



II-504 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FATORES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS NA REMOÇÃO DE FÓSFORO EM SÉRIE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO RASAS COM A APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE TRAJETÓRIA (PATH ANALYSIS)

Gustavo Adolfo Batista Nogueira⁽¹⁾

Eng.º Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Eng. Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutorando em Eng. Civil/Área de Geotecnia Ambiental (UFPE). Responsável pelo monitoramento da Célula Experimental da Muribeca/PE. Membro do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE.

Endereço⁽¹⁾: Rua Othon Paraíso, 473 ap. 201A - Torreão - Recife - Pernambuco - CEP: 52030-250 - Brasil - Tel: +55 (81) 8611-2206 - e-mail: gustavonogueir@gmail.com.

RESUMO

Dados de monitoramento de uma série rasa de lagoas de estabilização operada na EXTRABES - UFCG, na cidade de Campina Grande (7° 13' 11" sul e 35° 52' 31" oeste, 550 m acima do nível do mar), no Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, descritas previamente por Silva (1982) e de Oliveira (1990), foram submetidos à análise de trajetória para a elaboração de um modelo causal dos relacionamentos entre variáveis físicas, químicas e biológicas envolvidas na remoção de fósforo. A análise dos resultados demonstrou que lagoas rasas são mais eficazes na remoção de fósforo, sendo o pH e a biomassa algal as principais variáveis que atuam no processo.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Trajetória, Modelo Causal, Nutrientes, Fósforo, Lagoas de Estabilização.

INTRODUÇÃO

Os dados de monitoramento dos sistemas de tratamento são muito freqüentemente limitados a uma avaliação do desempenho do sistema. Pesquisas mais detalhadas são necessárias para a compreensão dos processos de tratamento de águas residuárias através do espaço e do tempo.

No passado, a determinação das concentrações de fósforo servia principalmente para controlar as dosagens de fosfatos como meio de prevenção contra a corrosão nos sistemas de abastecimento d'água e incrustações em caldeiras. Hoje, determinações de fósforo são de extrema importância na avaliação do potencial de produtividade biológica de águas superficiais e na manutenção de estações de tratamento biológico de águas residuárias, principalmente industriais. Atualmente, limitações nas quantidades de fósforo que podem ser lançadas em corpos receptores (principalmente lagos e reservatórios) estão sendo estabelecidas.

Nos últimos anos poderosas ferramentas estatísticas vêm sendo desenvolvidas e popularizadas na comunidade científica, graças também ao desenvolvimento da informática, facilitando o acesso a análises mais elaboradas que promovem um melhor entendimento das informações disponíveis.

Dentre as análises empregadas com esta finalidade destaca-se a Análise de Trajetória (Path Analysis), que é uma generalização da Regressão Múltipla Linear e constrói modelos com interpretação causal. É um procedimento exploratório para busca de uma estrutura causal em dados correlacionados (Cohen *et al.*, 1993). Sendo um subconjunto da Modelagem de Equações Estruturadas (SEM), o procedimento multivariado que, como define Ullman (1996), "permite o exame de um conjunto de relacionamentos entre uma ou mais variáveis independentes, contínuas ou discretas, e uma ou mais variáveis dependentes, contínuas ou discretas". A Análise de Trajetória é usada principalmente na tentativa de compreender e comparar a força dos relacionamentos diretos e indiretos do conjunto de variáveis em estudo.

Técnicas modernas para o tratamento dos dados obtidos, nas pesquisas relacionadas com águas residuárias, são necessárias para permitir o desenvolvimento de métodos avançados de tratamento de águas residuárias que possam produzir uma qualidade de efluente final mais elevada, suprimindo a crescente demanda pela qualidade da água.



Este é o objetivo deste trabalho, focado no desenvolvimento de um modelo (causal) que possa melhor descrever os fenômenos envolvidos na remoção de fósforo em lagoas de estabilização, em outras palavras, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático que permita avaliar a influência dos fatores físicos, químicos, biológicos e operacionais no comportamento das transformações cíclicas do fósforo em séries de lagoas de estabilização rasas tratando águas residuárias domésticas com o emprego da análise de trajetória.

MATERIAIS E MÉTODOS

O conjunto de dados escolhido para a análise causal é referente ao ciclo hidrológico entre fevereiro de 1978 e janeiro de 1979 do Sistema I, experimento 01, cujos estudos prévios foram realizados por Silva em 1982. Os dados escolhidos incluem variáveis físicas, químicas e biológicas, são eles: Radiação solar (Rad), Temperatura média da água (Temp), Clorofila "a" (Cl"a"), Potencial hidrogeniônico (pH) e Fósforo total afluyente (Pa) (e efluente).

