica de análise de componentes principais será empregada para a extração e seleção dos fatores artificiais do modelo fatorial.

c) Determinação da matriz-fator de carga

Essa matriz apresenta os coeficientes que relacionam as variáveis e os fatores artificiais. O sinal algébrico e a magnitude do coeficiente indicam o sentido e a importância da contribuição de determinada variável na interpretação do fator. Esses coeficientes também indicam as coordenadas de cada variável original no espaço definido pelos fatores.

A interpretação das cargas fatoriais é mais direta se estas forem, para cada variável, grandes ou próximas de zero, com poucos valores intermediários. As variáveis são então separadas em dois grupos: (1) as que têm grande relação com algum fator,

representadas pelas altas cargas fatoriais e (2) as que não o tem, apresentando cargas fatoriais pequenas.

d) Rotação

A rotação de um sistema de eixos ortogonais consiste no giro desses eixos de um mesmo ângulo, seja no sentido horário ou anti-horário.

A rotação de fatores é um processo de redefinição dos eixos fatoriais, para então representar as variáveis originais de uma maneira mais simples e significativa (Overall and Klett, 1972). Ou seja, a rotação objetiva fornecer fatores de carga mais próximos da unidade e de zero. Essa distinção indica uma grande e uma pequena relação entre o fator artificial e as variáveis originais, respectivamente.

É válido salientar, que os fatores artificiais no modelo fatorial são abstrações matemáticas e não necessariamente interpretam de forma clara o fenômeno em estudo. Em particular, os fatores podem ser rotacionados sem afetar a validade do modelo. Qualquer rotação pode ser realizada para tornar os fatores mais facilmente interpretáveis (Mardia *et al.*, 1989).

Essa rotação pode ser feita em qualquer direção sem mudar a posição relativa entre os pontos do plano. Contudo, as reais coordenadas dos pontos, ou seja, os fatores de carga, serão mudados. O método "varimax" de rotação ortogonal, proposto por Kaiser, 1958 (*apud* Mardia, 1989) é o mais empregado. Ele minimiza o número de variáveis que possuem altos coeficientes ou fatores de carga.

No caso de mais de 2 fatores artificiais, uma solução iterativa para a rotação é usada. O primeiro e o segundo fatores são rotacionados de um determinado ângulo. O novo primeiro fator é então rotacionado com o terceiro fator original e assim por diante, até que todos os pares de fatores tenham sido rotacionados. Esta sequência de rotações é chamada ciclo (*Ibid*).

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Coleta de Dados

Os dados utilizados neste trabalho são referentes a duas diferentes séries de lagoas de estabilização, a primeira constituída por 5 lagoas rasas, Sistema I, experimento 01, e a segunda, por 5 lagoas profundas, Sistema IX, experimentos 01 e 02. Os dados oriundos destas lagoas, fazem parte da série de 25 anos de dados coletados na operação de lagoas experimentais, em escala-piloto, tratando esgotos domésticos, na EXTRABES (Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários), situada na cidade de Campina Grande (latitude 7° 13' 11" sul e longitude 35° 52' 31" oeste), estado da Paraíba, nordeste do Brasil.

3.2 - Descrição dos Sistemas

As lagoas do Sistema I, também objeto de pesquisa de Silva (1982), entraram em operação em março de 1977, mas os dados utilizados nesta pesquisa são do período de fevereiro de 1978 a janeiro de 1979 (experimento 01). Para o Sistema IX, já estudado por de Oliveira (1990), foram analisados os dados referentes ao período de janeiro a dezembro de 1986 (experimento 01) e de janeiro a dezembro de 1987 (experimento 02), tendo o sistema entrado em operação em julho de 1985.

As paredes verticais das lagoas, construídas em alvenaria, e o fundo de concreto simples, foram revestidos por uma camada de 25 mm de argamassa de cimento e areia para garantir a estanqueidade das unidades.

A alimentação dos Sistemas I e IX era feita com água residuária bruta, predominantemente doméstica, do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Campina Grande, captada de um interceptor (Interceptor Leste ou "da Depuradora") de 900 mm de

diâmetro que atravessa as dependências da EXTRABES (Figura 3.1). A partir de um poço úmido, construído adjacente ao interceptor, o esgoto era bombeado para um tanque de nível constante, no interior da casa de bombas, sendo o esgoto excedente reconduzido ao interceptor, por gravidade. Do tanque de nível constante, o esgoto bruto era bombeado para as lagoas anaeróbias dos respectivos sistemas, através de bombas peristálticas dosadoras.

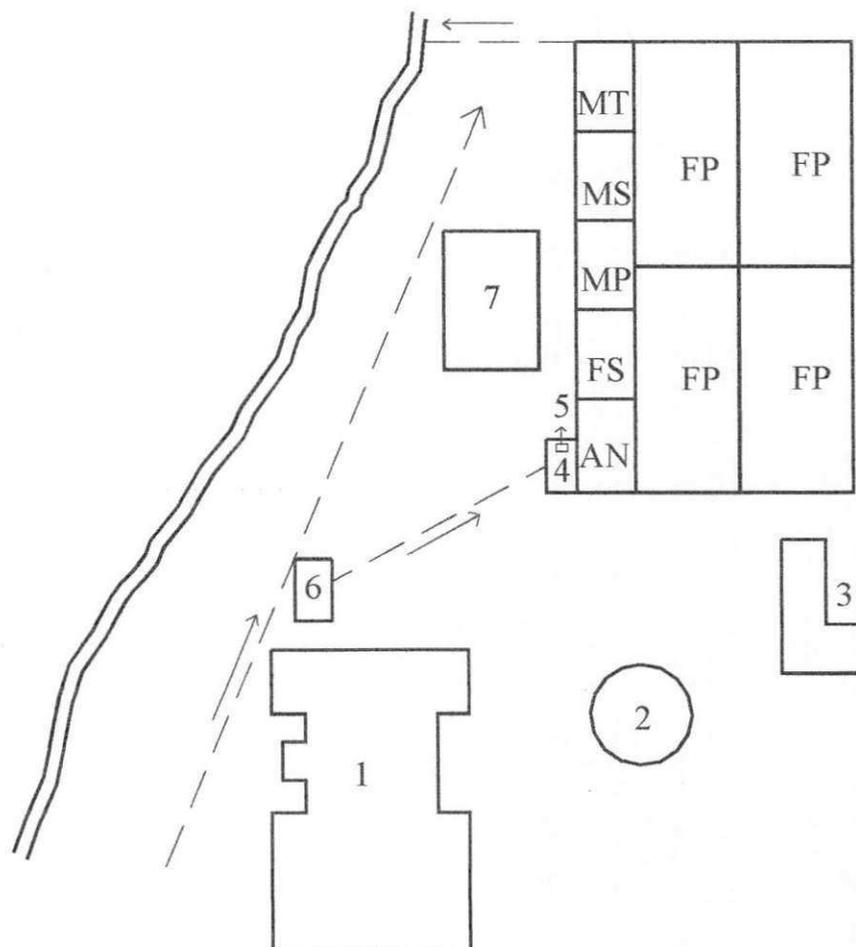


Figura 3.1 – Representação esquemática da EXTRABES (de 1977 a 1990). Nela são identificados: os laboratórios de (1) físico-química, (2) bacteriologia e (3) algologia, (4) a casa de bombas, (5) o tanque de nível constante, (6) o poço úmido e (7) a estação meteorológica. As siglas AN, FS, MP, MS, MT e FP, significam, respectivamente, lagoa anaeróbia, facultativa secundária, maturação primária, maturação secundária, maturação terciária e facultativa primária.

3.2.1 - Sistema I

Esse sistema era constituído por uma série de cinco lagoas de estabilização, sendo uma anaeróbia, seguida de uma facultativa secundária e três lagoas denominadas de

maturação, com um tempo de detenção hidráulica total de 29,1 dias, experimento 01. Com exceção da lagoa anaeróbia, com profundidade de 1,25 m, todos os outros reatores tinham profundidade de 1,00 m. Nas Figuras 3.2 e 3.3, são apresentados, respectivamente, a planta baixa e um corte dessa série de lagoas. A Tabela 3.1 resume as características físicas e operacionais do sistema.

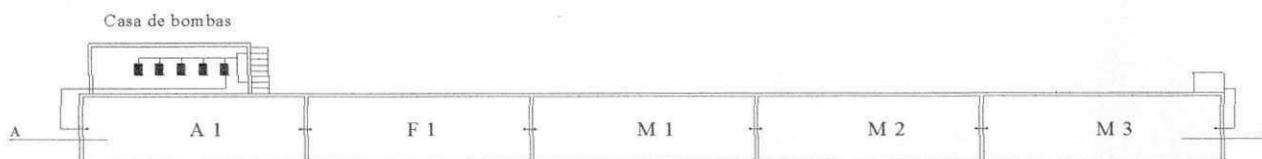


Figura 3.2 - Planta baixa da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01.

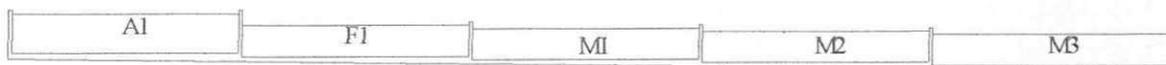


Figura 3.3 - Corte AA da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01.

3.2.1.1 - Alimentação das lagoas

Inicialmente, o esgoto bruto era bombeado do poço úmido, próximo ao interceptor, para o tanque de nível constante. Do tanque, o esgoto era bombeado para a lagoa anaeróbia (A1) da série. A partir daí, as lagoas posteriores eram alimentadas com o efluente da lagoa anterior, por gravidade. O efluente da última lagoa de maturação (M3) era descarregado em um riacho que corria paralelamente ao interceptor, já que a diferença de nível entre a saída da lagoa e o fundo do interceptor não permitia o retorno desse efluente para o interceptor. As especificações das bombas utilizadas para a alimentação desse sistema são descritas em Silva (1982).

Tabela 3.1 – Características físicas e operacionais do Sistema I, experimento 01.

Experimento	Reator	Comprimen- to (m)	Largura (m)	Profundidade (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Vazão de alimentação (m ³ /dia)	Carga superficial (kg DBO ₅ /ha.dia)	Carga volumétrica (g DBO ₅ /m ³ .dia)	Tempo de Detenção Hidráulica (dias)
1	A1	10,00	3,35	1,25	34,00	42,00	6,170	437,50	35	6,80
	F1	10,00	3,35	1,00	34,00	34,00	6,170	116	11,60	5,50
	M1	10,00	3,35	1,00	34,00	34,00	6,170	83	8,30	5,50
	M2	10,00	3,35	1,00	34,00	34,00	6,170	46	4,60	5,50
	M3	10,70	3,35	1,00	36,00	36,00	6,170	35	3,50	5,80

3.2.1.2 - Coleta de amostras

O procedimento de amostragem adotado englobou a coleta de amostras de esgoto bruto no tanque de nível constante e do efluente de cada lagoa da série. As amostras de efluente de cada lagoa foram coletadas próximo à canalização de saída de efluente, dentro do retentor de espuma (Figura 3.4).

As amostras do esgoto bruto e dos efluentes das lagoas eram coletadas em baldes plásticos com 3 litros de volume entre 8 e 9 h da manhã. O horário de coleta das amostras foi definido após o estudo da variação diária (perfil de variação horária) dos diversos parâmetros analíticos, sendo o intervalo de 8 às 9 h da manhã o que melhor representou a média diária para cada parâmetro. Uma vez por semana, eram feitas as análises físico-químicas. Para as análises bacteriológicas, foram utilizados frascos de vidro esterilizados para a coleta das amostras, às 9 h, duas vezes por semana.

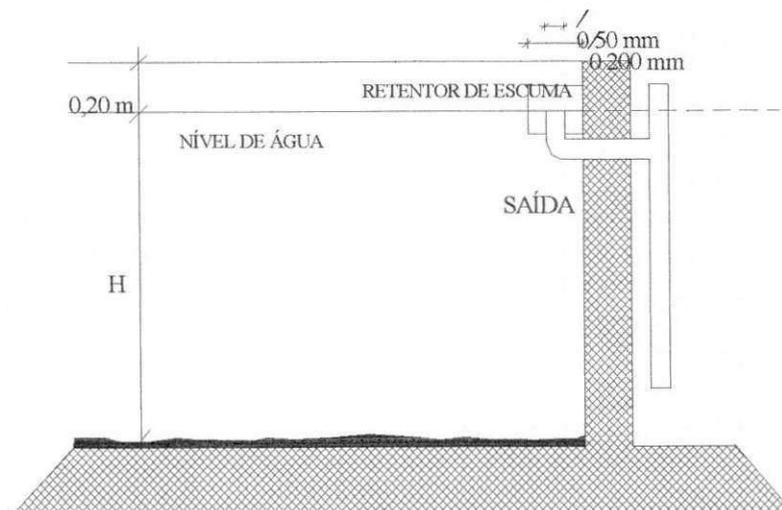


Figura 3.4 – Representação esquemática da saída de uma lagoa, mostrando o ponto de coleta das amostras (retentor de espuma).

3.2.2 - Sistema IX

Esse sistema tinha a mesma configuração de cinco lagoas de estabilização, do Sistema I, mas com profundidade de 2,20 m e tempo de detenção hidráulica total de 25 dias, para o primeiro experimento, e 40 dias para o segundo. Na Figura 3.5 subsequente, é visualizado um corte longitudinal da série de lagoas em questão. Na Tabela 3.2, são apresentadas as características físicas e operacionais do sistema.

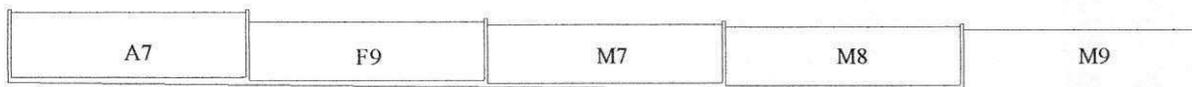


Figura 3.5 - Corte AA da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimentos 01 e 02.

3.2.2.1 - Alimentação das lagoas

A alimentação das lagoas do sistema era realizada conforme descrito em 3.2.1.1. As bombas e as tubulações empregadas na alimentação do sistema foram especificadas por de Oliveira (1990). Na Figura 3.6, a seguir, é apresentado uma representação esquemática da entrada das lagoas da série.

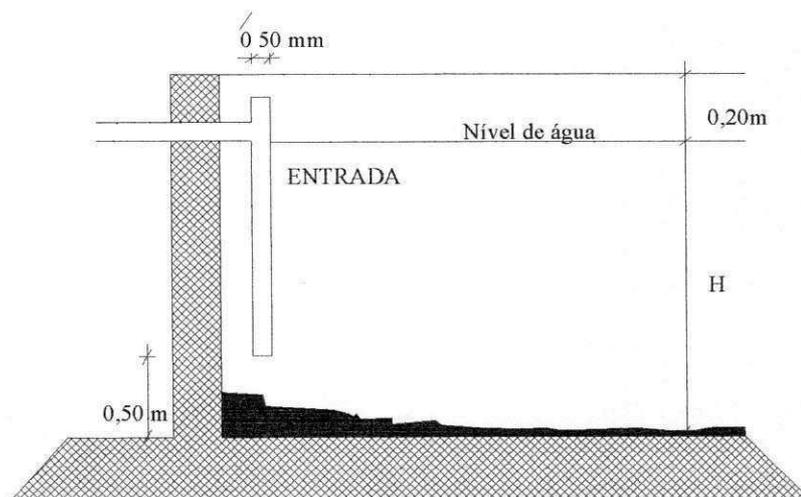


Figura 3.6 – Representação esquemática da entrada das lagoas da série. A entrada das lagoas da série do Sistema I é semelhante (deve ser considerada a diferença de profundidade). Da mesma forma que a saída das lagoas deste sistema é semelhante àquela apresentada na Figura 3.4.

Tabela 3.2 - Características físicas e operacionais do Sistema IX, experimentos 01 e 02.

Experimento	Reator	Comprimen- to (m)	Largura (m)	Profundidade (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Vazão de alimentação (m ³ /dia)	Carga superficial (kg DBO ₅ /ha.dia)	Carga volumétrica (g DBO ₅ /m ³ .dia)	Tempo de Detenção Hidráulica (dias)
1	A7	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	14,740	677,6	30,8	5,00
	F9	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	14,740	330,0	15,0	5,00
	M7	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	14,740	189,2	8,6	5,00
	M8	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	14,740	105,6	4,8	5,00
	M9	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	14,740	61,6	2,8	5,00
2	A7	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	9,216	327,5	14,9	8,00
	F9	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	9,216	162,4	7,4	8,00
	M7	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	9,216	82,6	3,8	8,00
	M8	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	9,216	44,0	2,0	8,00
	M9	10,00	3,35	2,20	33,50	73,70	9,216	24,8	1,1	8,00

3.2.2.2 - Coleta de amostras

A rotina de monitoração foi baseada em amostras de esgoto bruto do tanque de nível constante e do efluente de cada lagoa, retiradas próximas à canalização de saída. A coleta das amostras ocorreu às 8 h da manhã com medidas imediatas de temperatura e pH. Foi adotado o mesmo critério do Sistema I para a definição do horário de coleta. Uma vez por semana, foram feitas análises dos parâmetros físico-químicos e de clorofila “a”. Amostras para a análise de coliformes fecais foram coletadas duas vezes por semana em frascos esterilizados.

3.3 - Variáveis estudadas

Os parâmetros utilizados neste trabalho, os quais são as variáveis de estudo, são os coliformes fecais (CF), os sólidos suspensos (SS), a demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), o pH, o oxigênio dissolvido (OD), a temperatura (T), a demanda química de oxigênio (DQO), a radiação solar (RAD) e a clorofila "a" (CLOR), bem como o tempo de detenção hidráulica (TDH), a profundidade (H) e as cargas orgânicas volumétrica (VO) e superficial (SU). A escolha desses parâmetros foi devida à sua importância na descrição dos processos bioquímicos que se desenvolvem nas lagoas.

3.3.1 - Análises físico-químicas e microbiológicas

Todos os parâmetros, exceto clorofila “a”, foram analisados seguindo as recomendações descritas no APHA *et al.* (1975), para o trabalho de Silva (1982), e no APHA *et al.* (1980), na pesquisa de de Oliveira (1990). Detalhes sobre as especificações dos equipamentos utilizados nas análises de cada sistema podem ser encontrados em Silva (1982) e em de Oliveira (1990). O método empregado para a análise de clorofila “a” é descrito em Silva (1982) e König (1984). A Tabela 3.3 resume os métodos empregados nas análises.

Tabela 3.3 - Métodos empregados nas análises dos parâmetros físico-químicos utilizados neste trabalho

Parâmetro	Método	Observação
Clorofila "a"	Extração com acetona 90%	Método descrito em Silva (1982) e König (1984)
DBO₅	Diluição em frascos padrões	
DQO	Determinação titulométrica após refluxação do dicromato de potássio	No Sistema I, foi empregada a refluxação aberta e, no Sistema IX, a fechada.
Coliformes fecais	Membrana filtrante – Difco m-FC como meio de cultura	
pH	Potenciométrico	
Sólidos suspensos	Gravimetria após filtração a vácuo através de filtro de fibra de vidro	
Oxigênio dissolvido	Eletrodo com membrana seletiva para oxigênio	
Temperatura	Termômetro de filamento de mercúrio	
Radiação solar	Gunn-Bellani, medidor de radiação solar	

3.4 – Análise Estatística

Análise fatorial, técnica estatística multivariada, foi aplicada aos dados das séries de lagoas, com auxílio do programa de computador Statistica (5ª versão, Edição 1997).

Para avaliar a distribuição de frequências das variáveis, foi aplicado o critério de Kolmogorov-Smirnov, já que este critério melhor se ajusta a amostras de pequeno tamanho (Sokal & Rohlf, 1981). Também foram determinadas as matrizes-correlação para os diferentes conjuntos de dados analisados, lagoas isoladas e lagoas em conjunto para os diversos sistemas e experimentos em estudo.

Com os dados normalizados, quando possível, a análise fatorial foi levada a efeito, com o emprego da técnica de componentes principais para a extração dos fatores artificiais.

Capítulo 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Dados médios das variáveis de monitoramento

A evolução do processo de degradação de matéria orgânica e decaimento de coliformes fecais ao longo das séries de lagoas dos diversos experimentos é ilustrada na Tabela 4.1 por intermédio dos dados médios, referentes ao ciclo hidrológico de cada experimento, de cada variável empregada nas análises. Essa tabela também é útil para acompanhar a definição e importância dos diversos fatores artificiais, na descrição dos diversos fenômenos, ao longo de uma série de lagoas. Por exemplo, na medida em que a concentração de coliformes fecais diminui, é possível observar que fator, ou fatores, artificiais apresentam comportamento crescente com relação ao percentual de explicação do comportamento das lagoas. No primeiro experimento do Sistema I é possível observar que o fator aerobicidade apresentou explicação crescente ao longo da série, enquanto a concentração de coliformes fecais diminuiu, indicando que as condições aeróbias da lagoa contribuem para a remoção desse microrganismo. Vale salientar que essa relação entre variáveis é obtido na análise fatorial, de maneira mais simples de verificar (pelas relações de sinais algébrico entre variáveis). Outro fato é que não há, necessariamente, relação direta entre o valor absoluto de determinada variável e o percentual de explicação do fator artificial interpretado por influência dessa variável em particular. Assim, ao longo das lagoas de uma série, o aumento do percentual de explicação da variância das variáveis de um fator, como o fator crescimento algal, pode não acompanhar o aumento da concentração da clorofila “a”, uma vez que o fator artificial explica o percentual da variância do conjunto de todas as variáveis utilizadas na análise, com suas inter-relações, e não apenas de uma variável em particular.