O sistema experimental utilizado neste estudo é composto por uma série de cinco lagoas de estabilização rasas, em escala piloto, sendo a primeira anaeróbia, seguida de uma facultativa secundária e três de maturação. A alimentação das lagoas provinha do sistema de esgotamento sanitário municipal. A Tabela 1 exibe a descrição do sistema.

Tabela 1 - Características físicas e operacionais do Sistema I.

Sistema	Lagoa	Dimensões (m)			Área (m ²)	Vol. (m ³)	Vazão de Alimentação (m ³ /d)	T.D.H. (d)	Carga	
		Comp.	Larg.	Prof.					Superficial (KgDBO ₅ /had)	Volumétrica (KgDBO ₅ /had)
I	A1	10,00	3,35	1,25	33,50	41,88	6,17	6,80	544,00	45,00
	F1	10,00	3,35	1,00	33,50	33,50	6,17	5,50		
	M1	10,00	3,35	1,00	33,50	33,50	6,17	5,50		
	M2	10,00	3,35	1,00	33,50	33,50	6,17	5,50		
	M3	10,70	3,35	1,00	35,85	35,85	6,17	5,80		

Para todas as variáveis determinadas em laboratório foram adotados os procedimentos descritos em APHA et al. (1975), exceto na determinação de clorofila "a" na qual foi empregado o método utilizado por Silva (1982) e König (1984). Um integrador de radiação Gunn-Bellani, instalado de acordo com os padrões do Instituto Nacional de Meteorologia, foi usado nas determinações da radiação solar. A Tabela 2 resume os métodos de análises empregados na determinação das variáveis.

Tabela 2 - Métodos empregados nas determinações das variáveis utilizadas na análise causal.

Variável	Método
Radiação Solar	Integrador de radiação solar Gunn-Belanni.
Temperatura	Termômetro de filamento de mercúrio.
Clorofila "a"	Extração com acetona a 90%.
pH	Potenciométrico.
Fósforo Total	Digestão com Persulfato.

ANÁLISE DE TRAJETÓRIA

Inicialmente foi criado um Diagrama de Relações Causais. O diagrama de relações causais é normalmente elaborado com base na experiência e conhecimento do pesquisador, incluindo suas intuições sobre potenciais inter-relações entre as variáveis em estudo. Este fato resulta em um retorno positivo do processo de raciocínio, que considera alternativamente o conhecimento sobre o fenômeno envolvido unindo os vários componentes do ecossistema aquático e os dados considerados.



A Equação 1 é o balanço de massa para nutrientes em lagoas de estabilização.

$$\frac{d(VC)}{dt} = Q_1 C_1 - Q_2 C_2 - K_a A C_2 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$d(VC)/dt$ é a variação da concentração de fósforo no tempo e no volume do reator, g/d;
 Q_1 e Q_2 são as vazões de entrada e saída respectivamente, m³/d;
 C_1 e C_2 são as concentrações de fósforo no afluente e efluente, g/m³;
 K_a é a constante de primeira ordem da taxa de remoção de fósforo, m/d;
 A é a área superficial da lagoa, m².

Considerando:

- Quando a lagoa atinge o estado de equilíbrio $d(VC)/dt = 0$;
- Desprezando as perdas por evaporação e infiltração as vazões afluente e efluente são iguais $Q_1 = Q_2$;
- Devido ao longo tempo de detenção hidráulica nas lagoas que favorece a decomposição dos nutrientes, é possível utilizar em C_1 as concentrações de “Fósforo Total” (Nurdogan & Oswald, 1995 *apud* Garcia *et al.*, 2002).

Assim a Equação 1 torna possível estimar os valores observados de K_a por meio da manipulação matemática feita ao se considerar as proposições anteriormente mencionadas. A Equação 2 define a Constante de Primeira Ordem para remoção de nutrientes.

$$K_a = \frac{Q_1}{A} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \quad \text{Equação (2)}$$

A constante de primeira ordem K_a foi escolhida como variável endógena para a análise causal. As variáveis exógenas foram escolhidas levando em consideração os fatores chave para remoção de fósforo em lagoas de estabilização.