Tabela 4.1 – Dados médios das variáveis empregadas em cada experimento

Sistemas	Lagoas	VARIÁVEIS									
		CLOR	DBO	DQO	COLIF	pH	SOL SUS	OD	T	RAD	TDH cumulativo
Sistema I exp. 01	A1	0,00	71,05	191,69	2,55E+06	7,08	42,76	0,00	24,42	584,30	6,80
	F1	540,46	48,25	218,88	3,66E+05	7,50	85,79	1,62	24,48	584,30	12,30
	M1	370,90	18,54	130,60	2,67E+04	7,85	38,18	4,95	25,68	584,30	17,80
	M2	248,19	11,43	94,13	3,32E+02	7,92	24,09	5,48	25,10	584,30	23,30
	M3	311,82	15,98	102,20	2,82E+01	8,38	35,50	9,38	25,09	584,30	29,10
Sistema IX exp. 01	A7	0,00	77,29	208,87	2,07E+06	6,98	44,03	0,00	25,25	582,16	5,00
	F9	51,13	45,57	158,59	5,77E+05	7,16	37,83	0,28	25,00	582,16	10,00
	M7	56,18	25,65	126,00	1,50E+05	7,37	37,06	0,51	25,02	582,16	15,00
	M8	58,90	17,05	112,59	3,89E+04	7,47	28,33	1,12	25,04	582,16	20,00
	M9	89,98	13,01	104,83	5,74E+03	7,53	27,08	2,75	25,19	582,16	25,00
Sistema IX exp. 02	A7	0,00	61,62	191,61	3,22E+06	7,18	49,13	0,00	26,02	621,06	8,00
	F9	89,14	34,39	156,64	4,18E+05	7,45	50,54	0,40	25,78	621,06	16,00
	M7	115,00	18,82	124,84	3,46E+04	7,68	44,77	2,00	25,81	621,06	24,00
	M8	98,80	11,21	117,53	4,14E+03	7,84	34,14	3,61	25,90	621,06	32,00
	M9	52,36	8,56	102,26	2,67E+02	7,93	31,46	4,67	26,02	621,06	40,00

4.2 – Análises estatísticas empregadas

Os dois sistemas de lagoas de estabilização do presente trabalho foram objeto de pesquisa de Silva (1982), Sistema I, e de Oliveira (1990), Sistema IX. Ambos os pesquisadores tiveram como objetivo investigar séries de lagoas de estabilização com relação ao seu desempenho no tratamento de esgoto doméstico. Silva (1982) foi mais específico na intenção de definir parâmetros regionais ótimos de projeto para lagoas de estabilização, enquanto de Oliveira (1990), procurou destacar quais parâmetros melhor descrevem os processos bioquímicos de uma lagoa, através da avaliação das variações desses parâmetros (perfis), no interior da massa líquida. De Oliveira (1990) também fez uso da análise multivariada em seu trabalho, obtendo um mapeamento das diversas variáveis de desempenho operacional de uma série de lagoas. O autor descreveu, simplificada e, a estrutura das relações existentes entre os diversos parâmetros físico-químicos e coliformes fecais (CF), na massa líquida das unidades do Sistema IX, tendo determinado uma forte relação entre a remoção de CF e matéria orgânica e um fator artificial diretamente relacionado ao tempo de detenção hidráulica. Determinou, também, relações entre os vários parâmetros analíticos e uma segunda componente artificial associada às condições climáticas.

Utilizando a mesma ferramenta estatística empregada por de Oliveira (1990), este trabalho objetiva realizar um mapeamento completo das diversas variáveis importantes na operação de séries de lagoas de estabilização com diferentes configurações e tempos de detenção hidráulica. Os dados utilizados neste trabalho são referentes a períodos de 1 ano (1 ciclo completo de operação), tendo surgido a necessidade de padronizar o período dos dados, para que uma comparação posterior pudesse ser realizada. Assim, os dados coletados por Silva (1982) e de Oliveira (1990) foram reunidos em matrizes para, a partir daí, serem iniciadas as análises estatísticas.

Foram formados conjuntos diferentes de matrizes de dados conforme fosse a análise levada a efeito para uma única lagoa da série, para a série completa ou mesmo para um conjunto particular de lagoas, como por exemplo, todas as lagoas anaeróbias. Formada a matriz, esta era submetida à avaliação da distribuição de frequência de cada variável e à determinação da matriz-correlação dessas variáveis.

A importância da verificação da normalidade reside no fato de que, para a distribuição normal, existe um maior conjunto de métodos estatísticos aplicáveis do que para outras distribuições (Heath, 1981). Quando os dados brutos da variável não têm distribuição normal, artifícios matemáticos, como a aplicação de transformações aos dados, podem ser levados a efeito, para normalizar a variável. Um outro possível artifício seria a adoção de critérios, como o da utilização de médias parciais (por exemplo, a média mensal) de um conjunto de dados de uma variável, para que essas variáveis apresentem uma distribuição mais próxima da normal (*Ibid*).

Após a transformação, a matriz, com as variáveis normalizadas, era submetida à análise fatorial. Nesta análise, são extraídos os fatores artificiais que simplificam a interpretação dos fenômenos que ocorrem nas lagoas de estabilização. O resultado dessa análise é expresso através de diversas tabelas e de um mapa de distribuição das variáveis ou diagrama de dispersão. Uma primeira tabela, a dos autovalores (Tabela 4.2), demonstra o quanto da variância das variáveis é explicado por cada fator e o valor acumulado dessa explicação. Geralmente, é adotado um valor mínimo além do qual o autovalor é aceitável, porque, do contrário, teria que ser considerado um número de fatores artificiais igual ao número de variáveis. Como exemplo, de Oliveira (1990), aplicando a análise fatorial a um conjunto de 7 variáveis (posição da lagoa na série, profundidade de coleta da amostra, temperatura da amostra, pH, oxigênio dissolvido, DQO e concentração de coliformes fecais), obteve apenas dois fatores artificiais com autovalores maiores que 1 (2,911, para o

fator relacionado ao tempo de detenção hidráulica e 1,902, para o fator relacionado às condições climáticas). Estes fatores representaram, respectivamente, 41,6% e 27,2% da variância das variáveis.

A Tabela 4.2, incluída a seguir, mais a título de exemplo, ilustra a aplicação desses princípios aos dados de operação da lagoa facultativa secundária F1, do sistema experimental I, tendo a escolha dos autovalores obedecido ao critério de Kaiser. A partir da Tabela 4.2, é possível verificar que o conjunto dos três fatores artificiais (1, 2 e 3) pode explicar mais de 80% da variância das variáveis de desempenho operacional da lagoa.

Tabela 4.2 - Autovalores e percentuais da variância das variáveis explicadas por cada fator artificial extraído na análise (autovalor maior que a unidade). Esta tabela é resultado da análise para a lagoa facultativa secundária (F1) do Sistema I, experimento 01.

Fatores	Autovalores	% Variância total	Autovalores acumulados	Percentual acumulado
1	4,7390592	52,656214	4,7390592	52,65621
2	1,7216307	19,12923	6,4606899	71,78544
3	1,0989881	12,210979	7,559678	83,99642

Uma segunda tabela (Tabela 4.3) fornece os fatores de carga ou coeficientes de correlação entre as variáveis originais e os fatores artificiais extraídos após a análise dos autovalores. Com os fatores de carga é possível interpretar os fatores artificiais, pois as variáveis de maior influência no fenômeno apresentam os mais altos coeficientes de correlação com os fatores artificiais.

Os fatores de carga também representam as coordenadas das variáveis no espaço multidimensional (diagrama de dispersão) definido pelos fatores artificiais, os quais constituem os eixos que definem esse espaço. Sua dimensão é função do número de fatores artificiais resultantes da análise. Para uma melhor visualização, geralmente, o diagrama de dispersão é formado por apenas dois fatores artificiais, definidores de um plano. Os eixos, representados pelos fatores artificiais, podem ser rotacionados, para que uma melhor

Tabela 4.3 - Fatores de carga ou coeficientes de correlação entre as variáveis e os fatores artificiais. Esta tabela foi resultado da análise para a lagoa facultativa secundária do Sistema I, experimento 01, com extração dos fatores pela técnica de componentes principais e aplicação da rotação varimax normalizada.

Cargas Fatoriais destacadas > 0,70			
Fator	1	2	3
CLOR	0,68981	0,58474	-0,08408
DBO	0,92543	-0,07487	-0,10089
DQO	0,96020	-0,05467	0,21284
COLIF	-0,76984	0,12619	-0,31312
PH	0,48992	0,17032	0,75251
SOL_SUS	0,93870	0,05544	0,07965
OD	-0,07557	-0,24685	0,89855
T	0,19846	-0,92271	0,07641
RAD	0,68896	-0,38456	0,25818
Autovalor	4,48784	1,45873	1,61311
Perc. Expl.	0,49865	0,16208	0,17923

interpretação dos fatores seja conseguida. Como exemplo de diagrama de dispersão, é exposto na Figura 4.1, a seguir, o resultado da análise da lagoa anaeróbia (A1) do Sistema I, experimento 01. Pela distribuição das variáveis no diagrama, é possível interpretar o eixo das abscissas como um fator relacionado à estabilidade do processo anaeróbio, pelo alto fator de carga (próximo à unidade) que, principalmente, a variável pH apresentou com este eixo; já o eixo das ordenadas foi associado à concentração de material orgânico, em vista das altas correlações apresentadas pela DQO e sólidos suspensos com esse fator artificial.

4.2 - Análise fatorial

Uma avaliação da influência da distribuição de frequências das variáveis na análise fatorial foi realizada neste trabalho. Inicialmente, a análise fatorial foi testada com os dados brutos de todas as variáveis. A exceção foi a variável radiação solar, cujos dados não foram utilizados nessas análises iniciais. Todas as lagoas e a série completa do Sistema I, experimento 01, referentes ao período de janeiro a dezembro de 1978 fizeram parte do teste. Como resultado, foram obtidas, a título de exemplo, explicações que

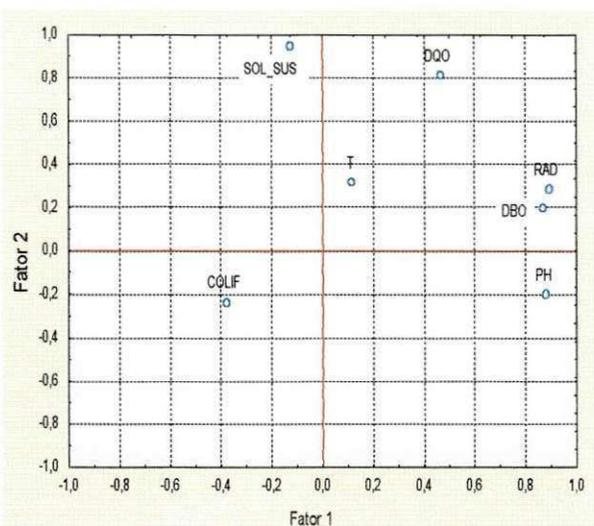


Figura 4.1 - Exemplo de diagrama de dispersão. Este diagrama é referente à lagoa anaeróbia (A1) do Sistema I, experimento 01. Nele, as variáveis são distribuídas em um plano definido por dois fatores artificiais. As coordenadas dessas variáveis são os fatores de carga.

variaram de 59,42% (na análise da lagoa de maturação primária, M1) a 82,66% (para a série completa) da variância total das variáveis. Nessas análises, foram extraídos três fatores. Em uma segunda análise, foi empregado o critério de Kolmogorov-Smirnov, para testar a normalidade do mesmo conjunto de dados. Foi observado que a quase totalidade das variáveis analisadas não apresentava distribuição normal. Diversas transformações foram empregadas nos diferentes conjuntos de dados, mas não foi possível normalizar todas as variáveis. Mesmo assim, a análise fatorial foi levada a efeito para as lagoas individuais e para a série completa (Sistema I, experimento 01) resultando em explicações que variaram de 60,24% (lagoa M1) a 83,72% (série completa) da variância total, também com extração de 3 fatores. Estes percentuais foram bastante semelhantes aos anteriores.

Uma terceira análise fatorial foi levada a efeito para o Sistema I, experimento 01. Foram empregadas as médias mensais do conjunto de dados brutos da primeira análise tendo os resultados confirmado o que já havia sido referido por Heath (1981), pois a normalização das variáveis foi conseguida (as únicas exceções foram as cargas orgânicas superficial e volumétrica, na análise para a série completa). O nível de explicação da

variância das variáveis também foi maior, variando de 86,74% (maturação primária, M1) a 90,83% (maturação terciária, M3), para 3 fatores extraídos. Desse modo, as médias mensais foram empregadas para as análises subsequentes dos outros sistemas e experimentos.

4.2.1 - Interpretação dos fatores resultantes da análise fatorial

A análise fatorial aplicada às diferentes lagoas, dos dois sistemas nos diferentes experimentos, forneceu fatores artificiais de diversas interpretações. A seguir, são apresentados, a título de exemplos, os principais fatores artificiais resultantes das análises. Nesta seção, não é comentada a influência do fator sobre qualquer das variáveis em estudo, como, por exemplo, coliformes fecais. Ela visa apenas permitir uma melhor compreensão dos fatores artificiais para discussões posteriores, durante as análises de cada sistema e experimento. Nas interpretações dos fatores artificiais, variáveis são consideradas bem correlacionadas com o fator, quando apresentam fator de carga maior que 0,70 (valor adotado pelo programa Statistica).

(a) Fator estabilidade do processo anaeróbico: a metanogênese, em geral, é o passo que limita a velocidade do processo de digestão anaeróbia como um todo (Gujer e Zehnder, 1983 *apud* van Haandel e Lettinga, 1994), mas ela só se desenvolverá satisfatoriamente quando o ambiente da lagoa apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento da população de bactérias metanogênicas. Essas bactérias sofrem ação negativa de diversos fatores (de Oliveira, 1983) tais como baixas temperaturas e características do esgoto (presença de metais pesados e detergentes, altas concentrações de nitrogênio amoniacal e sulfeto, alterações na alcalinidade e pH). Com relação ao pH a literatura tem, tradicionalmente, considerado uma estreita faixa de pH, para uma eficiente metanogênese, 6,3 - 7,8 (van Haandel & Lettinga, 1994). Já Metcalf & Eddy (1991), cita uma faixa de pH mais restrita de 6,6 a 7,6. Embora inúmeras variáveis possam intervir na

estabilidade do processo anaeróbio, no presente trabalho, apenas as influências do pH, da temperatura e medidas de concentração de material orgânico, entre as mais representativas, podem ser avaliadas. Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a seguir, são observados diferentes conjuntos de variáveis que permitem a interpretação do **fator estabilidade do processo anaeróbio**. Na Figura 4.2, o fator 03 (eixo das ordenadas), interpretado como **estabilidade do processo anaeróbio**, apresenta boa correlação com o pH. Já na Figura 4.3, a influência sobre este fator (eixo das abscissas) é devida à concentração de material orgânico (representada pela DBO₅), radiação solar e também ao pH. A temperatura, juntamente com a radiação, e coliformes fecais, indicativo de material fecal, também são variáveis aparentes nos processos anaeróbios, conforme representado nas Figuras 4.4 (eixo das abscissas) e 4.5 (eixo das ordenadas), respectivamente. É válido notar que, nessas figuras, novamente o pH apresenta boa correlação com este fator, mostrando importância fundamental na digestão anaeróbia, e, portanto, para as bactérias metanogênicas;

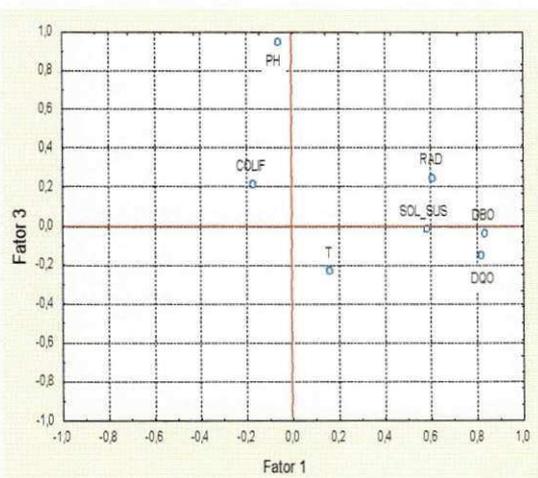


Figura 4.2 - Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das ordenadas) bem correlacionado com o pH. Este diagrama de dispersão é resultado da análise para as lagoas anaeróbias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

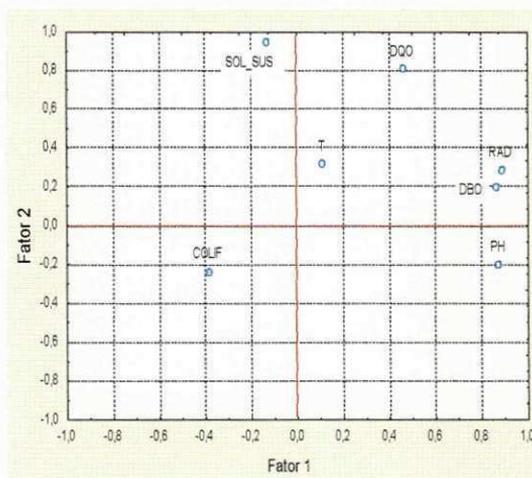


Figura 4.3 - Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbio (eixo das abscissas) bem correlacionado com pH, radiação solar e concentração de matéria orgânica. Este diagrama de dispersão é resultado da análise para a lagoa anaeróbia do Sistema I, experimento 01. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

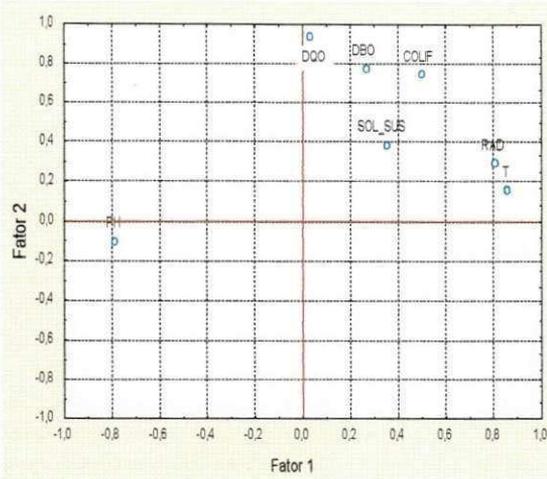


Figura 4.4 - Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbico (eixo das abscissas) bem correlacionado com pH, radiação solar e temperatura. Este diagrama é resultado da análise para a lagoa anaeróbia do Sistema IX, experimento 01. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

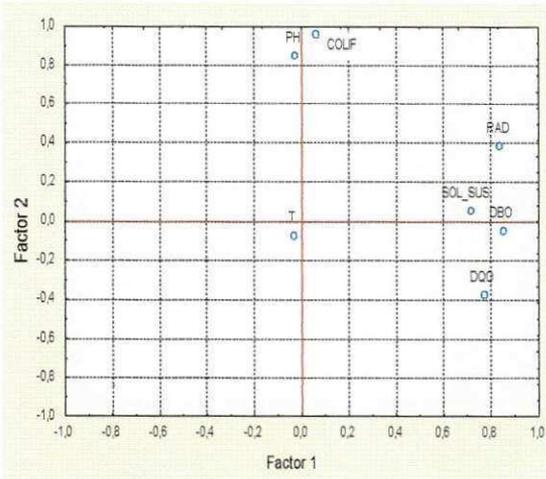


Figura 4.5 - Exemplo de fator estabilidade do processo anaeróbico (eixo das ordenadas) bem correlacionado com pH e coliformes fecais. Este diagrama é resultado da análise para a lagoa anaeróbia do Sistema IX, experimento 02. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

(b) Fator concentração de material orgânico: este fator apresenta boas correlações com DBO_5 , DQO e, às vezes, com os sólidos suspensos, coliformes fecais e clorofila “a”. Ele dá uma indicação da qualidade do efluente de determinada lagoa podendo essa indicação ser sanitária (coliformes fecais) ou devida à matéria orgânica (DBO_5 , DQO), uma vez que essas variáveis apresentam maior importância na caracterização do fator. Os sólidos suspensos, devido à presença de algas, também podem estar associados a ele. O fator concentração de material orgânico indica a necessidade de cuidados com o lançamento desses efluentes em corpos receptores, podendo estar relacionado, por exemplo, a uma insuficiente remoção da matéria orgânica ou a um excesso de sólidos suspensos, que contribuem para a depleção de oxigênio dissolvido no corpo receptor, implicando em graves consequências para a vida aquática. Este fator é bem característico de lagoas anaeróbias e facultativas secundárias, reatores que apresentam, ao longo de uma série, efluentes com as piores características. Esse fator não exprime quantitativamente a

qualidade ruim do efluente, mas dá uma interpretação qualitativa desse efluente. Exemplos deste fator são visualizados nas Figuras 4.2 (eixo das abscissas) e 4.6 (eixo das abscissas);

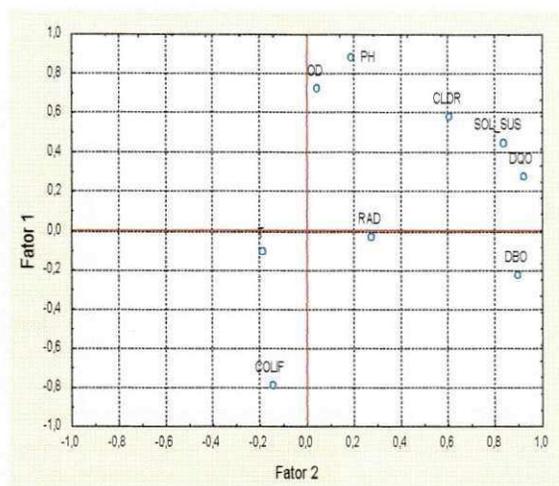


Figura 4.6 - Exemplo de fator concentração de material orgânico devido às variáveis medidas desse material. Este diagrama é resultado da análise para as lagoas facultativas secundárias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

(c) Fator crescimento algal: após o processo anaeróbio, há o estabelecimento de condições ambientais adequadas para o desenvolvimento da biomassa algal. Estas condições podem ser caracterizadas por elevada concentração de CO_2 , produto da digestão anaeróbia, diminuição da concentração de material orgânico, presença de nutrientes minerais, particularmente nitrogênio e fósforo, e penetração da radiação solar no meio aquático, devido à maior transparência da massa líquida. Este fator é traduzido pela presença de clorofila "a". Esta variável pode aparecer associada à concentração de oxigênio dissolvido, ao valor do pH (na medida em que a concentração de CO_2 tende a diminuir ao longo da série devido à atividade fotossintética) e também aos parâmetros DBO_5 , DQO, sólidos suspensos, e, em certas circunstâncias, à radiação solar. Vale salientar, que a concentração de clorofila "a" na massa líquida da lagoa pode não ter, necessariamente, relação direta com a concentração de oxigênio dissolvido. Neste caso, diversos fatores, entre os quais, substâncias tóxicas podem prejudicar a fotossíntese da biomassa do

fitoplâncton, ou esta pode ser constituída de gêneros que apresentam baixa produtividade de oxigênio. Outra divergência entre as concentrações dessas variáveis pode ser observada, quando o aumento da intensidade luminosa durante o dia faz com que as algas migrem das camadas mais superficiais para as mais profundas, deixando naquelas uma elevada concentração de oxigênio dissolvido residual, que, à primeira vista, é incompatível com a baixa concentração de clorofila "a". Um terceiro aspecto que também pode ser avaliado, principalmente, em lagoas profundas, é que, nesses reatores, há muito mais digestão anaeróbia que em lagoas rasas (a digestão anaeróbia pode ser verificada até mesmo em lagoas consideradas de maturação). Os subprodutos dessa digestão, como ácidos e gases, exercem forte influência nas variáveis responsáveis pela oxidação aeróbia, que se desenvolve nas camadas mais superficiais. Ácidos alteram o pH, e o oxigênio dissolvido pode ser utilizado para oxidar certos radicais reduzidos, como sulfeto (S^{2-}) para enxofre elementar (S^0) (Silva, 1999). Todos esses fatos citados acima indicam que as algas, representadas pela clorofila "a", são microrganismos detentores de potencial para a produção de oxigênio, devido a capacidade de realizar fotossíntese, mas não necessariamente, criam condições aeróbias na massa líquida da lagoa na mesma proporção com que se desenvolvem.