Considerando-se a importância que o pH exerce na precipitação do ortofosfato, é possível especular que o pH será um importante fator atuante na remoção do fósforo. Um segundo fator importante na remoção seria a biomassa algal (quantificada pela determinação da concentração da clorofila “a”), tanto por sua ação direta devido à assimilação, quanto por sua ação indireta através da alteração no pH causada pela modificação do equilíbrio do sistema carbônico da água devido à fotossíntese.

Logo, qualquer outro fator que possa influenciar a biomassa algal, também deve ser considerado, assim foram incluídas no modelo, como variáveis exógenas, a Radiação Solar e a Temperatura da água, resultando no Diagrama de Relações Causais exibido na Figura 1.

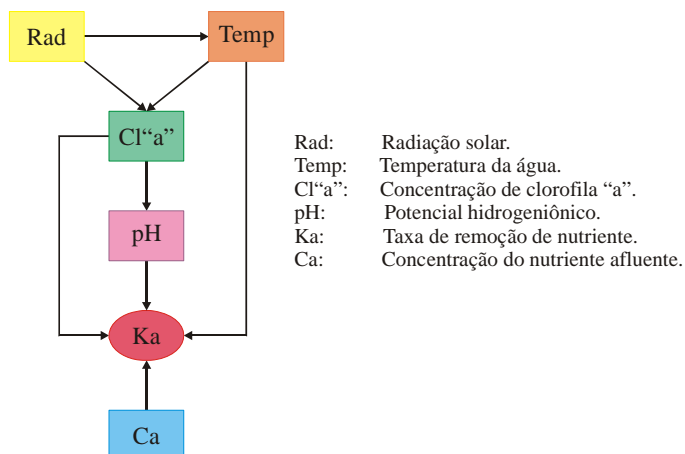


Figura.1 - Diagrama de Relações Causais para remoção de fósforo em lagoas de estabilização em série.

RESULTADOS

O modelo causal proposto para remoção de fósforo obteve o maior coeficiente de determinação (83%) na lagoa facultativa secundária rasa (F1). A concentração de fósforo afluente, determinou 82% do comportamento da constante $K_a(P)$. O pH provocou um efeito negativo que explicou 43% da variabilidade da constante.

Um coeficiente de 62% foi obtido quando o modelo foi testado na primeira lagoa de maturação rasa (M1), onde a clorofila “a” exerceu um efeito causal total positivo que explicou 58,6% da variabilidade da constante de remoção de fósforo, apesar de seu efeito indireto ter sido negativo. A temperatura e o pH explicaram respectivamente 36,6% e 33,4% do comportamento da constante $K_a(P)$.

O modelo conseguiu um coeficiente de determinação de apenas 18% na segunda lagoa de maturação rasa (M2), onde o pH e a concentração de clorofila “a” determinaram respectivamente 35,1% e 30,7% da variabilidade de $K_a(P)$. O efeito indireto da clorofila “a” correspondeu a 29% do seu efeito total.

Quando o modelo foi testado na terceira lagoa de maturação rasa (M3), foi obtido um coeficiente de determinação de 55%. A clorofila “a” exerceu um efeito negativo que determinou 67,2% da variabilidade da constante $K_a(P)$. O pH explicou 30,9% da variabilidade de $K_a(P)$.

A figura 2 resume os percentuais de explicação da variabilidade da constante de remoção do fósforo para lagoas rasas de cada variável nas diferentes lagoas do Sistema I.