O fator crescimento algal foi interpretado ao analisar a Figura 4.7 (eixo das ordenadas), em que este fator está bem correlacionado com a clorofila "a". Em outras circunstâncias a interpretação desse fator é obtida quando variáveis como sólidos suspensos, DBO_5 , DQO e clorofila "a" estão bem correlacionadas com o mesmo fator (Figura 4.8, eixo das abscissas), ou também uma boa correlação com clorofila "a" e radiação solar (Figura 4.9, eixo das ordenadas);

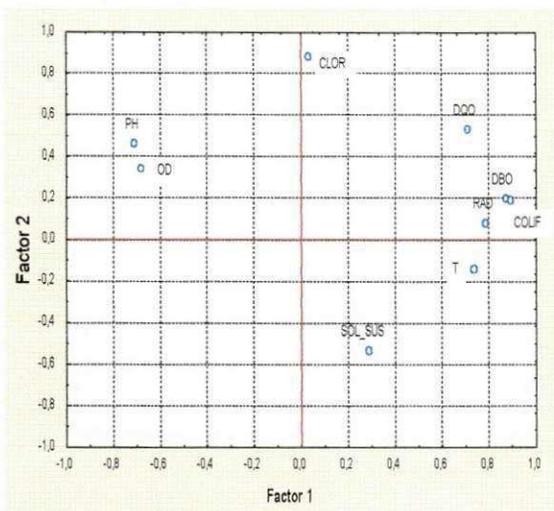


Figura 4.7 - Exemplo de fator crescimento algal (eixo das ordenadas), representado exclusivamente pela clorofila "a". Este diagrama é resultado da análise para a lagoa facultativa secundária do Sistema IX, experimento 01. Não foi aplicada nenhuma rotação.

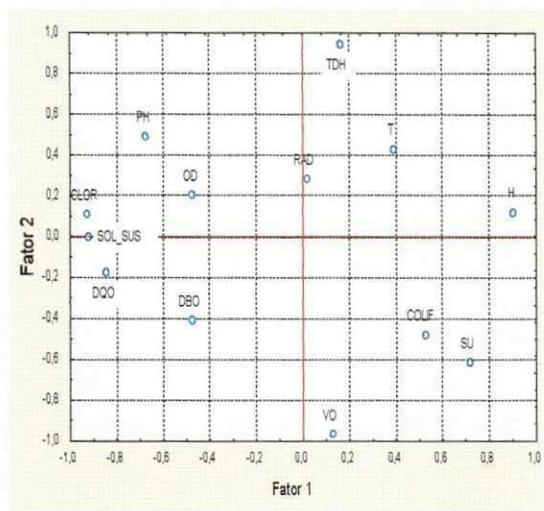


Figura 4.8 - Exemplo de fator crescimento algal (eixo das abscissas), representado por várias variáveis. Este diagrama é resultado da análise para as lagoas facultativas secundárias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

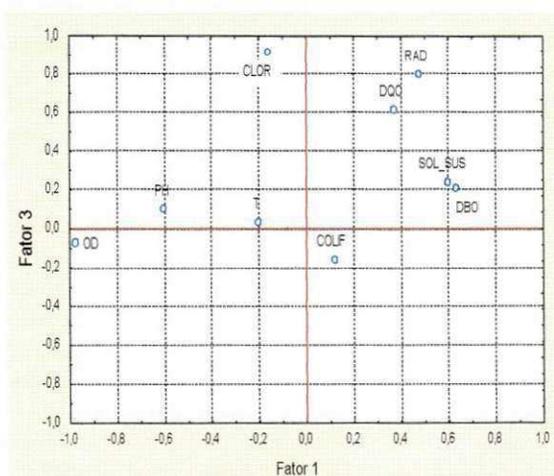


Figura 4.9 - Exemplo de fator crescimento algal (eixo das ordenadas), relacionado à clorofila "a" e radiação solar. Este diagrama é resultado da análise para a lagoa facultativa secundária do Sistema IX, experimento 02. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

(d) Fator aerobicidade: representa a produtividade de oxigênio do fitoplâncton, ou seja, o fator aerobicidade reflete o saldo positivo de oxigênio dissolvido no reator. Nas análises fatoriais para as lagoas rasas, clorofila "a" e oxigênio dissolvido exerceram forte influência no mesmo fator, traduzindo a inter-relação entre essas variáveis e outras consequentes da atividade fotossintética como DBO₅, DQO, sólidos suspensos e pH. A radiação solar também apresentou boa correlação com este fator, exprimindo sua influência na fotossíntese. Por outro lado, para as lagoas profundas, oxigênio dissolvido e clorofila "a" não obtiveram boas correlações com o mesmo fator, definindo, assim, dois fatores independentes: o crescimento algal (que exprime o potencial de produção de oxigênio de uma lagoa) e aerobicidade (saldo positivo de oxigênio dissolvido no reator). Na Figura 4.10 (eixo das ordenadas), o fator aerobicidade está bem correlacionado com o oxigênio dissolvido e pH. A relação entre o oxigênio dissolvido, clorofila "a" e outras variáveis é visualizada na Figura 4.11 (eixo das abscissas), e exclusivamente com pH e coliformes fecais, na Figura 4.12 (eixo das ordenadas);

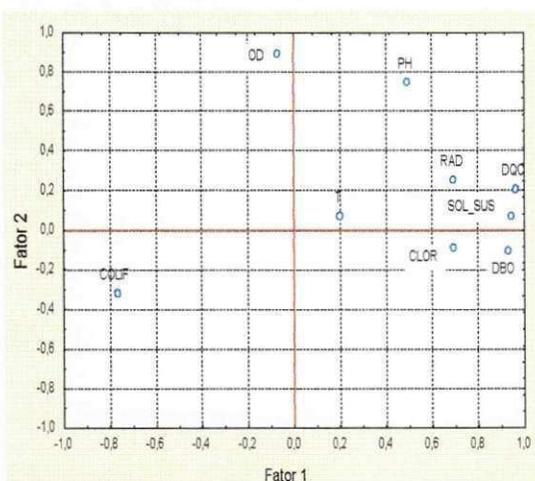


Figura 4.10 - Exemplo de fator aerobicidade (eixo das ordenadas), demonstrando a relação entre oxigênio dissolvido e pH. Este diagrama é resultado da análise da lagoa facultativa secundária do Sistema I, experimento 01. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

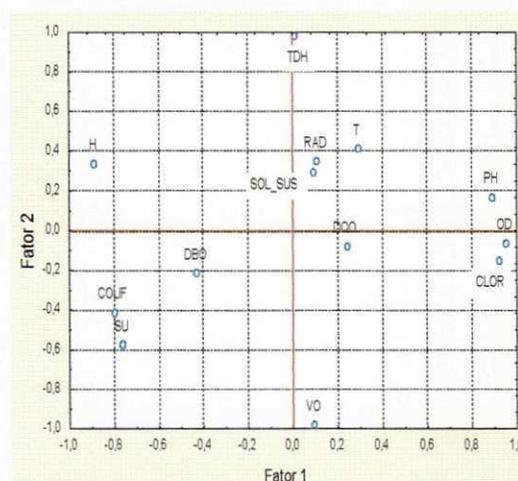


Figura 4.11 - Exemplo de fator aerobicidade (eixo das abscissas), explicitando o comportamento de diversas variáveis frente à clorofila "a" e, principalmente, ao oxigênio dissolvido. Este diagrama é resultado da análise para as lagoas de maturação primárias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

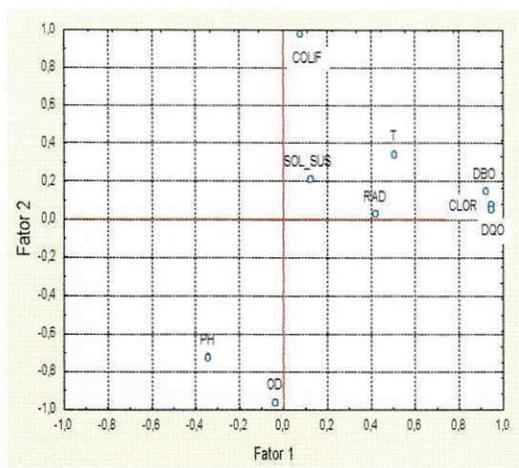


Figura 4.12 - Exemplo de fator aerobidade (eixo das ordenadas), demonstrando a influência das condições aeróbias da lagoa na remoção de coliformes fecais. Este diagrama é resultado da análise da lagoa de maturação terciária do Sistema IX, experimento 02. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

(e) **Fator temperatura:** representado pela temperatura e, ocasionalmente, pela radiação solar. Este fator retrata a importância da temperatura na velocidade das reações bioquímicas que são processadas no reator e no ciclo diário de estratificação e mistura, que exerce influência na intensidade do contato entre os microrganismos e a massa líquida. A variável radiação solar esteve mais frequentemente relacionada ao fator aerobidade, nas análises realizadas para as lagoas rasas, mostrando sua influência na fotossíntese, e apenas ocasionalmente, relacionada à temperatura, em lagoas profundas, no presente trabalho. Exemplos da interpretação desse fator devido à temperatura isolada, em conjunto com a radiação solar e devido à radiação, principalmente, podem ser observados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, respectivamente. Em todos os três casos o fator está representado pelo eixo das ordenadas;

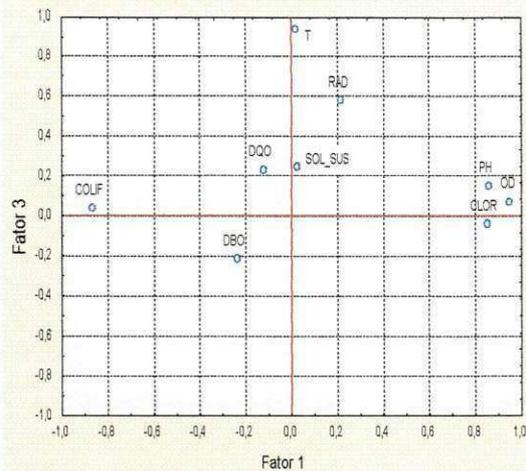


Figura 4.13 - Exemplo de fator temperatura, com influência principal dessa variável no fator. Este diagrama é resultado da análise para as lagoas de maturação secundárias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

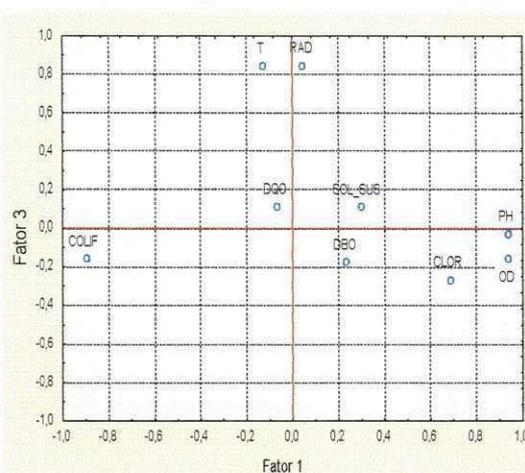


Figura 4.14 - Exemplo de fator temperatura, com influência conjunta da temperatura e radiação solar sobre o fator. Este diagrama é resultado da análise para as lagoas de maturação terciárias de todos os experimentos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

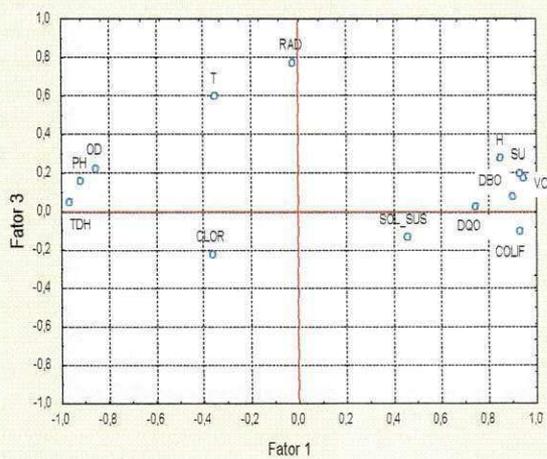


Figura 4.15 - Exemplo de fator temperatura, sendo a principal correlação a da radiação solar. Este diagrama é resultado da análise para a série completa de lagoas do Sistema I, experimento 01. Não foi aplicada nenhuma rotação.

(f) Fator tempo de detenção hidráulica: traduz a importância do tempo que o líquido permanece no reator bem como na evolução dos processos de degradação do material orgânico e na remoção de coliformes fecais ao longo de séries de lagoas de estabilização. Neste trabalho, os dados da variável tempo de detenção hidráulica foram empregados de duas maneiras diferentes. Em análises fatoriais levadas a efeito para as séries de lagoas, o tempo de detenção utilizado foi cumulativo (TDH_a) ao longo das lagoas da série. Já para as análises efetuadas com um conjunto de lagoas de mesmo tipo e com as três lagoas de maturação em série de cada experimento, o tempo de detenção empregado foi o individual de cada reator (TDH_i). Portanto, o fator tempo de detenção hidráulica foi interpretado a partir de dois conjuntos diferentes de dados da mesma variável. Assim, este fator realizou um mapeamento de diversas variáveis (como pH, carga orgânica, oxigênio dissolvido, DBO_5 etc) tanto para um tipo específico de lagoa quanto para uma série de lagoas. A influência do tempo de detenção hidráulica em diversas variáveis é visualizada nas Figuras 4.8 (eixo das ordenadas) e 4.16 (eixo das abscissas).

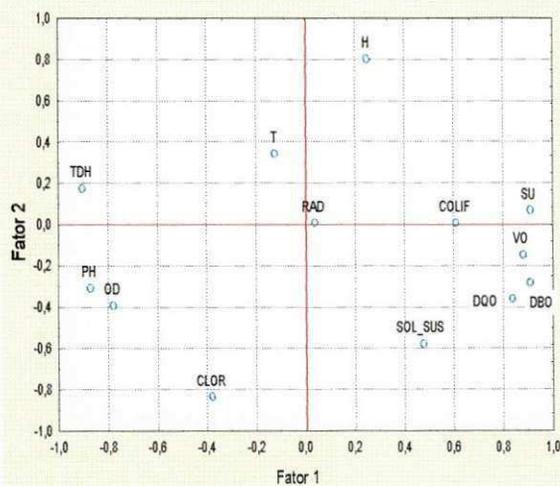


Figura 4.16 - Exemplo de fator tempo de detenção hidráulica (TDH_a), demonstrando o comportamento das diversas variáveis frente a esta variável. Este diagrama é resultado da análise para as 3 séries de lagoas do presente estudo. Não foi aplicada nenhuma rotação.

4.2.2 - Análise fatorial do Sistema I, experimento 01

Para a análise fatorial do conjunto de dados das lagoas individuais e da série completa deste sistema e experimento, foram empregadas as médias mensais dos dados brutos de todas as variáveis de desempenho operacional, referentes ao período de fevereiro de 1978 a janeiro de 1979. Dela resultaram explicações tão expressivas como 84,00% (lagoa facultativa secundária, F1) e 89,61% (maturação terciária, M3) da variância total das variáveis. A diferença entre o nível de explicação apresentado aqui e na Seção 4.2 foi devida ao número de variáveis utilizadas nas análises. Durante a avaliação sobre qual seria o melhor conjunto de dados a ser utilizado nas análises, os dados de radiação solar não foram empregados (Seção 4.2). Na interpretação dos fatores, para cada lagoa isolada e para a série completa, apenas os fatores com autovalores maiores que a unidade (critério de Kaiser) foram extraídos.

A análise fatorial levada a efeito para a lagoa anaeróbia (A1), foi capaz de explicar 86,30% da variância total das variáveis empregadas na análise. Esse percentual foi distribuído pelos 3 fatores artificiais que apresentaram autovalores maiores que a unidade. O fator 1 cujo autovalor foi 2,69, explicou 38,39% da variância total. Os fatores 2 e 3, com autovalores 1,89 e 1,47 interpretaram, respectivamente, 26,94% e 20,97% da variância total. Pela análise dos diagramas de dispersão (Figuras 4.17 e 4.18), foi possível interpretar os fatores artificiais como estabilidade do processo anaeróbio (fator 1), pela sua alta correlação com o pH e importância desta variável para o processo anaeróbio, fator concentração de material orgânico (fator 2), pelos altos fatores de carga entre esse fator e DQO e sólidos suspensos, e, por fim, fator temperatura (fator 3), pela alta correlação com a variável temperatura. Pela distribuição das diversas variáveis nos diagramas de dispersão é verificada a pequena influência das condições ambientais internas e externas à lagoa, como pH, temperatura e radiação solar, sobre o comportamento dos coliformes fecais. Isso

evidencia o fato de que na lagoa anaeróbia não existem condições ideais para a remoção adequada desses microrganismos. Assim, a pequena remoção dos coliformes fecais em lagoas anaeróbias pode ser atribuída a mecanismos como sedimentação (Soares, 1985; de Oliveira, 1990), principalmente. Nas Figuras 4.17 e 4.18, são representados, respectivamente, os fatores estabilidade do processo anaeróbio x concentração de material orgânico e estabilidade do processo anaeróbio x temperatura.

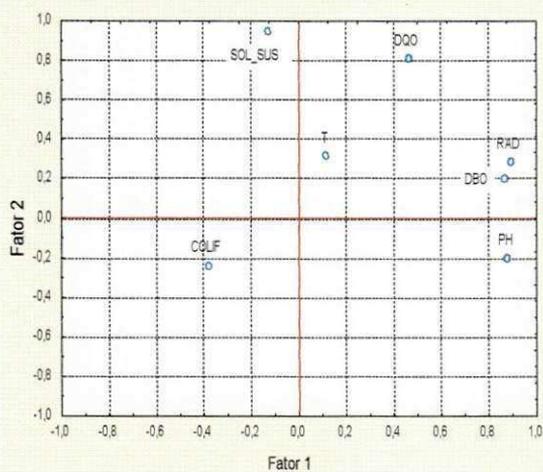


Figura 4.17 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A1 (Sistema I, experimento 01). Fator estabilidade do processo anaeróbio x fator concentração de material orgânico. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

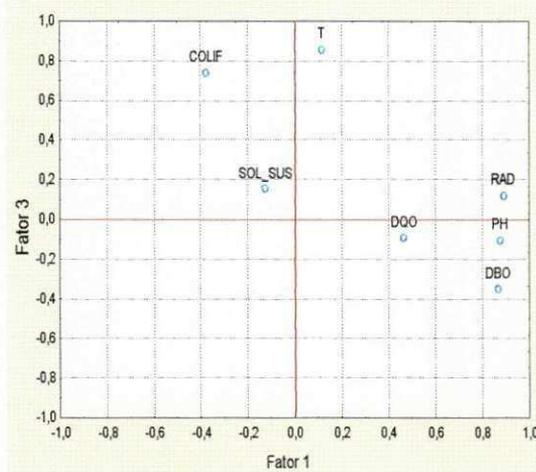


Figura 4.18 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A1 (Sistema I, experimento 01). Fator estabilidade do processo anaeróbio x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

Para a lagoa facultativa secundária (F1), a análise fatorial explicou 83,99% da variância total das variáveis, com a extração de 3 fatores artificiais. O primeiro fator apresentou autovalor de 4,49, o segundo, 1,61, e o terceiro, 1,46. Esses autovalores representaram, respectivamente, 49,86%, 17,92% e 16,21% da variância total. O fator 1 foi interpretado como concentração de material orgânico, uma vez que, ao analisar o diagrama de dispersão (Figura 4.19), este fator apresentou boa correlação com DBO₅, DQO e sólidos suspensos. O segundo fator, denominado fator aerobidade, obteve alto coeficiente de correlação com o oxigênio dissolvido (também visualizado na Figura 4.19). A influência do pH sobre esse fator, em conjunto com o oxigênio dissolvido, exprime a atividade

fotossintética das algas na lagoa, consumindo CO_2 , com a subsequente dissociação do íon bicarbonato e a liberação de íons hidroxila que eleva o pH. Já o terceiro fator apresentou boa correlação com a variável temperatura sugerindo que ele seja interpretado como fator temperatura (Figura 4.20). Nas figuras a seguir (diagramas de dispersão para F1), estão representados os fatores concentração de material orgânico (eixo das abscissas) e aerobocidade (eixo das ordenadas), Figura 4.19, e, concentração de material orgânico (eixo das abscissas) e temperatura (eixo das ordenadas), Figura 4.20. O resultado desta análise demonstra o surgimento, na lagoa, de condições aeróbias, de atividade fotossintética e uma oposição, quanto a influência no fator 1 (Figura 4.19 ou 4.20), entre condições ambientais (pH e radiação solar) e coliformes fecais.

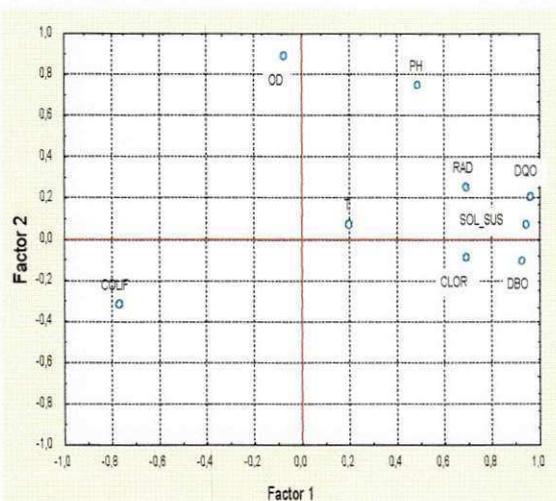


Figura 4.19 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F1 (Sistema I, experimento 01). Fator concentração de material orgânico x fator aerobocidade. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

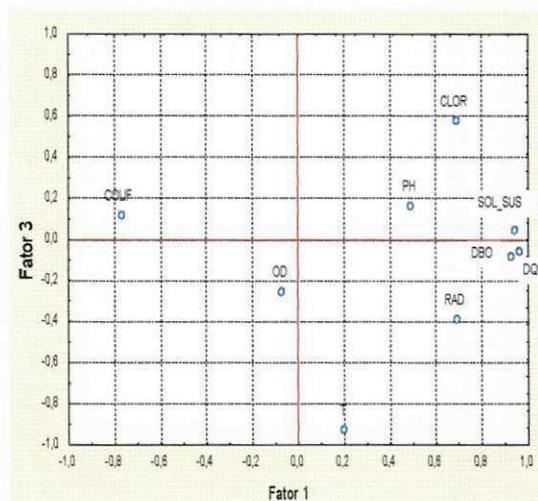


Figura 4.20 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F1 (Sistema I, experimento 01). Fator concentração de material orgânico x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

A análise fatorial dos dados da lagoa de maturação primária (M1) explicou 85,65% da variância das variáveis, para 3 fatores extraídos. O primeiro fator teve autovalor 5,30 e explicou 58,93% da variância total, enquanto o segundo fator, cujo autovalor foi de 1,42, representou 15,76% da variância total das variáveis. Por não apresentar autovalor

maior que a unidade, o terceiro fator não fez parte da etapa de interpretação. Assim, o fator 1 foi interpretado como fator aerobidade, tanto devido ao alto fator de carga do oxigênio dissolvido como pelo comportamento das outras variáveis, demonstrando a alta atividade fotossintética da lagoa. O segundo fator foi interpretado como fator temperatura. A principal característica das lagoas de maturação, o desenvolvimento de condições ambientais da lagoa (OD e pH) desfavoráveis aos coliformes fecais, é evidenciada no diagrama de dispersão (Figura 4.21) pela distribuição das variáveis ao longo do eixo das abscissas. Nesse diagrama, estão representados os fatores aerobidade (eixo das abscissas) e temperatura (eixo das ordenadas).

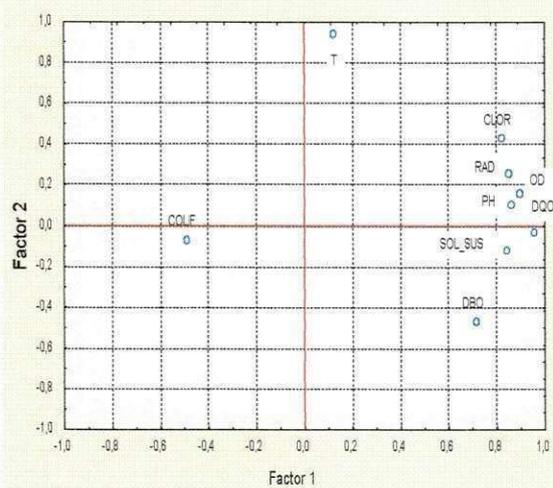


Figura 4.21 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M1 (Sistema I, experimento 01). Fator aerobidade x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Também em M2, apenas dois fatores artificiais apresentaram autovalores maiores que a unidade, o fator 1, com autovalor igual a 5,94, e o fator 2, com 1,27. A variância total das variáveis explicadas pela análise fatorial foi de 87,89%, para 3 fatores artificiais. O primeiro fator explicou 65,97% e foi interpretado como aerobidade, conforme justificativa aplicada à lagoa de maturação primária. O segundo fator, interpretado como temperatura, representou 14,13% da variância total, e mostrou

influência oposta sobre as variáveis temperatura e coliformes fecais. Na Figura 4.22 (diagrama de dispersão), o fator aerobividade está representado pelo eixo das abscissas e o fator temperatura, pelo eixo das ordenadas.

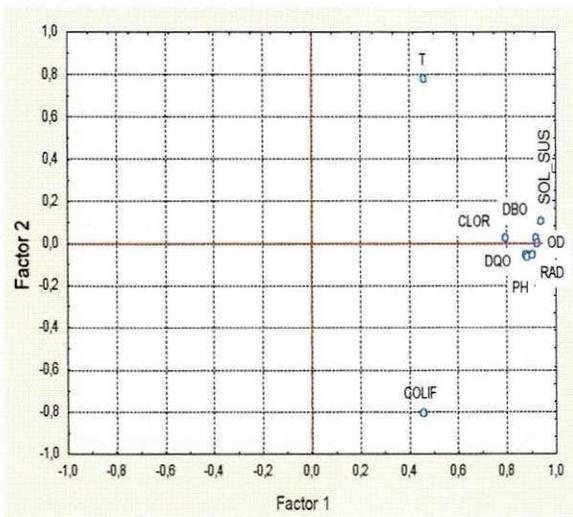


Figura 4.22 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M2 (Sistema I, experimento 01). Fator aerobividade x fator temperatura. Não foi aplicada nenhuma rotação.

A análise fatorial levada a efeito para a lagoa M3, explicou 89,61% da variância das variáveis, com a extração de 3 fatores artificiais. Os dois primeiros fatores, únicos com autovalor maior que a unidade (5,53 e 1,79, respectivamente), representaram 61,50% (Fator 1) e 19,91% (Fator 2) da variância das variáveis. O primeiro fator, apesar de apresentar os maiores fatores de carga com as variáveis DQO, DBO₅ e sólidos suspensos, foi interpretado como crescimento algal, dada a influência de variáveis como pH, oxigênio dissolvido, radiação solar e clorofila “a” (Figura 4.23). Um crescimento exagerado das algas também é refletido nas variáveis medidas de matéria orgânica, como DQO e DBO₅. O segundo fator, como nas outras lagoas de maturação da série, foi interpretado como temperatura. A Figura 4.23 representa o diagrama de dispersão para a lagoa M3, no

qual o eixo das abscissas está relacionado ao fator crescimento algal e o eixo das ordenadas, ao fator temperatura.

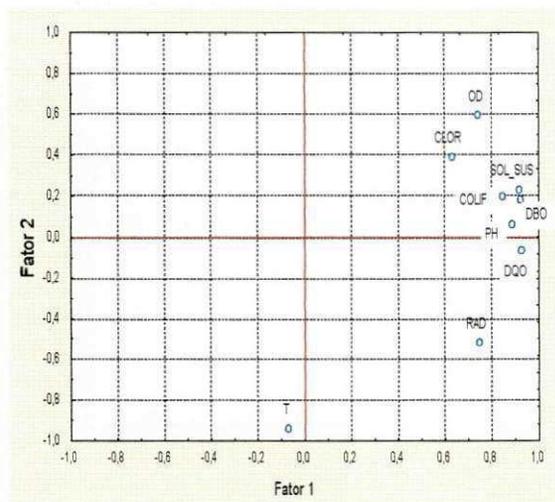


Figura 4.23 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M3 (Sistema I, experimento 01). Fator crescimento algal x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Na análise da série completa, foi aplicado o logaritmo decimal a DBO_5 , coliformes fecais e sólidos suspensos, para normalizar a distribuição de frequências dessas variáveis. Com isso, a análise fatorial resultou em uma explicação de 87,77% da variância das variáveis, para 3 fatores extraídos. Todos os 3 fatores artificiais (1, 2 e 3) apresentaram autovalores maiores que a unidade, 7,67, 2,45 e 1,29, respectivamente. O primeiro fator, que explicou 59,01% da variância total, foi interpretado como tempo de detenção hidráulica (Figura 4.24, fator tempo de detenção hidráulica x fator crescimento algal), pela altíssima correlação que esta variável apresentou com o fator, e sua influência nas outras variáveis em questão. Variáveis como DBO_5 , DQO, coliformes fecais e cargas orgânicas superficial e volumétrica apresentam valores menores na medida em que o tempo de detenção hidráulica cumulativo ao longo da série cresce (sinais contrários). O segundo fator mostrou a importância das algas em séries de lagoas de estabilização, pela boa correlação com a clorofila "a", e, portanto, foi interpretado como fator crescimento algal.

Ele explicou 18,87% da variância total. Por fim, temperatura foi a interpretação dada ao terceiro fator, que representou 9,89% da variância total (Figura 4.25, fator tempo de detenção hidráulica x fator temperatura). Na Figura 4.24, os fatores tempo de detenção hidráulica e crescimento algal são representados pelos eixos das abscissas e das ordenadas, respectivamente. Na Figura 4.25, o fator tempo de detenção hidráulica continua representado pelo eixo das abscissas e o eixo das ordenadas agora representa o fator temperatura.

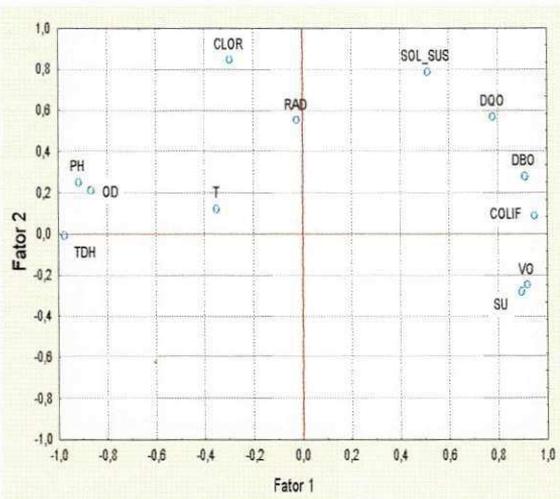


Figura 4.24 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema I, experimento 01. Fator tempo de detenção hidráulica x fator crescimento algal. Não foi aplicada nenhuma rotação.

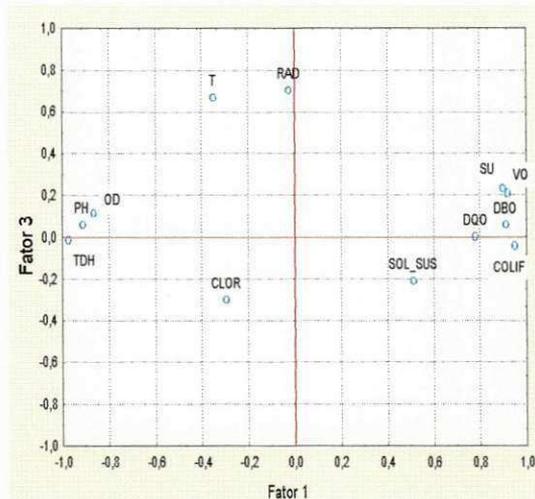


Figura 4.25 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema I, experimento 01. Fator tempo de detenção hidráulica x fator temperatura. Não foi aplicada nenhuma rotação.

Ao fim das análises para esse sistema foi possível construir um diagrama-resumo (Figura 4.26) dos fatores artificiais atuantes em cada lagoa da série. Nesse diagrama, os fatores artificiais resultantes das análises levadas a efeito para cada lagoa foram plotados em função dos seus respectivos percentuais de explicação da variância das variáveis. Além de resumir os fatores artificiais extraídos, a figura permite visualizar a evolução desses fatores ao longo da série.

O fator estabilidade do processo anaeróbio é de grande importância apenas para a lagoa anaeróbia. O fator concentração de material orgânico é característico de lagoas

que apresentam o efluente de pior qualidade quanto à remoção desse material ao longo da série (lagoas anaeróbia e facultativa secundária). Já o fator temperatura apresentou percentuais de explicação semelhantes, mas discretos, ao longo da série de lagoas.

Os resultados de maior importância foram o desenvolvimento da biomassa de algas e a evolução das condições aeróbias da massa líquida (da lagoa facultativa secundária até a de maturação terciária). Mesmo não estando explícito o fator aerobicidade na lagoa M3, o alto percentual de explicação do fator crescimento algal e as análises do diagrama de dispersão da Figura 4.23 e da medida de sua concentração da Tabela 4.1 indicam a condição aeróbia da lagoa. Com isso, é possível concluir que para o desempenho satisfatório de uma série de lagoas de estabilização é necessário que haja um dimensionamento adequado das lagoas de forma que sejam dadas condições (profundidade, tempo de detenção hidráulica e configuração geométrica) para o desenvolvimento do fitoplâncton e da aerobicidade das lagoas ao longo da série.

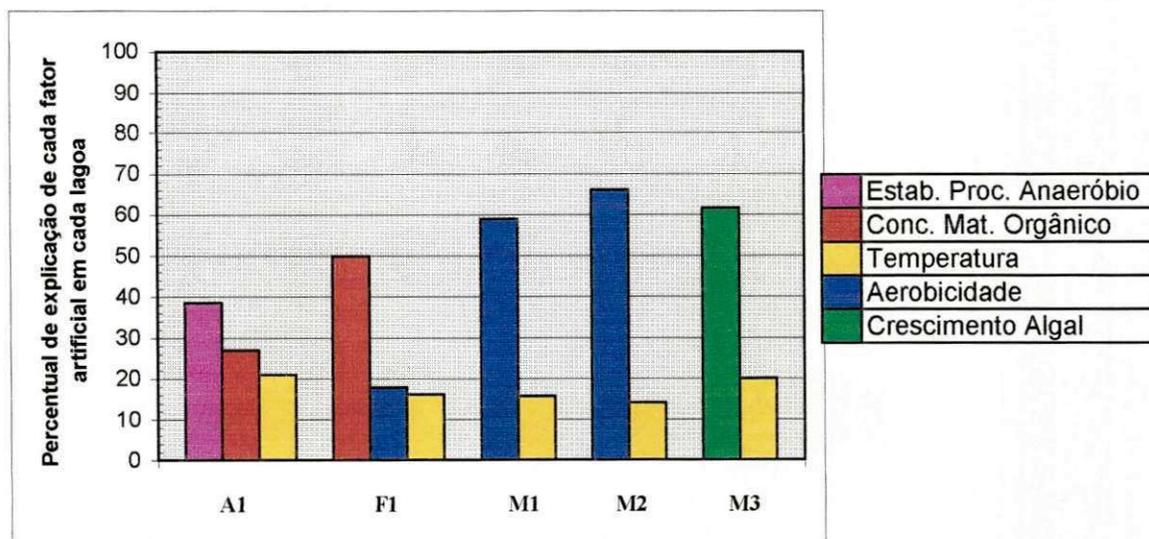


Figura 4.26 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema I, experimento 01. Os fatores artificiais e suas respectivas cores estão indicados na legenda.

Na tabela 4.4 a seguir, são resumidos os fatores artificiais obtidos nas análises para cada lagoa e para a série completa deste experimento, com seus respectivos autovalores e percentuais de explicação da variância total das variáveis.

Tabela 4.4 – Autovalores e percentual de explicação da variância das variáveis de cada fator artificial obtido neste experimento.

Lagoa	Fator extraído	Autovalor	Explicação (%)	Explicação acumulada (%)
Anaeróbia (A1)	Estabilidade do processo anaeróbio	2,69	38,39	38,39
	Concentração de material orgânico	1,89	26,94	65,33
	Temperatura	1,47	20,97	86,30
Facultativa secundária (F1)	Concentração de material orgânico	4,49	49,86	49,86
	Aerobicidade	1,61	17,92	67,78
	Temperatura	1,46	16,21	83,99
Maturação primária (M1)	Aerobicidade	5,30	58,93	58,93
	Temperatura	1,42	15,76	74,69
Maturação secundária (M2)	Aerobicidade	5,94	65,97	65,97
	Temperatura	1,27	14,13	80,10
Maturação terciária (M3)	Crescimento algal	5,53	61,50	61,50
	Temperatura	1,79	19,91	81,41
Série completa	TDH	7,67	59,01	59,01
	Crescimento algal	2,45	18,87	77,88
	Temperatura	1,29	9,89	87,77

4.2.3 - Análise fatorial do Sistema IX, experimento 01

O conjunto de dados utilizado nas análises para esse sistema e experimento abrangeu o período de janeiro a dezembro de 1986. As análises fatoriais levadas a efeito para as lagoas individuais e para a série completa explicaram de 74,89% (lagoa de maturação secundária, M8) a 82,88% (série completa) da variância total das variáveis, para três fatores artificiais extraídos.

A análise dos dados da lagoa anaeróbia (A7), explicou 80,01% da variância das variáveis, para 3 fatores extraídos. Apenas dois fatores apresentaram autovalores maiores que a unidade, o fator 1, com 2,44, e explicação de 34,86% da variância total, e o fator 2, com autovalor de 2,33 e explicação de 33,33%. O primeiro fator, a exemplo do sistema anterior, foi interpretado como estabilidade do processo anaeróbio (Figura 4.27, eixo das abscissas). O segundo fator apresentou boas correlações com a DBO₅, DQO e coliformes fecais, e pôde ser interpretado como concentração de material orgânico (Figura 4.27, eixo das ordenadas).

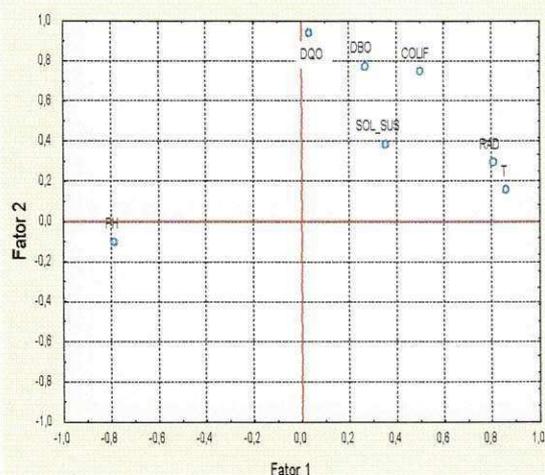


Figura 4.27 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 01). Fator estabilidade do processo anaeróbio x fator concentração de material orgânico. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Na lagoa facultativa secundária (F9), a análise fatorial recuperou 78,70% da variância das variáveis, com extração de 3 fatores artificiais. 47,38% da variância são referentes ao primeiro fator artificial, com autovalor de 4,26, e 19,97%, ao segundo fator com autovalor 1,80. Concentração de material orgânico foi a interpretação dada ao primeiro fator (Figura 4.28), devido, principalmente às correlações com a DBO₅ e coliformes fecais. O segundo, por apresentar boa correlação com a clorofila “a”, foi relacionado ao crescimento algal (Figura 4.28). O plano da Figura 4.28, onde as variáveis estão distribuídas, é definido pela concentração de material orgânico (eixo das abscissas) e crescimento algal (eixo das ordenadas).

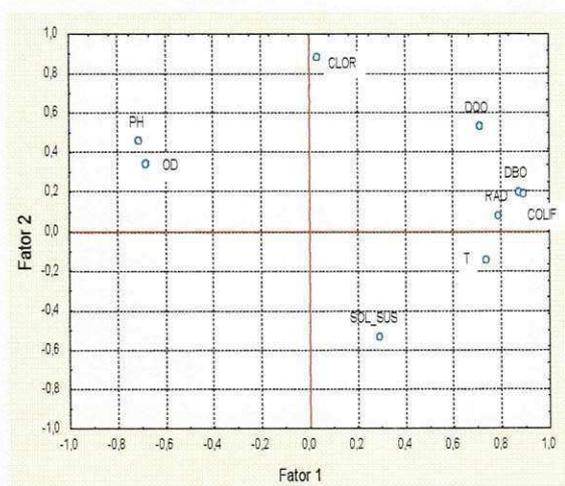


Figura 4.28 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 01). Fator concentração de material orgânico x fator crescimento algal. Não foi aplicada nenhuma rotação.