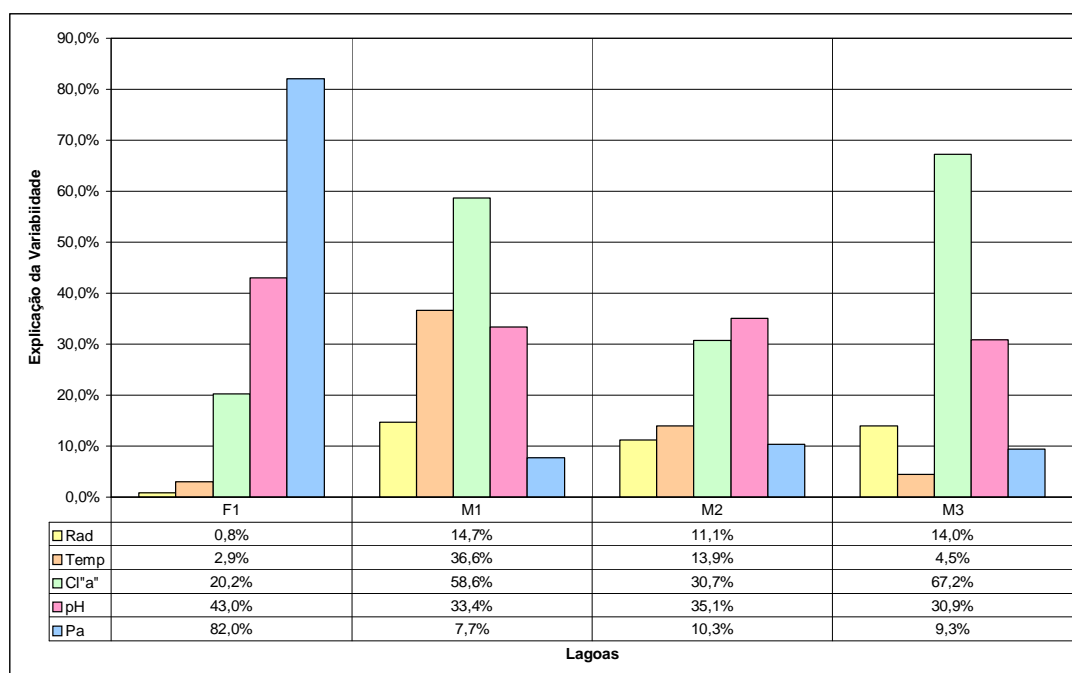


Figura 2 - Percentual de explicação da variabilidade da constante de remoção do fósforo para lagoas rasas nas diferentes lagoas do Sistema I (EXTRABES).

CONCLUSÕES

Ao contrário do esperado, não foi observado um efeito direto significativo radiação solar sobre a biomassa algal, quantificada pela concentração de clorofila “a”. Provavelmente, embora a radiação solar flutuasse bastante, não diminuiu a ponto de afetar o metabolismo das algas, estando sempre a energia luminosa em abundância, proporcionando o necessário para a realização da fotossíntese em toda sua plenitude. Também a radiação solar era a integração de todo o dia, enquanto que a clorofila “a” era avaliada sempre às 8h da manhã, horário que não corresponde à máxima atividade algal.

O pH e a concentração de clorofila “a” foram as variáveis que mais exerceram efeito sobre as constantes de remoção $K_a(P)$. A biomassa fitoplanctônica tem um papel fundamental no processo de maturação da série



devido às modificações que ocorrem no ecossistema em função da sua atividade metabólica. A temperatura, por sua vez, exerceu um efeito direto significativo sobre o fitoplâncton, nas lagoas de maturação rasas. Este efeito pode encontrar explicação no fato de, por serem rasas, as correntes de convecção promovem uma maior mistura permitindo uma melhor ciclagem de nutrientes.

O modelo causal proposto para a remoção de fósforo em lagoas rasas obteve explicações que variaram entre 18% e 83%. Esta análise indica que os fatores bióticos e abióticos, presentes no modelo, estão entre os mais importantes para um estudo da evolução da remoção de nutrientes em séries de lagoas de estabilização rasas, no entanto, também indica que outras variáveis relevantes não foram ainda hipotetizadas, o que aumentaria o coeficiente de determinação do modelo.

A influência da ação da biomassa algal, do pH e da temperatura sobre a remoção de fósforo já havia sido mencionada por Araújo (1999) sem, no entanto, estabelecer uma ordem de importância destas variáveis na remoção de fósforo.

A Análise de Trajetória demonstrou ser uma ferramenta poderosa, de uso acessível, que permite uma compreensão mais elaborada de fenômenos envolvendo variáveis que possuam complexas relações entre si, como é o caso do tratamento de águas residuárias em lagoas de estabilização.

O uso da Estatística é de fundamental importância nas pesquisas científicas e deve ser realizado não apenas no tratamento dos dados já obtidos, mas também, no planejamento de como obter tais dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COHEN, P. R. *et al.* (1993). Automating Path Analysis for Building Causal Models from Data. Computer Science Technical Report. University of Massachusetts. 12p.
2. DE OLIVEIRA, R. (1990). The Performance Of Deep Waste Stabilization Ponds In Northeast Brazil. Tese de Doutorado. Universidade de Leeds, Leeds (Inglaterra).
3. GARCIA, J. *et al.* (2002). Analysis of Key Variables Controlling Phosphorous Removal in High Rate Oxidation Ponds Provided with Clarifiers. Water SA. Vol. 28 N° 1. 8pp.
4. SILVA, S. A. (1982). Tratamento de Esgotos Domésticos em Lagoas de Estabilização no Nordeste do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade de Dundee (Escócia).