O primeiro fator resultante da análise fatorial para a lagoa de maturação primária (M7), apresentou um autovalor de 2,72, com explicação de 30,20% da variância das variáveis. Já o segundo fator apresentou um autovalor de 2,65 e explicação de 29,41%, e o terceiro, 1,68 de autovalor e 18,63% de recuperação da variância total. Assim, a análise fatorial foi capaz de explicar 78,24% da variância das variáveis. O primeiro fator (Figura 4.29) foi interpretado como crescimento algal, devido aos altos coeficientes de correlação

com a clorofila "a" e os sólidos suspensos. Este primeiro fator também apresentou boa correlação com os coliformes fecais, estes apresentando o sinal algébrico do fator de carga contrário ao da clorofila "a" e sólidos suspensos, indicando um efeito negativo do crescimento de algas sobre a concentração desses microrganismos. O segundo fator foi relacionado à temperatura, e o terceiro fator artificial foi interpretado como aerobividade (Figura 4.30). Aqui, pode ser verificada claramente a distinção entre os fatores crescimento algal e aerobividade, já que o primeiro está bem correlacionado com a clorofila "a" e o segundo com o oxigênio dissolvido. O diagrama de dispersão da Figura 4.29 foi construído com os dois primeiros fatores, crescimento algal (eixo das abscissas) e temperatura (eixo das ordenadas), e o diagrama da Figura 4.30, pelos fatores 1 e 3, ou seja, crescimento algal (no eixo das abscissas) e aerobividade (eixo das ordenadas).

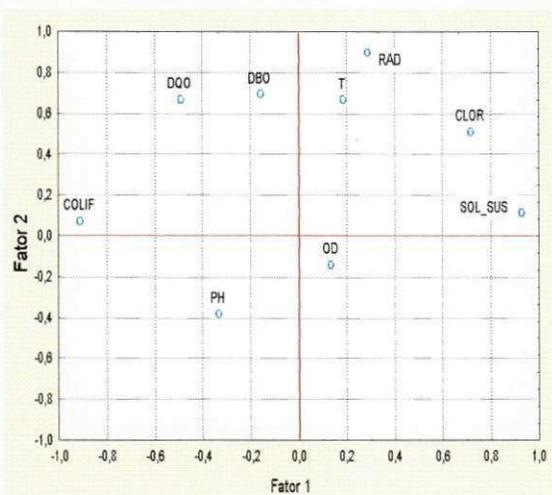


Figura 4.29 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 01). Fator crescimento algal x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

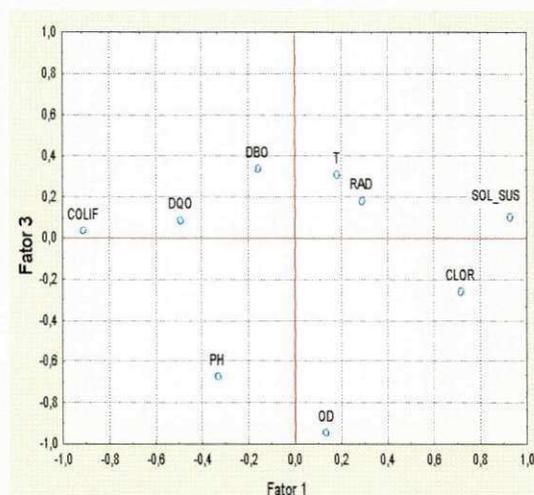


Figura 4.30 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 01). Fator crescimento algal x fator aerobividade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Os fatores aerobividade e crescimento algal também influenciaram as lagoas de maturação subsequentes da série, com maior ou menor intensidade. O primeiro fator, resultante da análise fatorial para a lagoa de maturação secundária (M8), foi interpretado como aerobividade (Figura 4.31), com autovalor de 3,33 e explicação de 37,02%, e o

segundo, como temperatura, 1,98 de autovalor e 21,98% de recuperação da variância das variáveis. Já a distribuição das variáveis ao longo do eixo das ordenadas (Figura 4.32), representativo do terceiro fator (com 15,88% de explicação e 1,43 de autovalor), indicou que apenas os sólidos suspensos apresentaram boa correlação com este fator. Esses sólidos podem indicar a presença de detritos na lagoa, como espuma, e/ou organismos maiores como microcrustáceos. Mas, sem análises adicionais, e com um conjunto de variáveis mais apropriado a esse fim, não é possível avaliar a importância desse fator para a lagoa. Além disso, a análise fatorial pode resultar em fatores artificiais que não sejam interpretáveis (Seção 2.2.2.2.1, d). Já, para a lagoa M9, os fatores aerobidade e crescimento algal (Figura 4.33) obtiveram autovalores iguais a 2,62 e percentual de explicação de 29,14% da variância total das variáveis. Essa igualdade foi devida ao arredondamento para duas casas decimais. O terceiro fator (Figura 4.34), com autovalor de 1,52 e explicação de 16,90%, também apresentou boa correlação com os sólidos suspensos e foi relacionado à presença de detritos na lagoa e/ou microcrustáceos. Assim, os 3 fatores artificiais extraídos na análise dessa lagoa explicaram 75,18% da variância total.

Com relação ao comportamento da variável coliformes fecais, as duas lagoas apresentaram resultados semelhantes. O sinal algébrico do fator de carga dos coliformes fecais é contrário ao do oxigênio dissolvido, característico do fator aerobidade, indicando o efeito nocivo das condições aeróbias da lagoa para a sobrevivência desses microrganismos. Nas Figuras 4.31 e 4.32 (referentes à lagoa M8), estão representados, respectivamente, aerobidade x temperatura e aerobidade x fator indicativo da presença de detritos ou microcrustáceos na lagoa. Já nas Figuras 4.33 e 4.34, são apresentados os fatores resultantes das análises para a lagoa M9, respectivamente, aerobidade x crescimento algal e aerobidade x fator indicativo da presença de detritos ou microcrustáceos na lagoa.

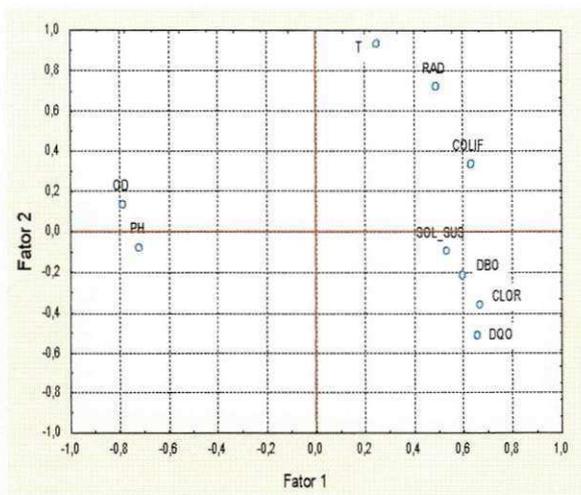


Figura 4.31 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 01). Fator aerobidade x fator temperatura. Não foi aplicada nenhuma rotação.

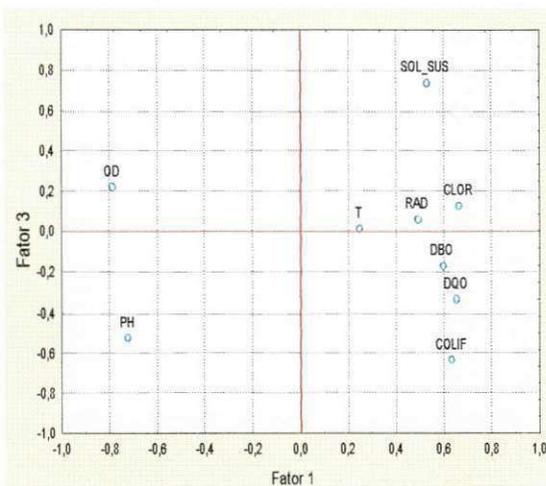


Figura 4.32 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 01). Fator aerobidade x fator indicativo de detritos ou microcrustáceos. Não foi aplicada nenhuma rotação.

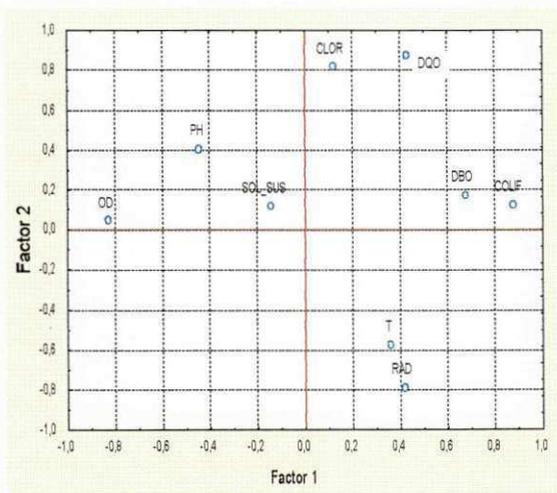


Figura 4.33 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 01). Fator aerobidade x fator crescimento algal. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

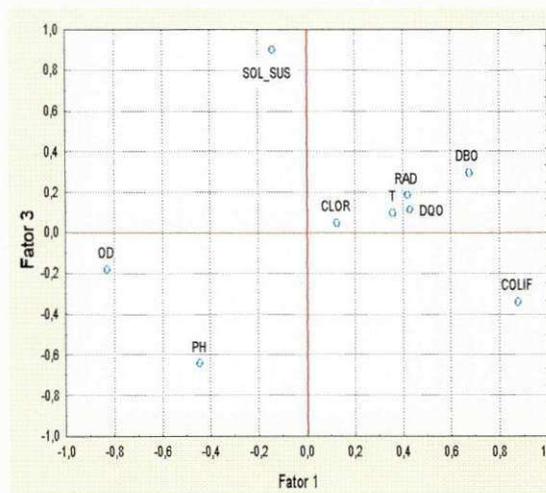


Figura 4.34 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 01). Fator aerobidade x fator indicativo de detritos ou microcrustáceos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Na análise da série de lagoas, foi aplicado o logaritmo decimal aos coliformes fecais, oxigênio dissolvido e às cargas orgânicas volumétrica e superficial, para a normalização dessas variáveis. A análise fatorial recuperou 82,89% da variância das variáveis, dos quais 57,87% (equivalente a 6,94 de autovalor) foram relativos ao primeiro fator, 16,05% ao segundo (1,93 de autovalor) e 8,97% ao terceiro (com 1,07 de autovalor). Os fatores 1 e 2 puderam ser interpretados como tempo de detenção hidráulica e temperatura, respectivamente, após analisar o diagrama de dispersão para esses fatores (Figura 4.35, fator 1, eixo das abscissas e fator 2, eixo das ordenadas). O terceiro fator foi relacionado ao crescimento algal (Figura 4.36, fator tempo de detenção hidráulica, eixo das abscissas e fator crescimento algal, eixo das ordenadas). Nesta série de lagoas profundas, contrariamente ao que ocorreu na série de lagoas rasas, a temperatura teve mais importância na caracterização geral do sistema que o crescimento algal. Novamente, o fator tempo de detenção hidráulica obteve o mais alto percentual de explicação da variância e apresentou altos fatores de carga com o tempo de detenção, oxigênio dissolvido e pH.

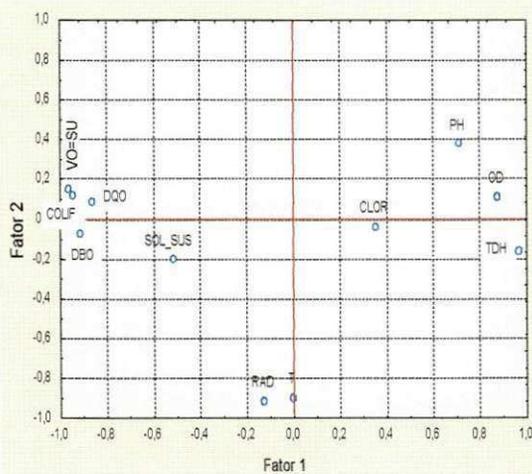


Figura 4.35 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema IX, experimento 01. Fator tempo de detenção hidráulica x temperatura. Não foi aplicada nenhuma rotação.

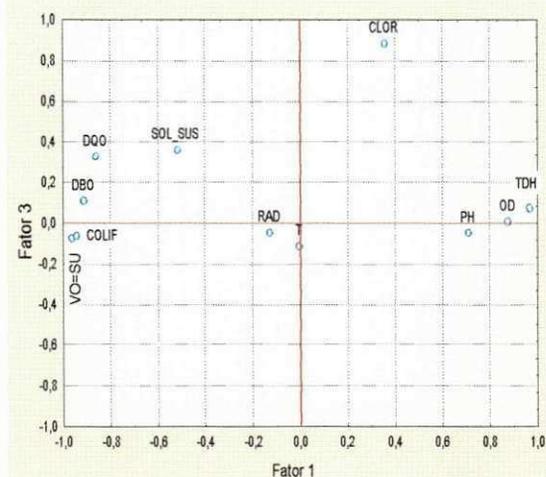


Figura 4.36 – Diagrama de dispersão das variáveis para a série completa do Sistema IX, experimento 01. Fator tempo de detenção hidráulica x crescimento algal. Não foi aplicada nenhuma rotação.

No diagrama de evolução dos fatores artificiais ao longo da série, representado na Figura 4.37, foram obtidos resultados semelhantes aos do sistema anterior: o fator estabilidade do processo anaeróbio foi exclusivo da lagoa anaeróbia; o fator concentração de material orgânico foi obtido, novamente, nas lagoas anaeróbia e facultativa secundária; e os fatores crescimento algal e aerobocidade foram predominantes ao longo da série, em conformidade com o Sistema I. Já o fator temperatura exerceu influência apenas nas lagoas M7 e M8. Assim, novamente, foi observado que a qualidade do efluente é melhorada à medida em que as condições aeróbias das lagoas são predominantes.

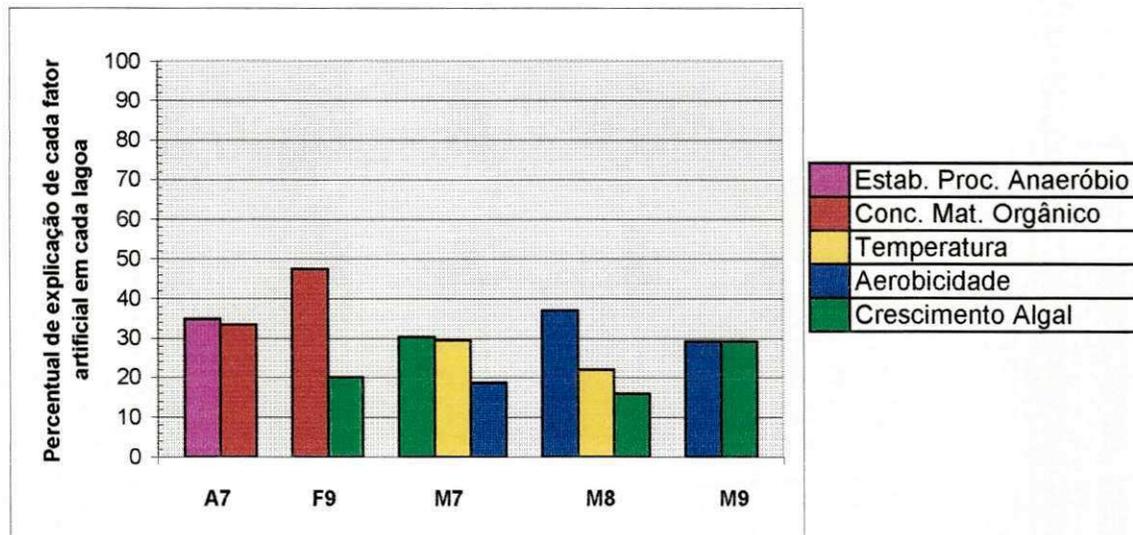


Figura 4.37 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimento 01. Os fatores artificiais e suas respectivas cores estão indicados na legenda.

Na tabela 4.5 a seguir também são resumidos os fatores artificiais obtidos para cada lagoa e para a série completa deste experimento, com seus respectivos autovalores e percentuais de explicação da variância total das variáveis.

Tabela 4.5 – Autovalores e percentual de explicação da variância das variáveis de cada fator artificial obtido neste experimento.

Lagoa	Fator extraído	Autovalor	Explicação (%)	Explicação acumulada (%)
Anaeróbia (A7)	Estabilidade do processo anaeróbio	2,44	34,86	34,86
	Concentração de material orgânico	2,33	33,33	68,19
Facultativa secundária (F9)	Concentração de material orgânico	4,26	47,38	47,38
	Crescimento algal	1,80	19,97	67,35
Maturação primária (M7)	Crescimento algal	2,72	30,20	30,20
	Temperatura	2,65	29,41	59,61
	Aerobicidade	1,68	18,63	78,24
Maturação secundária (M8)	Aerobicidade	3,33	37,02	37,02
	Temperatura	1,98	21,98	59,00
	Indicativo de detritos	1,43	15,88	74,88
Maturação terciária (M9)	Aerobicidade	2,62	29,14	29,14
	Crescimento algal	2,62	29,14	58,28
	Indicativo de detritos	1,52	16,90	75,18
Série completa	TDH	6,94	57,87	57,87
	Temperatura	1,93	16,05	73,92
	Crescimento algal	1,07	8,97	82,89

4.2.4 - Análise Fatorial do Sistema IX, Experimento 02

Nesta análise, as médias mensais dos dados brutos das variáveis empregadas são referentes ao período de janeiro a dezembro de 1987. As explicações resultantes da análise de todas as lagoas individuais e da série completa variaram de 74,09% (lagoa de maturação primária, M7) a 87,15% (série completa) da variância total. Os autovalores e os percentuais de explicação de cada fator artificial extraído nas diversas análises levadas a efeito para este sistema e experimento estão resumidas na Tabela 4.6.

O primeiro fator extraído, na análise fatorial para a lagoa anaeróbia (A7), foi interpretado como concentração de material orgânico, devido às boas correlações que este fator apresentou com DBO₅, DQO e sólidos suspensos (Figura 4.38). O segundo fator foi interpretado como fator estabilidade do processo anaeróbio, e o terceiro, como fator temperatura. Na Figura 4.39, os fatores concentração de material orgânico e temperatura são representados pelos eixos das abscissas e das ordenadas, respectivamente.

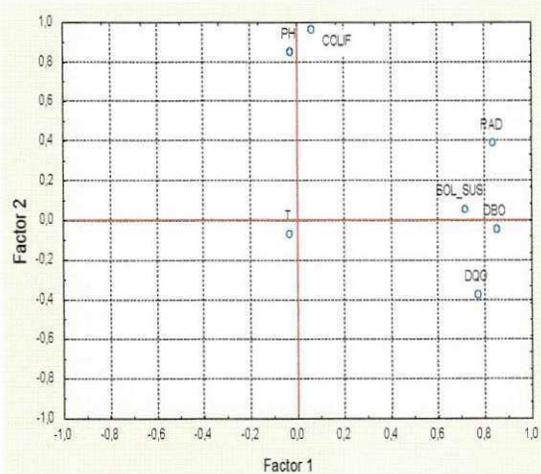


Figura 4.38 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 02). Fator concentração de material orgânico x fator estabilidade do processo anaeróbio. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

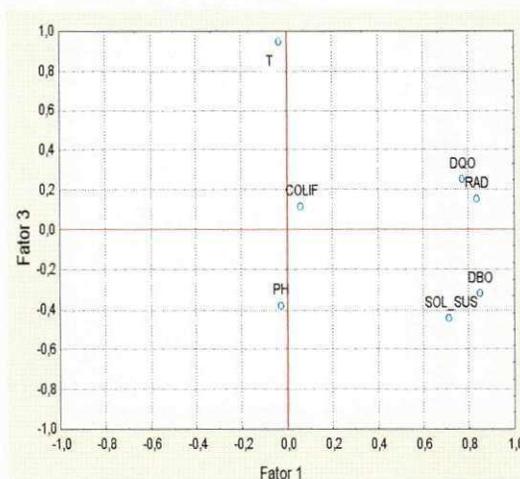


Figura 4.39 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa A7 (Sistema IX, experimento 02). Fator concentração de material orgânico x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Tabela 4.6 – Resumo dos autovalores e percentuais de explicação da variância das variáveis das lagoas e série completa do Sistema IX, experimento 02.

Lagoa	Fator extraído	Autovalor	Explicação (%)	Explicação acumulada (%)
Anaeróbia (A7)	Concentração de material orgânico	2,52	36,04	36,04
	Estabilidade do processo anaeróbio	1,97	28,13	64,17
	Temperatura	1,44	20,61	84,78
Facultativa secundária (F9)	Temperatura	2,59	28,81	28,81
	Aerobicidade	2,52	28,04	56,85
	Crescimento algal	2,02	22,40	79,25
Maturação primária (M7)	Crescimento algal	2,51	27,93	27,93
	Temperatura	2,25	25,07	53,00
	Aerobicidade	1,90	21,09	74,09
Maturação secundária (M8)	Concentração de material orgânico	2,97	33,03	33,03
	Temperatura	2,47	27,47	60,50
	Aerobicidade	1,93	21,39	81,89
Maturação terciária (M9)	Crescimento algal	3,20	35,60	35,60
	Aerobicidade	2,61	29,01	64,61
	Indicativo de detritos	1,86	20,64	85,25
Série completa	Tempo de detenção hidráulica	7,89	65,72	65,72
	Temperatura (temperatura)	1,33	11,11	76,83
	Temperatura (radiação solar)	1,24	10,31	87,14

Para a lagoa F9, o primeiro fator artificial resultante da análise fatorial foi interpretado como fator temperatura. O segundo fator, relacionado à aerobividade, é representado pelo eixo das ordenadas no diagrama de dispersão da Figura 4.40. Nesta mesma figura, o eixo das abscissas reflete o fator temperatura. O terceiro fator, interpretado como crescimento algal, demonstra a relação conjunta da radiação solar e clorofila "a" para o desenvolvimento da atividade fotossintética (Figura 4.41). A independência do fator aerobividade, definido pelo oxigênio dissolvido, e crescimento algal, relacionado com clorofila "a" e radiação solar, ratifica as análises do experimento anterior, caracterizando a independência desses dois fatores em lagoas profundas.

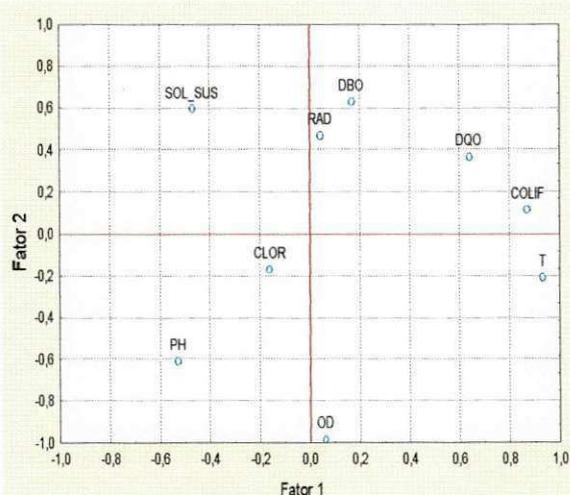


Figura 4.40 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 02). Fator temperatura x fator aerobividade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

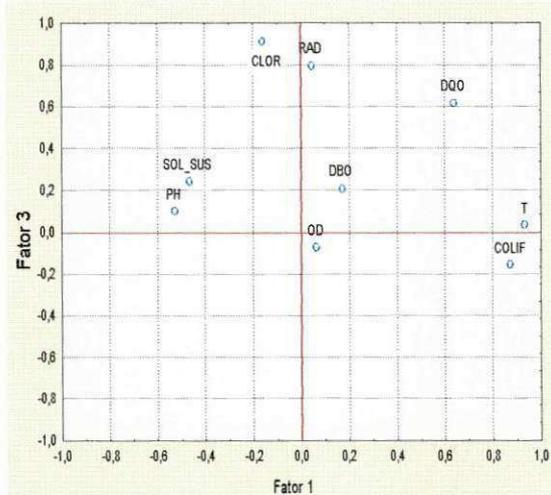


Figura 4.41 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa F9 (Sistema IX, experimento 02). Fator temperatura x fator crescimento algal. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

A análise fatorial para a lagoa de maturação primária (M7) resultou na extração de 3 fatores artificiais. O primeiro fator apresentou boas correlações com a clorofila "a", DQO e sólidos suspensos, sendo, portanto, interpretado como crescimento algal. O segundo fator foi relacionado à temperatura e o terceiro à aerobividade. Na Figura 4.42, o fator crescimento algal é representado pelo eixo das abscissas e o fator temperatura, pelo

eixo das ordenadas. Ao analisar o fator aerobidade (Figura 4.43, fator crescimento algal x aerobidade), é percebida a influência negativa das condições aeróbias sobre o comportamento dos coliformes fecais.

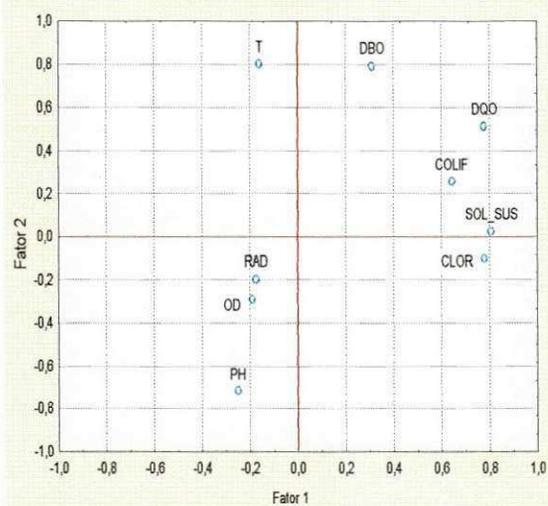


Figura 4.42 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 02). Fator crescimento algal x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

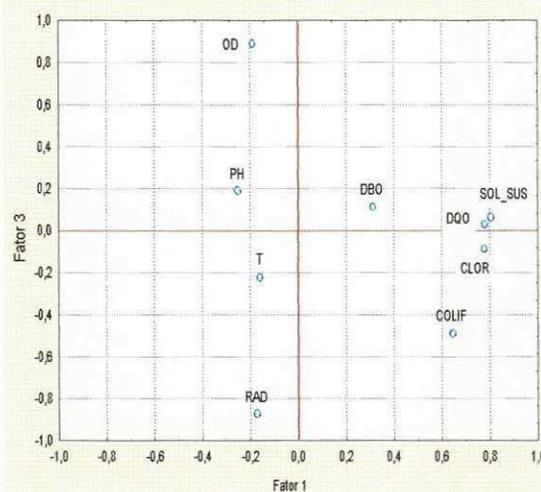


Figura 4.43 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M7 (Sistema IX, experimento 02). Fator crescimento algal x fator aerobidade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Para a lagoa M8, o primeiro fator artificial extraído foi interpretado como concentração de material orgânico, devido às boas correlações com DBO₅, DQO e sólidos suspensos. O segundo fator foi relacionado com a temperatura, além de coliformes fecais e clorofila "a". Esse fator foi interpretado como crescimento algal, e demonstrou a oposição entre a biomassa de algas, que pode contribuir para elevar a concentração de oxigênio dissolvido na massa líquida, e os coliformes fecais (Figura 4.44). O fator aerobidade (terceiro fator extraído) foi influenciado pelo oxigênio dissolvido e pH (Figura 4.45).

O primeiro fator, resultante da análise fatorial para a lagoa de maturação terciária (M9), foi interpretado como crescimento algal (Figura 4.46), o segundo, como aerobidade e o terceiro, indicou presença de detritos e/ou microcrustáceos. Este terceiro fator (Figura 4.47) também foi observado nas análises para as lagoas de maturação

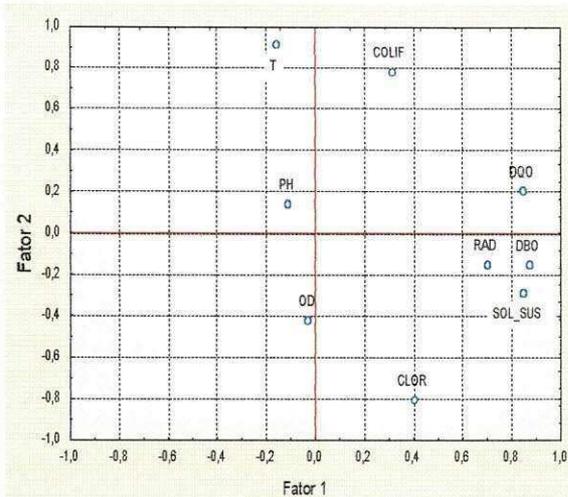


Figura 4.44 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 02). Fator concentração de material orgânico x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

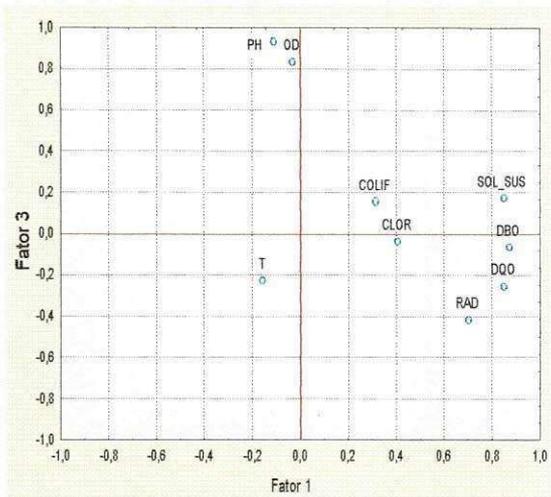


Figura 4.45 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M8 (Sistema IX, experimento 02). Fator concentração de material orgânico x fator aerobicidade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

secundária e terciária do experimento anterior. No presente trabalho, não houve preocupação em sua interpretação, mas pesquisas posteriores podem ser conduzidas, para avaliar a real influência deste fator em lagoas de maturação profundas ou se este resultado foi devido ao método de coleta empregado, uma vez que o efluente para análise era coletado da canalização de saída do reator e esta pode apresentar algum material aderido às suas paredes internas. Mais uma vez, as variáveis oxigênio dissolvido e coliformes fecais apresentaram comportamento de oposição com relação ao mesmo fator (Figura 4.46).

Na análise para a série completa, foram aplicados o logaritmo decimal a DBO_5 , coliformes fecais e às cargas orgânicas volumétrica e superficial, e o logaritmo decimal de $(x+1)$ ao oxigênio dissolvido. O primeiro fator pôde ser interpretado como tempo de detenção hidráulica (Figura 4.48). O segundo e terceiro fatores, obtiveram boas correlações com a temperatura e radiação solar, respectivamente. Estes últimos dois fatores referem-se à influência da temperatura na velocidade das reações bioquímicas e da radiação solar no desenvolvimento da atividade fotossintética, e conseqüentemente, da biomassa algal. Na Figura 4.48, é visualizado o diagrama de dispersão formado pelo tempo de detenção

hidráulica e temperatura, e na Figura 4.49, o fator tempo de detenção hidráulica define um plano com a radiação solar.

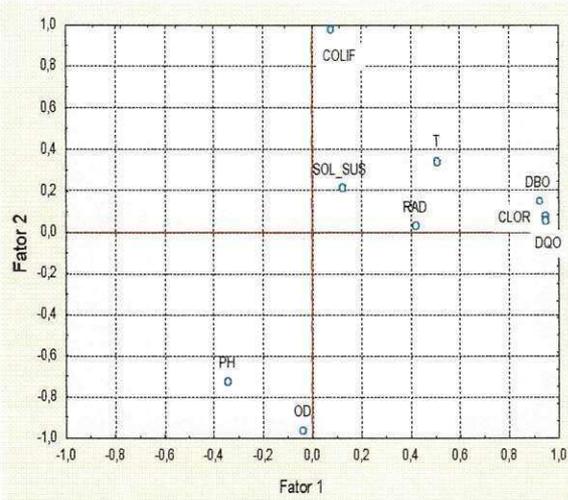


Figura 4.46 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 02). Fator crescimento algal x fator aerobicidade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

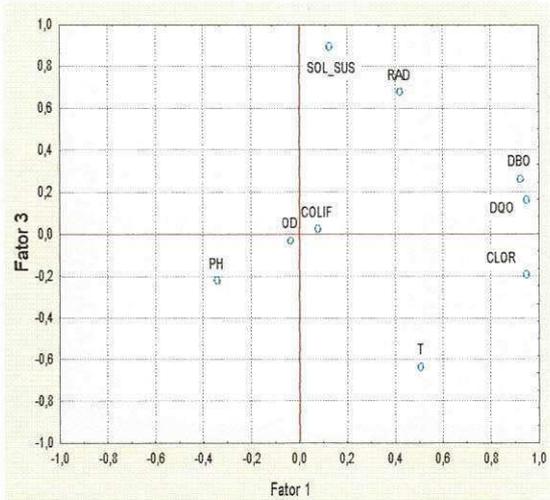


Figura 4.47 – Diagrama de dispersão das variáveis da lagoa M9 (Sistema IX, experimento 02). Fator crescimento algal x fator indicativo de detritos ou microcrustáceos. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

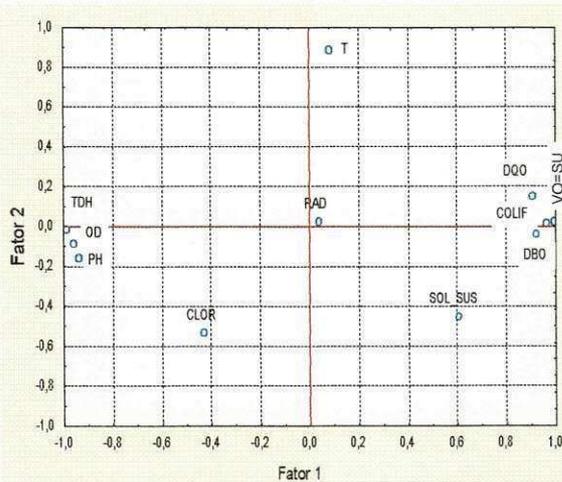


Figura 4.48 – Diagrama de dispersão das variáveis da série completa do Sistema IX, experimento 02. Fator tempo de detenção hidráulica x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

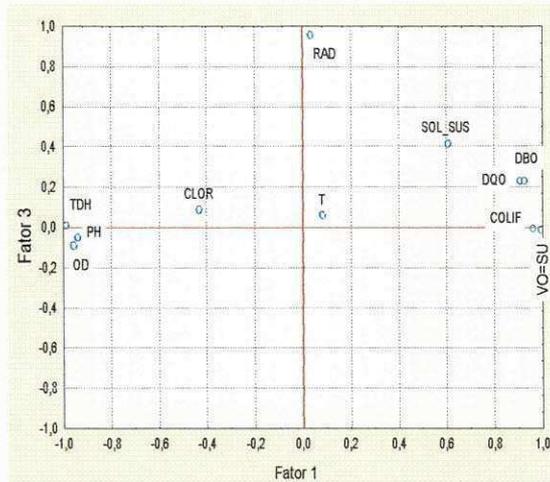


Figura 4.49 – Diagrama de dispersão das variáveis da série completa do Sistema IX, experimento 02. Fator tempo de detenção hidráulica x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

A Figura 4.50, representativa da evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas, foi semelhante às anteriores. Uma diferença importante foi a interpretação do fator concentração de material orgânico na análise levada a efeito com os dados da lagoa de maturação secundária. Mas, esse resultado exprime uma relação no comportamento das variáveis clorofila “a”, sólidos suspensos, DBO₅ e DQO, como pode ser observado na Figura 4.45 (eixo das abscissas) e na Tabela 4.1, onde há uma diminuição da concentração dessas variáveis da lagoa M7 para M8.

Com os três diagramas de evolução dos fatores artificiais é possível afirmar que o fator tempo de detenção hidráulica, apesar de apresentar os maiores percentuais de explicação da variância não é o fator determinante na eficiência de uma série de lagoas de estabilização. É a evolução dos fatores crescimento algal e aerobicidade ao longo da série, através de uma estimativa correta do tempo de detenção hidráulica acumulado, responsável pela eficiência do sistema no tratamento de águas residuárias. Isso quer dizer que se não for adotado um tempo de detenção hidráulica que permita o desenvolvimento da comunidade algal, e por conseguinte, das condições de aerobiose da lagoa, o efluente do sistema não será de boa qualidade.

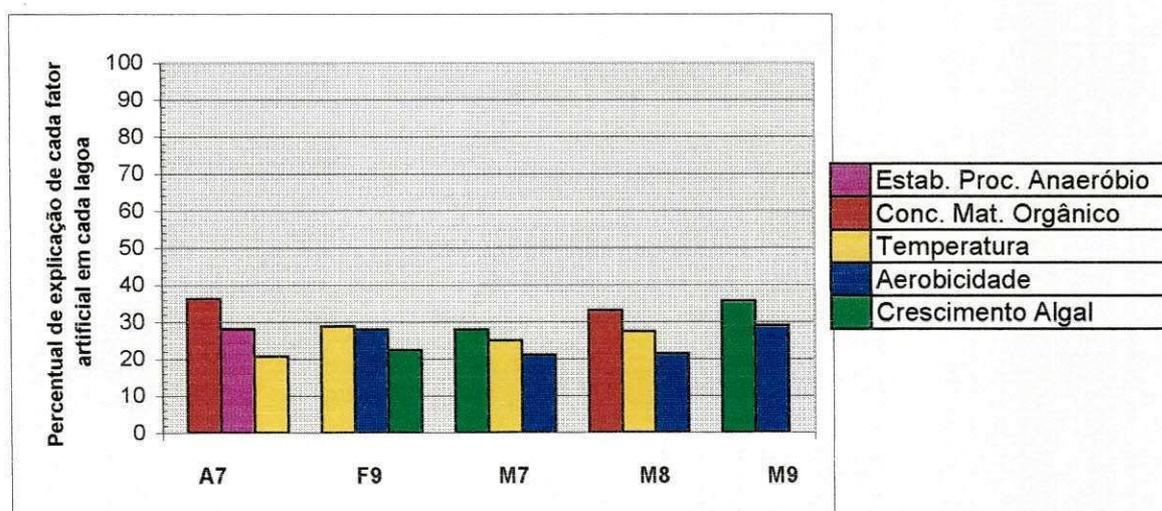


Figura 4.50 – Evolução dos fatores artificiais ao longo da série de lagoas de estabilização do Sistema IX, experimento 02. Os fatores artificiais e suas respectivas cores estão indicados na legenda.

P4.3 - Análise conjunta dos dados de diversos sistemas e experimentos

Após as análises fatoriais levadas a efeito, individualmente (cada lagoa e a série completa), em cada experimento, novas análises foram efetuadas com conjuntos maiores de dados. Isso objetivou, verificar se os resultados obtidos com as análises para as lagoas individuais e para as séries completas de cada experimento seriam ratificados, bem como verificar as relações entre variáveis que não puderam ser observadas em análises para lagoas isoladas. Um exemplo é a relação entre clorofila “a” e profundidade das lagoas facultativas secundárias e de maturação.

Assim, em um primeiro momento, novas matrizes foram formadas pela reunião de conjuntos de dados das diferentes séries de lagoas dos diversos experimentos. Em uma análise, foi utilizado um conjunto de dados formado pela reunião das séries dos experimentos 01 e 02 do Sistema IX. Em seguida, outra matriz de dados foi construída com as séries dos primeiros experimentos de cada sistema e, por fim, uma terceira matriz, com os dados das séries dos três experimentos. Em todas essas análises, foi empregado o mesmo conjunto (conjunto maior) de variáveis utilizado nas análises das séries completas de cada experimento. A variável tempo de detenção hidráulica, aqui empregada, foi o tempo de detenção cumulativo ao longo das lagoas da série.

Em um segundo momento, foram reunidos em matrizes os dados de todas as 3 lagoas anaeróbias do presente trabalho. Para tal, foi utilizado o mesmo conjunto de variáveis usado nas análises para as lagoas individuais dos diversos experimentos (clorofila “a”, DBO₅, DQO, coliformes fecais, pH, sólidos suspensos, oxigênio dissolvido, temperatura e radiação solar), sendo este conjunto de variáveis denominado de conjunto menor. O mesmo procedimento foi adotado para as lagoas facultativas secundárias, de maturação primárias, secundárias e terciárias dos 3 experimentos. Após essas análises, as variáveis tempo de detenção hidráulica, cargas orgânicas superficial e volumétrica e

profundidade foram adicionadas ao conjunto menor de dados, formando, assim, o conjunto maior, e novas análises foram efetuadas. Para essas análises, com lagoas de mesmo tipo, a variável tempo de detenção hidráulica foi o tempo de detenção individual de cada lagoa (TDH_i). A mesma metodologia (TDH_i e divisão em conjuntos maiores e menores de variáveis) foi adotada para a aplicação da análise fatorial às 3 lagoas de maturação em série de cada experimento e, posteriormente, a todas as lagoas de maturação de todos os experimentos, reunidos em uma grande matriz.

Em todos os conjuntos de lagoas foi verificada a distribuição de frequências de cada variável e transformações foram aplicadas na tentativa de normalizar as variáveis que não apresentavam distribuição normal. Em alguns casos, a normalização não foi conseguida; mesmo assim, a análise foi efetuada. A seguir são descritos, de forma resumida, os resultados obtidos nessas análises.

4.3.1 - Sistema IX, experimentos 01 e 02

As diversas variáveis constituintes dessa matriz foram, inicialmente, submetidas ao critério de Kolmogorov-Smirnov para a verificação da normalidade. Apenas clorofila "a", DQO, pH e sólidos suspensos apresentaram distribuição normal. Das outras variáveis, DBO_5 , coliformes fecais e tempo de detenção hidráulica puderam ser normalizadas. O logaritmo decimal foi a transformação aplicada às duas primeiras variáveis e a raiz quadrada foi aplicada à terceira.

A análise fatorial resultou em apenas 2 fatores artificiais com autovalores maiores que a unidade. A extração de 3 fatores explicou 83,64% da variância total. O primeiro fator, responsável pela explicação de 60,82%, e autovalor de 7,30, foi interpretado como tempo de detenção hidráulica (ver diagrama de dispersão na Figura 4.51). Como nas análises anteriores, o fator tempo de detenção hidráulica apresentou o mais alto percentual de explicação da variância das variáveis e, devido às boas correlações

com oxigênio dissolvido e pH, indicou a importância da evolução das condições aeróbias ao longo de séries de lagoas. Pela observação da Figura 4.51, pode, também, ser verificada a influência desse fator nas outras variáveis, positiva com clorofila “a”, e negativa com DBO₅, DQO, coliformes fecais, sólidos suspensos e as cargas orgânicas superficial e volumétrica. O segundo fator obteve boas correlações com a radiação solar e temperatura, e foi denominado de temperatura (15,02% de explicação da variância das variáveis e autovalor de 1,80).

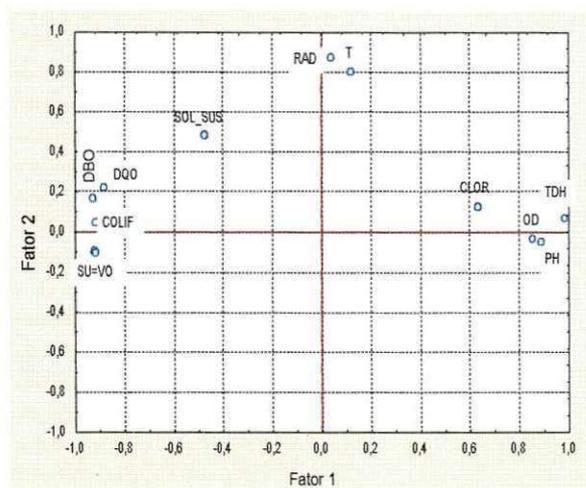


Figura 4.51 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados do Sistema IX, experimentos 01 e 02. Fator tempo de detenção hidráulica x fator temperatura. Foi aplicada a rotação varimax normalizada.

4.3.2 - Sistemas I e IX, experimento 01

Aplicando o critério de Kolmogorov-Smirnov, foi verificado ajuste da distribuição normal aos dados de DQO, pH, temperatura e tempo de detenção hidráulica, além da DBO₅, coliformes fecais e sólidos suspensos, estes após a aplicação da transformação logaritmo decimal.

Com a extração de 3 fatores artificiais, a análise fatorial resultou em uma explicação de 82,86% da variância das variáveis. O primeiro fator artificial extraído foi interpretado como tempo de detenção hidráulica, com 51,71% de explicação da variância

total e autovalor de 6,72. O segundo fator artificial obteve boas correlações com a clorofila "a" e profundidade, sugerindo uma interpretação de crescimento algal (autovalor de 2,52 e 19,36% de explicação da variância total). Os sinais algébricos contrários das correlações desse segundo fator com profundidade e clorofila "a", indica que lagoas mais profundas apresentam, em sua massa líquida, menor concentração de algas. O terceiro fator, interpretado como temperatura, apresentou boas correlações com as variáveis temperatura e radiação solar (11,79% de explicação e autovalor de 1,53).

Na Figura 4.52, é apresentado o diagrama de dispersão para os dois fatores artificiais que apresentaram os maiores autovalores, fator tempo de detenção hidráulica (eixo das abscissas) e crescimento algal (eixo das ordenadas).

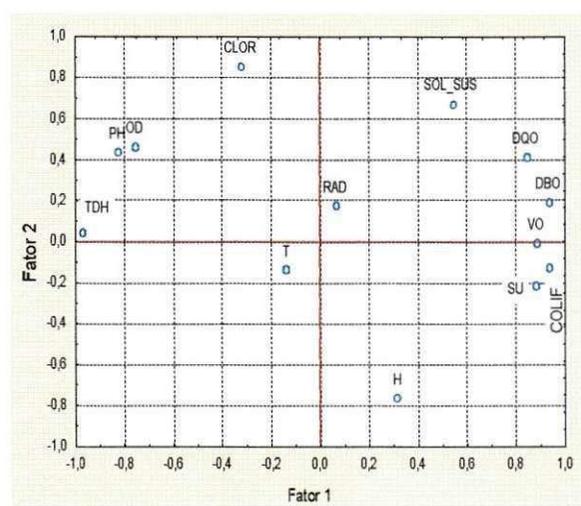


Figura 4.52 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados dos Sistemas I e IX, experimento 01. Fator tempo de detenção hidráulica x fator crescimento algal. Foi aplicada a rotação quartimax bruta.

4.3.3 - Sistema I, experimento 01 e Sistema IX, experimentos 01 e 02

As variáveis DBO₅, DQO e sólidos suspensos, após a transformação dos dados de média mensal pelo logaritmo decimal, apresentaram distribuição normal, que também foi verificada para os dados de pH e tempo de detenção hidráulica. O critério adotado para

essa verificação foi o de Kolmogorov-Smirnov, não tendo sido possível normalizar as outras variáveis.

A análise fatorial foi capaz de explicar 75,43% da variância das variáveis, distribuídas em três fatores artificiais. O primeiro, responsável pela explicação de 46,23% da variância total e autovalor de 6,01, foi interpretado como fator tempo de detenção hidráulica (Figura 4.53, eixo das abscissas). O segundo fator demonstrou boas correlações com as mesmas variáveis da análise anterior (clorofila "a" e profundidade), e foi, novamente, interpretado como crescimento algal (16,99% de explicação e autovalor de 2,21). Este fator, está representado na Figura 4.53, no eixo das ordenadas. O terceiro fator foi relacionado à temperatura (autovalor de 1,59 e explicação de 12,21% da variância total).

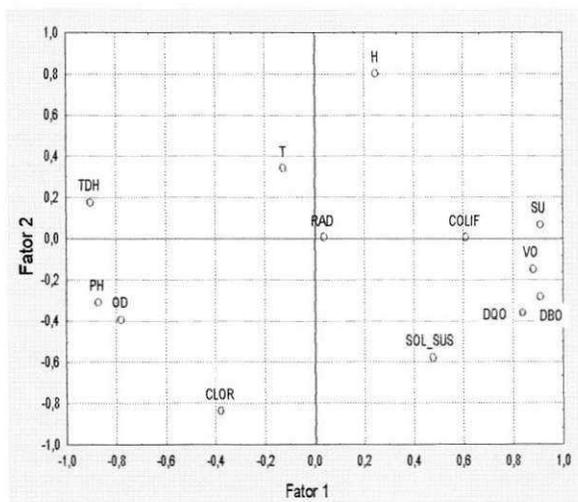


Figura 4.53 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de dados dos Sistemas I e IX, experimentos 01 e 02. Fator tempo de detenção hidráulica x fator crescimento algal. Não foi aplicada nenhuma rotação.

Em todas as três análises anteriores, as variáveis tempo de detenção hidráulica, oxigênio dissolvido e pH apresentaram boas correlações com o mesmo fator artificial, de maneira semelhante às análises para as séries completas. Estes resultados indicam a necessidade de projetar séries de lagoas de modo a promover uma aerobicidade crescente

ao longo de suas unidades, através da adoção de combinações adequadas de características físicas e operacionais, especialmente com relação à profundidade, ao tempo de detenção hidráulica e às cargas orgânicas.

4.3.4 – Lagoas anaeróbias, facultativas secundárias e de maturação

Para as análises levadas a efeito com o conjunto menor de variáveis, os fatores artificiais extraídos foram bastante semelhantes àqueles obtidos nas análises das lagoas individuais dos 3 experimentos, como pode ser observado na Tabela 4.7. Como os fatores artificiais extraídos nas análises para as lagoas de maturação primária, secundária e terciária obtiveram a mesma interpretação, na Tabela 4.7 é feita referência a essas lagoas, genericamente, como lagoas de maturação. A diferença encontrada entre esta análise e as anteriores, para lagoas individuais, foi a maior importância do fator concentração de material orgânico em detrimento do fator crescimento algal nas lagoas de maturação, uma vez que a clorofila “a” apresentou boa correlação com o fator aerobicidade, não permitindo, assim, a caracterização do fator crescimento algal. Mas, é válido observar que crescimento da biomassa de algas também é refletido nas variáveis medidoras de matéria orgânica, ou seja, é possível que o fator concentração de material orgânico indique indiretamente o desenvolvimento da comunidade algal. Dada a grande semelhança desses resultados com os das análises de lagoas individuais, não é apresentado nenhum diagrama de dispersão para estas análises. Os percentuais de explicação da variância das variáveis resultantes da análise fatorial também são indicados na Tabela 4.7. Para as lagoas de maturação é apresentada a faixa de variação desse percentual, resumindo o resultado das análises para as lagoas primária, secundária e terciária.

Também na Tabela 4.7, podem ser observados os resultados obtidos para as análises com o conjunto maior de variáveis. Esses resultados também foram semelhantes aos das lagoas individuais. Por permitir uma melhor visualização da interação entre as

diversas variáveis analisadas, os diagramas de dispersão para as análises com o conjunto maior são apresentados a seguir.

Tabela 4.7 – Fatores artificiais extraídos em análises levadas a efeito para conjuntos de lagoas anaeróbias, facultativas secundárias e de maturação primária, secundária e terciária.

Lagoas	Fatores artificiais	
Lagoas anaeróbias	Conjunto menor (67,88%)	Concentração de material orgânico (30,46%) Temperatura (21,73%) Estabilidade do processo anaeróbio (15,69%)
	Conjunto maior (67,70%)	TDH (27,31%) Profundidade (21,01%) Concentração de material orgânico (19,38%)
Lagoas facultativas secundárias	Conjunto menor (78,97%)	Concentração de material orgânico (31,95%) Aerobicidade (29,13%) Temperatura (17,89%)
	Conjunto maior (79,30%)	Crescimento algal (39,49%) TDH (24,76%) Temperatura (15,05%)
Lagoas de maturação	Conjunto menor (%) (78,03 - 82,89)	Aerobicidade (35,40 - 39,43%) Conc. de material orgânico (21,23 - 29,53%) Temperatura (15,91 - 17,95%)
	Conjunto maior (%) (77,88 - 79,59)	Aerobicidade (35,07 - 37,80%) TDH (23,23 - 24,47%) Conc. de material orgânico (16,84 - 21,16%)

Um fator associado à profundidade apresentou relativa importância na caracterização das lagoas anaeróbias. Este fator não foi comentado anteriormente, pois, foi um resultado único em todas as análises levadas a efeito neste trabalho. Mesmo assim, é um resultado coerente, pois a profundidade é um fator importante no projeto de lagoas anaeróbias, para permitir a manutenção da ausência de oxigênio dissolvido em toda a massa líquida da lagoa. Na Figura 4.54, a seguir, são representados os dois fatores artificiais de maiores explicações da variância das variáveis das lagoas anaeróbias. O fator tempo de detenção hidráulica é representado pelo eixo das abscissas, enquanto o fator relacionado à profundidade é definido pelo eixo das ordenadas.

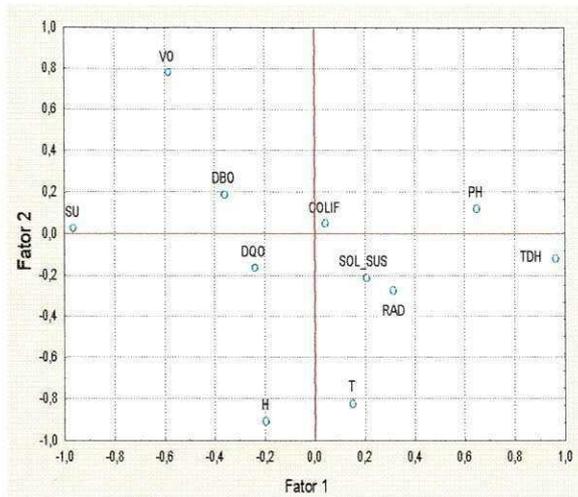


Figura 4.54 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas anaeróbias. Fator tempo de detenção hidráulica x fator associado à profundidade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

Como resultado da análise fatorial para as lagoas facultativas secundárias, é apresentado o diagrama de dispersão da Figura 4.55. No eixo das abscissas (fator crescimento algal), é observada a oposição entre coliformes fecais e clorofila “a” e entre variáveis características da fotossíntese (clorofila “a”, oxigênio dissolvido e pH) e a profundidade. Esse resultado indica que, na medida em que são projetadas lagoas mais profundas o efluente do sistema tende a apresentar biomassa de algas, concentração de oxigênio dissolvido e pH menores. Já no eixo das ordenadas, é observada a oposição entre o tempo de detenção hidráulica e coliformes fecais. Outro resultado importante dessa análise é a maior explicação obtida pelo fator crescimento algal que pelo fator tempo de detenção hidráulica. Ao observar os diagramas de dispersão das análises para as séries completas dos Sistemas I e IX e para os conjuntos de séries, foi verificado que as variáveis oxigênio dissolvido, pH e tempo de detenção (TDH_a) apresentam altíssimas correlações com o mesmo fator (Seção 4.4.3). Já nas análises com conjuntos de lagoas de mesma classificação, caracterizadas pelo tempo de detenção hidráulica não acumulado (TDH_i), as variáveis oxigênio dissolvido e pH obtiveram boas correlações com um fator ortogonal ao

fator correlacionado à variável tempo de detenção hidráulica. Portanto, a distribuição das variáveis com o fator tempo de detenção hidráulica (definido pela variável TDH_a), indicou um comportamento paralelo entre este fator e a evolução das condições aeróbias da série.

Nas análises para as lagoas de mesma classificação ficou indicado que o tempo de detenção não acumulado (TDH_i) realmente contribui no processo de degradação da matéria orgânica, devendo ser adotado, em projeto, um valor que, de acordo com a carga orgânica, seja suficiente para promover as condições ambientais ótimas características de cada tipo de lagoa, permitindo, assim, alcançar um eficiente desempenho operacional. É válido salientar que outras variáveis físicas das lagoas, como profundidade e configuração geométrica, devem ser avaliadas, pois também contribuem para o desenvolvimento das condições ambientais ideais para o funcionamento de lagoas de estabilização. Tais características físicas ideais variam de acordo com cada tipo de lagoa. Por exemplo, uma maior profundidade deve ser adotada para lagoas anaeróbias e, para lagoas de maturação, é recomendável a adoção de profundidades menores. Já com relação à configuração geométrica do sistema, a literatura deixa claro que o melhor desempenho de uma série de lagoas de estabilização é obtido quando o regime hidráulico se aproxima do fluxo pistão (através do projeto de séries de lagoas).

Resultados semelhantes aos citados para as lagoas facultativas secundárias foram obtidos para as lagoas de maturação (Figura 4.56): a relação inversa do fator aerobicidade em relação às variáveis características da fotossíntese (oxigênio dissolvido, pH e clorofila "a") e profundidade e coliformes fecais (eixo das abscissas). A Figura 4.56, obtida na análise das lagoas de maturação primárias, também descreve o comportamento das lagoas de maturação secundárias e terciárias, pois os resultados foram semelhantes. O fator aerobicidade caracteriza as lagoas de maturação quanto à presença qualitativa de oxigênio dissolvido.

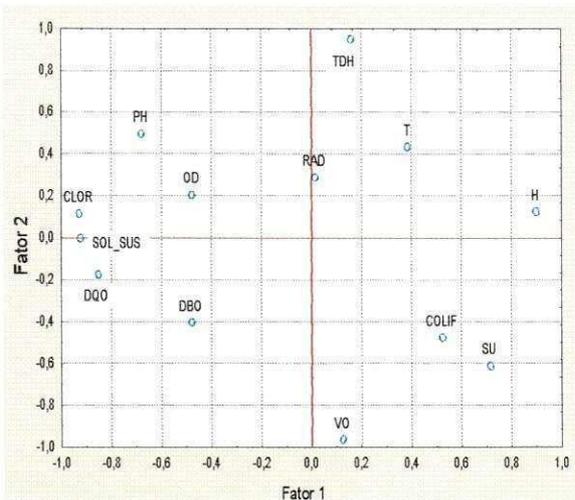


Figura 4.55 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas facultativas secundárias. Fator crescimento algal x fator tempo de detenção hidráulica. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

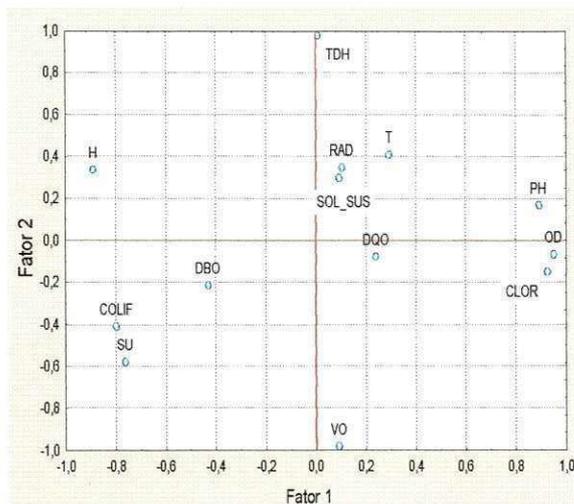


Figura 4.56 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto das lagoas de maturação primária. Fator aerobividade x fator tempo de detenção hidráulica. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

4.3.5 – Conjunto de séries de lagoas de maturação

Para as análises dos conjuntos de séries de lagoas de maturação, foram formadas matrizes que reuniram os dados (conjuntos maior e menor de variáveis) das três lagoas em seqüência, de acordo com cada sistema e experimento. Por fim, mais uma análise foi levada a efeito com uma matriz formada com os dados (conjuntos maior e menor de variáveis) de todas as lagoas de maturação. Os fatores artificiais extraídos nessas análises estão resumidos na Tabela 4.8.

Devido à semelhança dos resultados com as análises já realizadas, apenas a análise fatorial levada a efeito para o conjunto de todas as lagoas de maturação, com o conjunto maior de variáveis, é comentada a seguir.

Nesta análise, foram extraídos 3 fatores artificiais. O primeiro, foi o fator tempo de detenção hidráulica (27,14% de explicação da variância das variáveis), o segundo, fator aerobividade (27,04%) e o terceiro, concentração de material orgânico (20,21%). Esses fatores podem ser visualizados nas Figuras 4.57 (tempo de detenção

hidráulica x aerobicidade) e 4.58 (tempo de detenção hidráulica x fator concentração de material orgânico).

Na Figura 4.57, é possível observar o comportamento da clorofila “a”, oxigênio dissolvido e profundidade da lagoa com relação ao fator aerobicidade e a distribuição oposta ao longo do fator tempo de detenção hidráulica das variáveis TDH_i e coliformes fecais. Vale salientar que, novamente, o fator tempo de detenção hidráulica, cujos valores de TDH não foram acumulados, resultou independente do fator aerobicidade. Resultados semelhantes também podem ser visualizados na Figura 4.55.

Tabela 4.8 – Fatores artificiais extraídos em análises levadas a efeito para conjuntos das três lagoas de maturação das séries do Sistema I, experimento 01, e Sistema IX, experimentos 01 e 02.

Série de maturação	Fatores artificiais	
Sistema I, experimento 01	Conjunto menor (85,29%)	Conc. de material orgânico (41,72%) Aerobicidade (29,34%) Temperatura (14,20%)
	Conjunto maior (85,72%)	TDH (40,13%) Conc. de material orgânico (34,78%) Temperatura (10,81%)
Sistema IX, experimento 01	Conjunto menor (74,12%)	Aerobicidade (38,18%) Temperatura (21,63%) Crescimento algal (14,31%)
	Conjunto maior (76,19%)	Aerobicidade (44,27%) Temperatura (19,49%) Crescimento algal (12,43%)
Sistema IX, experimento 02	Conjunto menor (77,86%)	Aerobicidade (50,42%) Temperatura (temperatura) (14,19%) Temperatura (radiação) (13,25%)
	Conjunto maior (79,36%)	Aerobicidade (51,17%) Temperatura (radiação) (16,67%) Temperatura (temperatura) (11,52%)
Todos os experimentos	Conjunto menor (76,63%)	Aerobicidade (30,95%) Conc. de material orgânico (28,36%) Temperatura (17,32%)
	Conjunto maior (74,39%)	TDH (27,14%) Aerobicidade (27,04%) Conc. de material orgânico (20,21%)

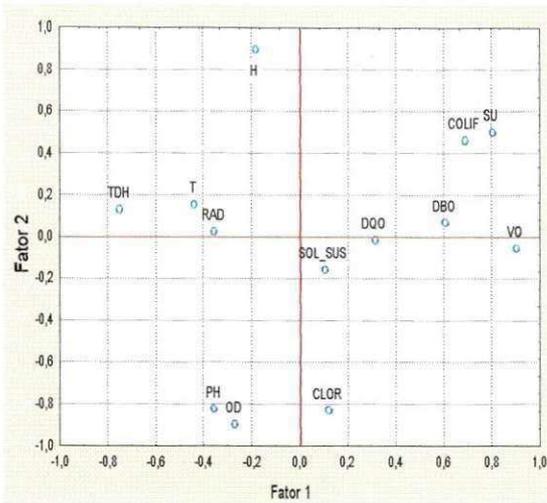


Figura 4.57 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de todas as lagoas de maturação. Fator tempo de detenção hidráulica x fator aerobicidade. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

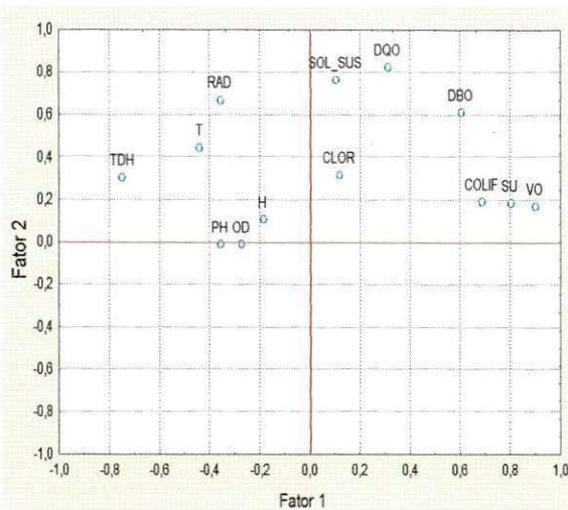


Figura 4.58 – Diagrama de dispersão das variáveis do conjunto de todas as lagoas de maturação. Fator tempo de detenção hidráulica x fator concentração de material orgânico. Foi aplicada a rotação varimax bruta.

A seguir, são apresentadas tabelas-resumo (Tabelas 4.9 e 4.10) dos fatores artificiais extraídos nas análises levadas a efeito para as lagoas individuais, séries de lagoas e combinação dessas séries, que em conjunto com as Tabelas 4.7 e 4.8 sintetizam todos os resultados encontrados neste trabalho.

Tabela 4.9 – Resumo dos fatores artificiais extraídos nas análises com conjuntos de dados de séries de lagoas de experimentos combinados.

FATORES ARTIFICIAIS		
EXPERIMENTOS COMBINADOS		
Sistema IX exps. 01 e 02	Sistemas I e IX exp. 01	Sistema I, exp.01 Sistema IX, exps. 01 e 02
TDH Temperatura	TDH Crescimento algal Temperatura	TDH Crescimento algal Temperatura

Tabela 4.10 – Resumo dos fatores artificiais extraídos nas análises de lagoas individuais e das séries.

LAGOAS	FATORES ARTIFICIAIS		
	SISTEMA I	SISTEMA IX	
	Experimento 01	Experimento 01	Experimento 02
ANAERÓBIA	Estabilidade do processo anaeróbio Concentração de material orgânico Temperatura	Estabilidade do processo anaeróbio Concentração de material orgânico	Concentração de material orgânico Estabilidade do processo anaeróbio Temperatura
FACULTATIVA SECUNDÁRIA	Concentração de material orgânico Aerobicidade Temperatura	Concentração de material orgânico Crescimento algal	Temperatura Aerobicidade Crescimento algal
MATURAÇÃO PRIMÁRIA	Aerobicidade Temperatura	Crescimento algal Temperatura Aerobicidade	Crescimento algal Temperatura Aerobicidade
MATURAÇÃO SECUNDÁRIA	Aerobicidade Temperatura	Aerobicidade Temperatura Indicativo de detritos	Concentração de material orgânico Temperatura Aerobicidade
MATURAÇÃO TERCIÁRIA	Crescimento algal Temperatura	Aerobicidade Crescimento algal Indicativo de detritos	Crescimento algal Aerobicidade Indicativo de detritos
SÉRIE COMPLETA	TDH Crescimento algal Temperatura	TDH Temperatura Crescimento algal	TDH Temperatura

Capítulo 5

DISCUSSÃO

5.1 - Considerações sobre as séries de lagoas analisadas

Este trabalho descreve os resultados de um estudo sobre a variação de variáveis de desempenho operacional de lagoas em série em função de fatores artificiais num espaço multidimensional menor. Esse estudo visa contribuir para a compreensão dos inúmeros fenômenos que ocorrem em séries de lagoas de estabilização tratando esgotos tipicamente domésticos e, assim, estabelecer algumas recomendações importantes do projeto dessas séries especialmente com relação às combinações de características físicas e operacionais que promovem a ocorrência de mecanismos favoráveis ao tratamento.

Para avaliar a importância dessas características físicas e operacionais, foi aplicada a análise fatorial a sistemas em série com certas diferenças em tais características. Assim, os sistemas experimentais I e IX tinham profundidades bem distintas (as lagoas do primeiro tinham, em sua maioria, 1,00 m de profundidade, e o outro sistema, 2,20 m). Com isso foi possível avaliar a questão da profundidade em séries de lagoas que tinham aproximadamente o mesmo tempo de detenção hidráulica. Já para o sistema com maior profundidade foram analisados experimentos com tempos de detenção hidráulica e cargas orgânicas aplicadas bem diferentes, objetivando avaliar a influência dessas últimas variáveis no comportamento de sistemas com características físicas iguais.

Para o presente trabalho também foi, a princípio, planejada a análise de um outro experimento do Sistema I (experimento 03 do trabalho de Silva, 1982), para avaliar a influência de diferentes cargas orgânicas e tempos de detenção hidráulica em uma série de lagoas rasas, mas, por falta dos dados de oxigênio dissolvido, esse estudo foi, posteriormente, descartado.

5.2 – Desempenho da análise fatorial

A análise fatorial foi aplicada a um sistema de tratamento de águas residuárias, sobre o qual um grande número de aproximações teóricas e critérios de dimensionamento têm sido propostos, devido às muitas variáveis incontroláveis (radiação solar, temperatura, DBO₅, DQO, coliformes fecais entre outras) envolvidas (Metcalf e Eddy, 1991), com o objetivo de simplificar a descrição dos diversos fenômenos que ocorrem no interior desses reatores e, também, desenvolver uma metodologia para que a análise fatorial possa ser empregada em outras pesquisas sobre lagoas de estabilização.

Inicialmente, foi avaliada a influência da distribuição de frequências das variáveis na capacidade da análise fatorial, em recuperar a variância das variáveis. Essa ferramenta estatística obteve melhores resultados com variáveis de distribuição normal. Uma maneira adotada para que as variáveis apresentassem essa distribuição foi a adoção da média mensal dos dados das variáveis e, em certos casos, transformações desses dados médios, através do logaritmo decimal ou raiz quadrada, quando a média mensal não era suficiente para garantir a distribuição normal à variável.

Aplicada aos mais diversos conjuntos de lagoas de estabilização, com conjuntos variados de variáveis, a análise fatorial foi capaz de, com 3 fatores artificiais extraídos, recuperar mais de 70% da variância das variáveis em, praticamente, todos os casos analisados (com exceção das análises para o conjunto de lagoas anaeróbias, conjuntos menor e maior, onde foram obtidas explicações de 67,88% e 67,70%, respectivamente). Assim, a análise reduziu conjuntos de 9 a 13 variáveis para, no máximo, 3 fatores artificiais. Mas, foi necessária a definição de 6 fatores artificiais principais para explicar os distintos fenômenos que ocorrem nos mais diferentes tipos de lagoas, nas diversas configurações: estabilidade do processo anaeróbio, concentração de material orgânico, crescimento algal, aerobicidade, temperatura e tempo de detenção hidráulica.

Fatores com outras interpretações também foram, mais tarde, obtidos como os relacionados à presença de detritos e/ou organismos maiores, como microcrustáceos (resultado obtido nas lagoas de maturação secundária e terciária do primeiro experimento do Sistema IX e, novamente, na lagoa de maturação terciária, no segundo experimento do mesmo Sistema IX), e à profundidade (na análise para o conjunto maior de variáveis das lagoas anaeróbias).

Mesmo assim, a análise fatorial se mostrou uma ferramenta estatística de grande utilidade no estudo de lagoas de estabilização, uma vez que, conservando a maior parte das informações das variáveis originais, permitiu reduzir o número das variáveis que são, normalmente, utilizadas para descrever os diversos processos e interações inerentes a esses reatores.

5.3 - Considerações sobre as várias lagoas estudadas

5.3.1 – Lagoas anaeróbias

Os principais fatores artificiais extraídos nas análises para as lagoas anaeróbias foram estabilidade do processo anaeróbio, concentração de material orgânico e temperatura.

Bem correlacionado com variáveis medidoras de material orgânico (DBO₅ e DQO), coliformes fecais, radiação e, principalmente, pH, o primeiro fator descreveu o delicado equilíbrio entre a fermentação ácida e a metanogênica, já profundamente discutida em toda a literatura. Foi um fator exclusivo das lagoas anaeróbias. Nas análises para os três experimentos foi observado que, nas duas séries com maiores cargas orgânicas (os primeiros experimentos de cada sistema), o fator estabilidade do processo anaeróbio apresentou maior percentual de explicação da variância das variáveis que o fator concentração de material orgânico. Resultado inverso foi obtido na lagoa anaeróbia do segundo experimento do Sistema IX, que teve a menor carga orgânica aplicada dos casos

analisados contribuindo, essa menor carga, para que o valor do pH ficasse menos sujeito a grandes variações associadas a diferentes concentrações de ácidos orgânicos. Assim, a variação das variáveis características do fator concentração de material orgânico apresentou maior sensibilidade na explicação da variância total que as variáveis representativas do fator estabilidade do processo anaeróbio.

O fator concentração de material orgânico indicou uma baixa qualidade do efluente com relação à remoção desse material, devido às variáveis que influenciam em sua interpretação. Um outro aspecto a ser analisado é que as lagoas anaeróbias não apresentam condições propícias à eliminação dos coliformes fecais, visto que pelos resultados das análises fatoriais com as lagoas subseqüentes da série, a condição aeróbia da massa líquida foi importante para a diminuição dos organismos fecais. Dessa forma, a remoção dos coliformes fecais, para esse tipo de lagoa, pode ser atribuída à sedimentação, principalmente.

Com relação aos critérios de dimensionamento é recomendável a adoção de maiores profundidades, que seja garantida a neutralidade do pH, que haja outras lagoas posteriores à anaeróbia, pois esta apresenta um efluente com qualidade ruim (maior sensibilidade das variáveis medidoras de material orgânico e coliformes fecais na caracterização dos fatores descritivos desses reatores) e uma relação tempo de detenção hidráulica-carga orgânica suficiente para promover a predominância de condições anaeróbias sem, no entanto, provocar a evolução de maus odores.

5.3.2 – Lagoas facultativas secundárias

É nessa lagoa que há o início do desenvolvimento das condições aeróbias que prevalecem ao longo de toda a série e, principalmente, nas lagoas de maturação. O surgimento de condições ambientais propícias ao desenvolvimento da biomassa de algas permite que esses microrganismos realizem fotossíntese, suprindo, assim, o meio aquático

de oxigênio molecular. Portanto, as análises fatoriais levadas a efeito para as lagoas facultativas dos dois sistemas resultaram em fatores, além da concentração de material orgânico, que caracterizam essa condição de aerobiose: fatores crescimento algal e aerobicidade.

O fator relacionado à concentração de material orgânico explicou o maior percentual da variância das variáveis das lagoas facultativas de maior carga orgânica aplicada. Novamente, este fator indicou baixa qualidade do efluente dessas lagoas quanto à remoção de organismos fecais e matéria orgânica (como descrito na seção anterior). Mas, não foi obtido nenhum fator com essa interpretação para a lagoa facultativa secundária do segundo experimento do Sistema IX (de menor carga orgânica). A menor carga orgânica contribuiu para um maior desenvolvimento da comunidade algal e das condições aeróbias dessa última lagoa, quando comparada com as dos outros sistemas, como pode ser verificado nos diagramas de evolução dos fatores das três séries (em valor absoluto, os percentuais de explicação da variância das variáveis dos fatores crescimento algal e aerobicidade foram maiores na lagoa facultativa secundária de menor carga orgânica aplicada).

5.3.3 – Lagoas de maturação

Os resultados das análises fatoriais levadas a efeito para as lagoas de maturação primárias, secundárias e terciárias foram semelhantes quanto à interpretação dos fatores aerobicidade, crescimento algal e temperatura.

No presente trabalho, o fator crescimento algal foi mais descritivo do funcionamento de lagoas profundas. Nas lagoas rasas, a clorofila "a" e oxigênio dissolvido apresentaram boas correlações com o mesmo fator, aerobicidade. Muitas características de reatores profundos como maior camada anaeróbia no fundo da lagoa, mesmo em lagoas consideradas de maturação, e menor possibilidade da luz solar atingir toda a massa líquida,

afetam o balanço entre fotossíntese e respiração, e, por conseguinte, o saldo positivo de oxigênio dissolvido na massa líquida, bem como a distribuição desse gás ao longo da coluna líquida da lagoa, definindo como independentes esses dois fatores.

O fator aerobividade, juntamente com o fator crescimento algal, foi um dos resultados mais importantes deste trabalho. Refletiu a importância das condições aeróbias da lagoa no comportamento das variáveis medidoras de matéria orgânica e, principalmente, de organismos fecais. A evolução das condições aeróbias ao longo da série de lagoas, como pode ser visualizado nos diagramas de evolução dos fatores artificiais explicativos de cada lagoa da série, criou um ambiente, com elevada concentração de oxigênio dissolvido, adverso aos coliformes fecais, permitindo altíssimas remoções desses microrganismos nos sistemas analisados, conforme, previamente, descrito por Silva (1982) e de Oliveira (1990). Resultados da análise fatorial levada a efeito com conjuntos de lagoas de mesma classificação permitiram avaliar o comportamento deste fator com relação à clorofila "a", oxigênio dissolvido, pH e profundidade das lagoas. Tais resultados demonstraram uma relação direta entre o fator aerobividade e as três primeiras variáveis citadas e inversa entre o mesmo fator e a profundidade. Isso indica um decréscimo da atividade fotossintética nas lagoas profundas com relação às lagoas rasas.

O fator concentração de material orgânico também foi obtido em análises conduzidas em lagoas de maturação. Neste caso, o desenvolvimento da biomassa de algas contribuiu para uma maior variabilidade da concentração de sólidos suspensos e também das variáveis medidoras de material orgânico.

De uma maneira geral, o fator temperatura não foi tão expressivo na descrição de lagoas de maturação (também nos outros tipos de lagoa), como, por exemplo, os fatores crescimento algal e aerobividade, apesar de ter sido um resultado sempre presente em todos os casos analisados.

Para o projeto de lagoas de maturação e de facultativas secundárias é recomendável adotar pequenas profundidades e uma relação tempo de detenção hidráulica-carga orgânica suficiente para promover a predominância de condições aeróbias, nas primeiras, e uma combinação com condições de anaerobiose, nas lagoas facultativas secundárias.

5.3.4 – Séries de lagoas de estabilização

Neste trabalho, a variável tempo de detenção hidráulica foi empregado de duas maneiras distintas. Em uma, nas análises fatoriais das séries de lagoas dos três experimentos e nas combinações dessas séries, essa variável foi o TDH cumulativo ao longo de cada série. Já para as análises com lagoas de mesma classificação (conjunto de anaeróbias, facultativas secundárias e assim por diante) o tempo de detenção utilizado foi o individual de cada lagoa.

O fator tempo de detenção hidráulica, obtido para as séries de lagoas, apresentou os maiores percentuais de explicação da variância das variáveis e descreveu a evolução da concentração (aumento ou decréscimo) dessas variáveis ao longo das séries. Assim, ao analisar a distribuição das variáveis com relação ao fator TDH, foi observado que, em um sentido, este fator indicou o aumento das condições aeróbias da lagoa (boas correlações com tempo de detenção hidráulica, oxigênio dissolvido e pH). Num outro sentido, este fator foi descritivo da melhoria da qualidade do efluente através da diminuição da concentração de matéria orgânica e coliformes fecais.

O fator tempo de detenção, definido pelo TDH_i , tem sua importância nas lagoas individuais onde demonstrou sua relação inversa com variáveis como carga orgânica volumétrica e coliformes fecais. No projeto de lagoas, uma correta avaliação do tempo de detenção hidráulica individual de cada lagoa permitirá o desenvolvimento das condições ambientais particulares ideais de cada uma, contribuindo, assim, para um

eficiente desempenho operacional da série. Esse resultado contesta o teorema de Marais (Mara, 1976) que afirma que a máxima eficiência de uma série de lagoas de estabilização é obtido quando é adotado o mesmo tempo de detenção hidráulica individual para cada lagoa da série. Assim, o tempo de detenção de cada reator é, sem dúvida, no projeto de uma série, uma das mais importantes considerações, podendo constituir-se numa variável básica para a otimização da remoção de organismos fecais.

Dois outros fatores foram obtidos nas diversas análises com séries de lagoas, os fatores crescimento algal e temperatura. Mas, foi a evolução do fator aerobicidade o resultado mais importante para descrever séries de lagoas de estabilização.

5.4 - Outras considerações sobre a análise fatorial

Algumas análises fatoriais resultaram em fatores artificiais que não foram citados na **Seção 4.2.1**, por retratarem resultados isolados. O fator relacionado à profundidade foi obtido na análise com o conjunto maior de variáveis para as lagoas anaeróbias. Ao analisar as lagoas de maturação profundas, individualmente, e em especial, as terciárias, foi obtido um fator relacionado à presença de detritos e/ou organismos maiores como microcrustáceos.

O fator associado à profundidade indica a importância dessa variável na manutenção das condições de anaerobiose em toda a massa líquida da lagoa, tendo se apresentando também, influente no desenvolvimento da biomassa do fitoplâncton e das condições aeróbias nas lagoas facultativas secundárias e de maturação.

O fator relacionado aos detritos e/ou microcrustáceos pode ter sido consequência da presença de espuma na superfície das lagoas de maturação. Mesmo assim, não é possível tirar conclusões mais precisas sobre a influência desse fator nas lagoas individuais e para uma série de lagoas. Novas pesquisas com um conjunto maior de lagoas e direcionadas a esse propósito podem esclarecer esses resultados.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

As diversas análises fatoriais levadas a efeito para diferentes lagoas e séries dessas lagoas permitiram concluir que:

- a) O maior percentual de explicação da variância das variáveis foi obtido com variáveis de distribuição normal. A adoção da média mensal dos dados brutos das variáveis apresentou uma distribuição mais próxima da normal;
- b) A análise fatorial resultou na interpretação de 6 fatores artificiais principais: estabilidade do processo anaeróbio, concentração de material orgânico, crescimento algal, aerobicidade, temperatura e tempo de detenção hidráulica;
- c) O tempo de detenção hidráulica de cada lagoa constituinte de uma série deve ser diferenciado de acordo com o tipo de lagoa;
- d) Os resultados das análises fatoriais obtidos para as lagoas anaeróbias, indicaram que esse tipo de lagoa é altamente influenciada pelo pH e temperatura, e que no seu dimensionamento é recomendável a adoção de grandes profundidades e uma relação TDH/carga orgânica suficiente para manter a anaerobiose da lagoa;
- e) Os fatores artificiais resultantes das análises fatoriais para as lagoas facultativas secundárias e de maturação indicaram que, principalmente, para o segundo tipo, a profundidade da lagoa está inversamente relacionada com a atividade fotossintética. É recomendável, então, para o projeto dessas lagoas profundidades menores e uma relação TDH/carga orgânica suficiente para a manutenção de condições aeróbias na massa líquida;
- f) A evolução das condições aeróbias ao longo de uma série de lagoas de estabilização, descrita pelos fatores aerobicidade e crescimento algal, é o fator mais

descritivo da variabilidade da eficiência dos sistemas de lagoas de estabilização, especialmente com relação à remoção de organismos fecais.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, T. W. (1958). *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis*. Canada, John Wiley & Sons, Inc.
- ARAÚJO, A. L. C. (1993). *Comportamento de Formas de Fósforo em Sistemas de Lagoas de Estabilização em Série, em Escala-piloto, com Diferentes Configurações, Tratando Esgotos Domésticos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- BACK, J. F. (1986). *Caracterização de Sistemas Profundos de Lagoas de Estabilização – Lagoas em Série*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- BARROS, J. V. (1999). *Efeitos do Uso de Chicanas Longitudinais do Tipo Vai-e-vem em Lagoas Facultativas Primárias Profundas Tratando Águas Residuárias Domésticas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. (1987). *Estatística Básica*. Atual Editora. São Paulo.
- CAMARDELLA, S. (2000). *Surface Water Body Classification: Optimization of Quality Parameters*. SIDISA. International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering. Trento, Itália.
- CEBALLOS, B. S. O. (1995). *Utilização de Indicadores Microbiológicos na Tipologia de Ecossistemas Aquáticos do Trópico Semi-árido*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

- DE OLIVEIRA, R. (1983). *Contribuição ao Estudo de Tanques Sépticos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- DE OLIVEIRA, R. (1990). *The Performance of Deep Waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil*. PhD, Thesis, The University of Leeds, U. K.
- DE OLIVEIRA, R. E. (1995). *Remoção de Coliformes Fecais e Matéria Orgânica numa Série de Dez Lagoas de Estabilização, em Escala-piloto, Tratando Esgotos Domésticos em Região de Clima Tropical*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- Ferramenta Ajuda do Programa Statistica (1995).
- HEATH, O. V. S. (1981). *A Estatística na Pesquisa Científica*. Coleção Temas de Biologia. Editora da Universidade de São Paulo – SP.
- JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A. (1999). *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 3ª Edição. ABES.
- LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. (1998). *Estatística: Teoria e Aplicações Usando Microsoft Excel*. LTC – Livros técnicos e científicos. Editora S. A. Rio de Janeiro.
- LUCENA, F.; ARAUJO, R.; JOFRE, J. (1996). *Usefulness of Bacteriophages Infecting Bacteroides fragilis as Index Microorganisms of Remote Faecal Pollution*. IAWQ, vol. 30, nº 11, pp. 2812-2816. Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- MARA, D. D. (1976). *Sewage Treatment in Hot Climates*. Chichester: John Wiley & Sons.
- MARDIA, K. V.; KENT, J. T.; BIBBY, J.M. *Multivariate Analysis*. Edited by ACADEMIC PRESS LIMITED. London, 1989.

- METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3rd edition. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- MORRISON, D. F (1976). *Multivariate Statistical Methods*. New York, McGraw-Hill.
- ODA, Y. & OUCHI, K. (1989). *Principal-component Analysis of the Characteristics Desirable in Baker's Yeasts*. *Applied and Environmental Microbiology*, pp. 1495-1499.
- OVERALL, J. E. & KLETT, C. J. (1972). *Applied Multivariate Analysis*. Series in Psychology. McGraw – Hill Book Company.
- POSSOLI, S. (1984). *Técnicas de Análise Multivariada para Avaliação das Condições de Saúde dos Municípios do Rio Grande do Sul, Brasil*. *Revista Saúde Pública*, São Paulo.
- REISENHOFER, E.; ADAMI, G.; BARBIERI, P. (1998). *Using Chemical and Physical Parameters to Define the Quality of Karstic Freshwaters (Timavo River, North-Eastern Italy): a Chemometric Approach*. *IAWQ*, vol. 32, nº 4, pp. 1193-1203. Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- SILVA, O. L. C. (1999). *Avaliação de Espécies de Enxofre em Lagoas de Estabilização, Facultativas Primárias, com Chicanas Tratando Esgotos Domésticos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- SILVA, S. A. (1982). *On the Treatment of Domestic Sewage in Waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil*. PhD Thesis, University of Dundee, U. K.
- SIMONEAU, M. (1986). *Spatial Variability in the Water Quality of Quebec Rivers*. In: EL-SHAARAWI, A. H. & KWIATKOWSKI, R. E., eds.

Developments in Water Science: Statistical Aspects of Water Quality Monitoring. New York, Elsevier, 1986. Proceedings, p. 117-33.

- Site do fabricante do Statistica: www.statsoft.com
- SOARES, J. (1985). *Avaliação do Comportamento de um Sistema de Lagoas de Estabilização Profundas em Série*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- SOKAL, R. R. & ROHLF, F. J. (1981). *Biometry – The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. 2nd edition. San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- SUNDMAN, V. (1970). *Four Bacterial Soil Populations characterized and Compared by a Factor Analytical Method*. Canadian Journal of Microbiology, 16, pp. 455-464.
- TIMM, N. H. (1975). *Multivariate Analysis with Applications in Education and Psychology*. Published: Monterey, Calif., Brooks/ Cole Pub. Co. [1975]. Series: Brooks/ Cole Series in Statistics.
- VAN HAANDEL, A. C. & LETTINGA, G. (1994). *Tratamento Anaeróbio de Esgoto em Regiões de Clima Quente*. Campina Grande – PB: Epgraf.
- VAN HAANDEL, A. C. & MARAIS, G. (1999). *O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e Aplicações para Projetos e Operação*. Campina Grande – PB: Epgraf.
- VEGA, M.; PARDO, R.; BARRADO, E.; DEBÁN, L. (1998). *Assessment of Seasonal and Polluting Effects on the Quality of River Water by Exploratory Data Analysis*. IAWQ, vol. 32, nº 12, pp. 3581-3592. Elsevier Science Ltd. Great Britain.

- VON SPERLING, M. (1996). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, Vol. 3, Lagoas de Estabilização. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG.