

# USO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E NÃO-LINEAR NA ESTIMATIVA DA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO) EM PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR FERTIRRIGADO COM VINHAÇA<sup>1</sup>

Marília Regina Costa Castro LYRA<sup>2</sup>

José Antônio Aleixo da SILVA<sup>3</sup>

Mario Monteiro ROLIM<sup>4</sup>

**RESUMO:** O uso da vinhaça na fertirrigação de canaviais se constitui uma fonte de elevado potencial poluidor dos solos e das águas subterrâneas. Portanto, faz-se necessário o seu monitoramento para avaliar as condições de qualidade dessas águas. Entre os componentes da vinhaça, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) se constitui no parâmetro mais importante em termos de indicadores da poluição. Porém, a determinação da DBO em laboratório é uma operação complexa e que leva alguns dias para sua realização, tornando-se importante a sua modelagem matemática para que a mesma possa ser estimada em um menor espaço de tempo, em função de variáveis independentes de determinações mais simples. Os dados utilizados neste estudo provêm de uma área de 12 ha, onde ocorrem duas classes de solos. Foram instalados 30 poços de observação com profundidades de 3 m, distribuídos em transectos paralelos, distanciados entre si de 100 m. Efetuaram-se três coletas de água do lençol freático e 13 parâmetros de qualidade foram analisados. Modelos matemáticos lineares e não-lineares foram utilizados para estimar a DBO. Nas condições do experimento pode-se concluir que a DBO pode ser estimada matematicamente através de sua relação com outras variáveis químicas de procedimentos analíticos mais simplificados.

**TERMOS PARA INDEXAÇÃO:** Modelos Matemáticos, Análise de Regressão, Água, Poluição.

## USING LINEAR AND NON-LINEAR REGRESSION ANALYSIS FOR ESTIMATING THE BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD) IN SUGAR CANE PLANTATIONS FERTIRRIGATED WITH VINASSE

**ABSTRACT:** The use of the vinasse as a fertilizer through fertirrigation for sugarcane plantations represents a high potential pollutant source of soils and ground water. Thus, it is necessary to monitor it with the purpose of assess the quality of those waters. Among the components of the vinasse, the biochemical oxygen demand (BOD) is the most important parameter in terms of pollution indicators. However, the laboratory analysis of BOD is a complex operation and can last some days for

---

<sup>1</sup> Aprovado para publicação em 29.8.2003

<sup>2</sup> Engenheira Agrônoma, MSc., Técnica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

<sup>3</sup> Engenheiro Agrônomo, PhD., Professor Adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. Departamento de Ciência Florestal.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, Dr., Professor Adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. Departamento de Tecnologia Rural. Rua Dom Manoel de Medeiros, S/N - Dois Irmãos. 52171-900 – Recife – Pernambuco.



its determination. Thus, it is important to model it mathematically so that the BOD can be estimated faster through independent variables of simpler determinations. The data for this research came from an area of 12 ha, with two types of soils. Thirty 3 m deep observation wells were installed, distributed 100 m apart in parallel transects. Three water samples were collected from the water table and 12 quality parameters were analyzed. Linear and non-linear mathematical models were used to estimate the DBO. Under the conditions of the experiment, the BOD can be mathematically estimated through the relationship with other chemical variables of simpler analytical procedure.

**INDEX TERMS:** Mathematical Models, Regression Analysis, Water, Pollution.

## 1 INTRODUÇÃO

Resíduo líquido resultante do processamento do álcool, a vinhaça, pela grande quantidade de volume produzido, é o principal de todos os subprodutos da indústria sucroalcooleira.

Os primeiros estudos científicos sobre a vinhaça datam de 1950, realizados pelos pesquisadores da ESALQ (VIEIRA, 1986). Após o advento do Pró-álcool (1975), a indústria sucroalcooleira teve um grande impulso ocasionando maior produção de álcool e, conseqüentemente, uma grande produção de vinhaça. Como a prática corrente na época era o acúmulo e descarte nos cursos de água, iniciou-se uma forte pressão dos órgãos ambientais, dentre eles a CETESB do estado de São Paulo, proporcionando a mudança de estratégia das usinas acarretando na disposição do total de vinhaça no solo (BENKE, 1998).

Para comprovar que a vinhaça era a principal causadora da intensa poluição dos cursos d'água, Lima<sup>5</sup> (1955 citado por FREIRE; CORTEZ, 2000), coletou amostras de água ao longo de 12 km do rio Piracicaba e afluentes e, após analisá-las, verificou que antes do início da safra alcooleira de 1953/54, os valores

encontrados para a DBO giravam em torno de 1,0 a 2,5 mg/L. Ao se iniciar o funcionamento das usinas canavieiras, o número começou a se elevar, atingindo, dois meses depois, o valor de 25 mg/L, continuando a subir e, ao final de mais dois meses, a DBO foi igual a 400 mg/L, superando de muito esse nível no mês seguinte, mesmo após o término da safra alcooleira.

Entre os componentes da vinhaça, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) se constituiu no parâmetro mais importante em termos de indicadores da poluição. A quantidade de matéria orgânica indicada pela determinação da DBO é importante para se conhecer o grau de poluição de uma água residuária, servindo para se dimensionar as estações de tratamento e medir sua eficiência. Quanto maior o grau de poluição orgânica, maior a DBO do corpo de água; paralelamente, à medida que ocorre a estabilização da matéria orgânica, decresce a DBO (PAGANINI, 1997).

Na Tabela 1, encontram-se alguns dados que possibilitam uma avaliação do poder poluidor da vinhaça, representado pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em relação a diferentes tipos de águas residuárias (NIKAIDO, 1995).

5 LIMA, U.A. A vinhaça e a bacia do rio Piracicaba. *Referata e Seminários do Instituto Zimotecnico*, Piracicaba, v.2, n.6, p. 4-5, 1995.



Tabela 1 - Valores da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para diferentes tipos de águas residuárias.

Águas residuária	DBO (mg/L)
Efluente de destilaria de álcool (vinhaça)	15 000 - 20 000
Esgotos sanitários	200 - 600
Efluente de enlatados - alimentos	500 - 2 000
Efluente de cervejarias	500 - 2000
Efluente de processamento de óleo	15 000 - 20 000
Percolado de aterros sanitários (chorume)	15 000 - 20 000
Efluente de laticínios	30 000
Fábrica de papel	500
Efluente de matadouros	30 000

Fonte: Nikaido (1995).

### 1.1 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO)

Durante o processo de decomposição da matéria orgânica presente nas águas residuárias, se forma uma gama de substâncias orgânicas. No entanto, não se faz necessário caracterizar cada uma dessas substâncias, uma vez que a multiplicidade de formas e compostos em que as mesmas podem se apresentar traria uma grande dificuldade nas análises laboratoriais. Dessa forma, são adotados métodos diretos ou indiretos para avaliar a matéria orgânica presente na amostra (PESSOA; JORDÃO, 1982).

A forma mais utilizada para se medir a qualidade de matéria orgânica presente é através da determinação da DBO. O teste indica a quantidade de oxigênio (em mg de  $O_2$  /L) necessária para a oxidação biológica de substâncias na água poluída presente em um litro da mesma, numa dada temperatura e pressão, retratando a quantidade de oxigênio requerido para estabilizar, através de processos bioquímicos (atividade microbiana), a matéria orgânica carbonácea

(AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, 1995).

### 1.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Segundo Spadotto (2002), quando não existem informações em termos de modelos matemáticos para uma determinada situação, formulações devem ser feitas baseadas em princípios teóricos e informações disponíveis.

O emprego de técnicas de regressão tem sido freqüente no uso de processos estimativos, principalmente, quando se têm variáveis de difícil determinação em termos de procedimentos metodológicos ou mesmo em relação a custos. Por exemplo, a determinação da DBO em laboratório pelo método padrão leva cinco dias. Portanto, a análise de regressão é um procedimento matemático que pode ser usado nessas situações, onde se estima uma variável (dependente) mais difícil de se determinar, em função de outra(s) variável(eis) independente(s) mais fácil(eis) de ser(em) mensurada(s). Essas variáveis independentes podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa (variáveis indicadoras).

Lima (2001) usou o modelo linear simples para estimar a DBO em função da porcentagem de urbanização. Matos et al (2003) estimaram a DBO em função da condutividade elétrica usando um modelo não-linear simples.

Quando a estimativa da variável dependente pode ser feita em função de uma única variável independente, tem-se o modelo linear simples ou não-linear simples. Nos casos em que se usam mais de uma variável independente, tem-se o modelo linear múltiplo ou não-linear múltiplo.

Nos modelos múltiplos, a seleção das variáveis independentes que permanecem na equação final pode ser feita através do procedimento stepwise (passo a passo), que se baseia nas correlações existentes entre a variável dependente e as independentes e entre as próprias variáveis independentes (DRAPER; SMITH, 1981).

Entretanto, alguns requisitos básicos, tais como: distribuição normal e independência dos erros, variância constante e não colinearidade entre as variáveis independentes devem ser considerados (KELLY; BELTZ, 1987). Quando algum(ns) desses requisitos é (são) violado(s), o uso de transformações dos dados se faz necessário (NETER; WASSERMAN; KUTNER, 1990).

Box e Cox (1964), desenvolveram uma família de transformações que pode ser usada em qualquer conjunto de dados onde a variável dependente seja positiva, sendo representada por:

$$W_i = \begin{cases} (Y_i^\lambda - 1)/\lambda & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \ln Y_i & \text{para } \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

em que:

$W_i$  = variável dependente transformada

$Y_i$  = variável dependente na forma original

Essa família depende diretamente do parâmetro  $\lambda$  que é o coeficiente de transformação dos dados.

O valor de  $\lambda$  que maximize:

$$L_{\max} \lambda = -\frac{n}{2} \cdot \ln \left( \frac{\text{SQR}}{n} \right) + (\lambda - 1) \sum_{i=1}^n \ln Y_i \quad (2)$$

Em que:

SQR = Soma de quadrados dos resíduos,

$n$  = número de observações,

$\ln$  = logaritmo neperiano,

$Y_i$  = variável resposta.

é o estimador de máxima verossimilhança de  $\lambda$  (SILVA; BAILEY, 1991).

Quando o intervalo de confiança para  $\lambda$  incluir a unidade, os dados não precisam de transformação alguma e a equação resultante deve ser considerada.

Tal transformação pode ser ajustada por métodos matemáticos iterativos da seguinte forma (SILVA et al, 1994).

$$Y_i = \left[ \lambda \left( \beta_0 + \beta_i \sum_{i=1}^n X_i \right) + 1 \right]^{1/\lambda} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Em que:

$Y_i$  = variável dependente;

$\lambda$  = coeficiente de transformação dos dados;

$\beta_0$  e  $\beta_i$  = parâmetros do modelo;

$X_i$  = variáveis independentes;

$\varepsilon_i$  = erro aleatório.

O principal objetivo do presente estudo foi utilizar modelos matemáticos lineares e não-lineares múltiplos através da análise de regressão na estimativa da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em função de variáveis de água mais facilmente determináveis em laboratório. A escolha das variáveis independentes se baseou no fato de serem usualmente consideradas na avaliação da poluição ambiental e qualidade de água, o que, necessariamente, não implica em estarem correlacionadas com a DBO.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA MONITORADA

O experimento foi conduzido em área situada a 250 metros da sede da Usina Salgado, localizada no município de Ipojuca (7° 10' e 7° 25' S, 39° 10' e 39° 30' W) no estado de Pernambuco, a 53 km da capital. A sede do município de Ipojuca está inserida na zona fisiográfica da Mata Sul de Pernambuco, caracterizando-se por apresentar um clima do tipo Ams', segundo Köppen, tropical chuvoso de monção com verão seco, com estação chuvosa entre os meses de março a agosto. A precipitação anual média na área é de 1 800 mm e a temperatura anual média é de 25,2 °C.

A área de monitoramento possui 12 ha, onde ocorrem duas classes de solos: Espodossolo Ferro Cárbico (textura arenosa) e Gleissolo Háplico (textura muito argilosa). Foram instalados 30 poços de observação com profundidades de 3 m, distribuídos em transectos paralelos, distanciados entre si de 100 m. Três poços, por se localizarem juntos à lagoa de estabilização da vinhaça, portanto, com características diferentes dos demais, não foram considerados neste estudo. Três coletas de água do lençol freático foram efetuadas e, além da DBO, mais 11 parâmetros de qualidade de água foram analisados e utilizados nas análises de regressão como variáveis independentes. Foram eles:

a) Demanda química de oxigênio (DQO): mede a quantidade de oxigênio (em mg de O<sub>2</sub>/L) consumida pela matéria orgânica e inorgânica existente na água e oxidáveis por um agente químico oxidante forte. É uma medida

importante no controle de qualidade de rios e plantas de tratamento de esgotos. O valor obtido é, portanto, uma indicação indireta do teor de matéria orgânica presente.

- b) Condutividade elétrica (CE): a condutividade representa a habilidade de um sistema aquoso em conduzir corrente elétrica e irá depender da presença e concentração de íons, temperatura, quantidade de sais dissolvidos, mobilidade e valência dos íons. É um parâmetro muito empregado no monitoramento da qualidade de águas e de águas residuárias, porque pode ser relacionada com o teor de sólidos dissolvidos.
- c) Sólidos dissolvidos totais (SDT): é a quantidade de material sólido dissolvido na água.
- d) Bicarbonatos (BICAR): representa a capacidade que um sistema aquoso possui de neutralizar ácidos.
- e) Cloretos (CLORE): íons resultantes da dissolução de minerais e intrusão de água salina. Por origem antropogênica, pode ser oriundo de despejos domésticos, industriais e águas utilizadas em irrigação.
- f) Sódio (Na): um dos íons mais importantes nos cursos de águas e contribui para a salinização dos solos.
- g) Potássio (K): apesar de não ser um elemento comumente analisado na determinação da qualidade de água, foi incluído em função da dose da aplicação da vinhaça usada na fertirrigação ser definida a partir do teor de potássio na mesma.



- h) Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg): principais íons que contribuem para a dureza da água.
- i) Nitrato (NITRA): é a mais alta forma de oxidação dos compostos nitrogenados. É comumente encontrado em águas de superfícies e subterrâneas, em virtude de ser o produto final da decomposição aeróbica de matéria orgânica nitrogenada.
- j) Nitrito (NITRI): é um íon instável e corresponde a um estágio intermediário do ciclo do nitrogênio, sendo formado na água pela oxidação da amônia ou redução do nitrato.
- k) Potencial hidrogeniônico (pH): representa a concentração de íons hidrogênio, em escala antilogarítmica, indicando a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água.

As definições acima estão em Von Sperling (1996) e Bartram e Ballance (2001). Todas determinações das variáveis independentes foram realizadas segundo American Public Health Association - APHA (1995), e os códigos entre parênteses correspondem aos utilizados nos modelos matemáticos.

Quanto à demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que corresponde à concentração da matéria orgânica biodegradável, foi determinada pelo teste dos frascos padrões com incubação a 20°C durante 5 dias (APHA, 1995). Para cada amostra foram calculados os percentuais de concentração para proceder às diluições levando em consideração os valores da DQO já determinados.

Em quatro frascos, com capacidade de, aproximadamente, 300 mL, foram colocadas alíquotas das amostras e preenchido o restante com água de diluição. Para cada amostra foram efetuadas duas diluições. O oxigênio dissolvido foi, imediatamente, determinado em dois frascos e os dois restantes foram levados à incubadora de DBO a 20° C por um período de cinco dias. A concentração de oxigênio dissolvido foi determinada pelo método de Winkler com a modificação da azida (APHA, 1995).

Realizadas as determinações referentes às demandas bioquímicas de oxigênio (DBO), por classe de solo, nem todos os pontos monitorados obtiveram resultados em virtude de algumas amostras terem sido desconsideradas tendo em vista a quantidade de diluições realizadas nas determinações não serem suficientes ou ficarem com a porcentagem de oxigênio consumido abaixo de 30% ou acima de 70% (BRAILE; CAVALCANTI, 1979). Ao final das três coletas, após análises laboratoriais, foram consideradas 29 amostras para o Espodossolo Ferro Cárbico (textura arenosa) e 27 amostras para o Gleissolo Háplico (textura muito argilosa).

## 2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os modelos testados foram:

a) Modelo linear múltiplo

$$DBO = \beta_0 + \beta_i \sum_{i=1}^n X_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

b) Modelo não-linear múltiplo com a transformação de Box e Cox (1964)

$$DBO = [\lambda(\beta_0 + \beta_i \sum_{i=1}^n X_i) + 1]^{(1/\lambda)} + \varepsilon_i \quad (5)$$

c) Modelo não linear múltiplo

$$DBO = \beta_0 \prod_{i=1}^n X_i^{\beta_i} \varepsilon_i \quad (6)$$

Em que:

DBO = variável dependente (resposta);

$\beta_0, \beta_i$  = parâmetros dos modelos;

$X_i$  = variáveis independentes;

$\lambda$  = coeficiente de transformação dos dados;

$\varepsilon_i$  = erro aleatório;

$i = 1, \dots, n$ .

A seleção das variáveis independentes nas equações finais foi processada através do método Stepwise (passo a passo), considerando o nível de 1% de probabilidade para que a variável fosse incluída na equação final.

As comparações entre os modelos foram feitas pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e através do Índice de Ajuste (IA) (SCHLAEGEL, 1981), que é expresso por:

$$I.A. = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

Em que:

$Y_i$  = valor observado da variável resposta;

$\hat{Y}_i$  = valor estimado pela equação;

$\bar{Y}$  = média aritmética da variável resposta.

Nos modelos lineares o I.A. =  $R^2$  (coeficiente de determinação).

Primeiramente, os modelos foram ajustados para cada classe de solo, isoladamente. Em seguida foram ajustados para todos os dados em conjunto, considerando as classes de solos como

variável indicadora (S). Quando o solo era Espodossolo Ferro Cárbico (textura arenosa) recebia o valor 1 e, no caso contrário, 0.

O programa computacional SAS - Statistical Analysis System (SAS INSTITUTE, 1999), versão 8.0 foi utilizado para realização das análises estatísticas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ESPODOSSOLO FERRO CÁRBICO (TEXTURA ARENOSA)

Primeiramente, foi ajustado o modelo linear múltiplo (1), considerando todas as variáveis independentes, sendo que os resultados para as estimativas dos parâmetros do modelo estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes do modelo linear múltiplo e respectivos níveis de probabilidade para o Espodossolo Ferro Cárbico.

Variáveis	Coeficientes	Nível de probabilidade
Constante ( $\beta_0$ )	3,10062	0,65706
DQO	0,09012	0,00001
CE	0,07468	0,00044
SDT	-0,13696	0,00056
BICAR	-0,06221	0,00075
CLOR	-0,00009	0,94183
Na	-0,02997	0,15572
K	0,02033	0,04825
Ca	-0,00782	0,89042
Mg	-0,50126	0,07893
NITRA	4,36007	0,25896
NITRI	-11,84461	0,42807
pH	0,81724	0,57508

$R^2 = 0,97153$



Com a aplicação do Stepwise no modelo (4), resultou a seguinte equação:

$$\hat{D}\hat{B}O = 5,03088 + 0,08114DQO + 0,05357CE - 0,10372SDT - 0,04453BICAR + 0,02039K \quad (8)$$

$$R^2 = 0,95724$$

e com a transformação de Box e Cox, a partir do modelo (5), foi:

$$\hat{D}\hat{B}O = [1,35863 (1,94602 + 0,23493DQO + 0,17936CE - 0,35890SDT - 0,11754BICAR + 0,06539K) + 1]^{(1/1,35863)} \quad (9)$$

ou

$$\hat{D}\hat{B}O = (3,64392 + 0,31918DQO + 0,24368CE - 0,48761SDT - 0,15969BICAR + 0,08888K)^{0,73604} \quad (10)$$

$$I.A. = 0,96165 \text{ e } 1,00199 \leq \lambda \leq 1,71528$$

Como a estimativa de  $\lambda$ , não inclui o valor 1, indica que a transformação foi significativa, mesmo que o incremento no I.A. foi de apenas 0,441%.

Aplicando-se o modelo não-linear (3), resultou a seguinte equação:

$$DBO = 0,09048DQO^{0,62979}CE^{2,10303}SDT^{-1,79798}BICAR^{-0,30429}K^{0,04427} \quad (11)$$

$$I.A. = 0,95464$$

Observa-se que os três modelos testados apresentaram excelentes ajustes. No entanto, para o Espodossolo Ferro Cárbico (textura arenosa) a equação (10) por apresentar o maior Índice de Ajuste deve ser usada, onde se observa que a DBO é diretamente proporcional a DQO, CE e K e inversamente proporcional a SDT e BICAR.

### 3.2 GLEISSOLO HÁPLICO (TEXTURA MUITO ARGILOSA)

Considerando todas as variáveis independentes no modelo linear múltiplo (4), foram observados os resultados para as estimativas dos parâmetros do modelo apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes do modelo linear múltiplo e respectivos níveis de probabilidade para o Gleissolo Háplico.

Variáveis	Coeficientes	Nível de probabilidade
Constante ( $\beta_0$ )	1,75663	0,75442
DQO	0,08358	0,00001
CE	0,01581	0,15626
SDT	-0,02527	0,21270
BICAR	-0,01043	0,35194
CLOR	0,00064	0,69207
Na	-0,00173	0,83250
K	-0,01198	0,41735
Ca	0,16713	0,00398
Mg	-0,61273	0,00821
NITRA	-0,96719	0,55121
NITRI	9,98119	0,45047
pH	0,07597	0,95113

$$R^2 = 0,93628$$

Com a aplicação do stepwise a equação linear múltipla resultante foi:

$$\hat{D}\hat{B}O = 3,51253 + 0,08781DQO + 0,14973Ca - 0,45917Mg \quad (12)$$

$$R^2 = 0,91899$$

e com a transformação de Box e Cox:

$$\hat{D}\hat{B}O = [0,94756(2,76842 + 0,07505DQO + 0,12999Ca - 0,40375Mg) + 1]^{(1/0,94756)} \quad (13)$$



$$\hat{D}\hat{B}O = (3,62324 + 0,07111DQO + 0,12317CA - 0,38258MG)^{1,05534} \quad (14)$$

$$I.A. = 0,91919 \text{ e } 0,44616 \leq \lambda \leq 1,44895$$

O intervalo de confiança de  $\lambda$  inclui o valor 1, mostrando que não há necessidade do uso da transformação de Box e Cox aos dados.

Aplicando-se o modelo não-linear (6), resultou a seguinte equação:

$$\hat{D}\hat{B}O = 0,38211DQO^{0,71547}Ca^{0,18253}Mg^{-0,15678} \quad (15)$$

$$I.A. = 0,89924$$

Então, para o Gleissolo Háplico (textura muito argilosa), a equação (12) é a selecionada, uma vez que o incremento proporcionado pela transformação de Box e Cox não foi significativo.

Observa-se que só a variável DQO está presente nas duas classes de solos, sendo que as demais quando presentes na equação final de uma classe de solo estão ausentes na outra.

### 3.3 ANÁLISE CONJUNTA PARA AS DUAS CLASSES DE SOLOS

Considerando todas as variáveis independentes no modelo linear múltiplo, incluindo as classes de solos (S), observaram-se os resultados para as estimativas dos parâmetros no modelo apresentados na Tabela 4.

Com a aplicação do stepwise a equação linear múltipla resultante foi:

$$DBO = 5,06784 + 0,07147 DQO + 0,02332 CE - 0,04047 SDT - 0,01873 BICAR + 0,14416 Ca - 0,50106 Mg \quad (16)$$

$$R^2 = 0,90823$$

Tabela 4 - Coeficientes do modelo linear múltiplo e respectivos níveis de probabilidade, conjuntamente para o Espodossolo Ferro Cárstico e Gleissolo Háplico.

Variáveis	Coeficientes	Nível de probabilidade
Constante ( $\beta_0$ )	5,15365	0,30529
DQO	0,07287	0,00001
CE	0,02383	0,00156
SDT	-0,04529	0,00133
BICAR	-0,02271	0,00034
CLOR	0,00041	0,66896
Na	-0,00019	0,98153
K	0,00995	0,06565
Ca	0,11933	0,00031
Mg	-0,38893	0,00665
NITRA	0,26642	0,84577
NITRI	6,13365	0,46451
pH	-0,07112	0,094459
S	-1,05633	0,36267

$$R^2 = 0,92117$$

Aplicando-se a transformação de Box e Cox a equação não linear, obteve-se:

$$\hat{D}\hat{B}O = [1,04205 (3,94257 + 0,08081 DQO + 0,02627 CE - 0,04587 SDT - 0,02024 BICAR + 0,16549 Ca - 0,56319 Mg) + 1]^{(1/1,04205)} \quad (17)$$

ou

$$\hat{D}\hat{B}O = (5,10836 + 0,08421 DQO + 0,02737 CE - 0,04780 SDT - 0,02109 BICAR + 0,17245 Ca - 0,58987 Mg)^{0,95965} \quad (18)$$

$$I.A. = 0,90835 \text{ e } 0,70275 \leq \lambda \leq 1,38135$$

Mais uma vez o intervalo de confiança de  $\lambda$  incluiu o valor 1, indicando a não necessidade do uso da transformação de Box e Cox.

Assim, a aplicação do modelo não linear resultou em:

$$\text{DBO} = 0,12443 \text{ DQO}^{0,67628} \text{ CE}^{1,41482} \text{ SDT}^{-1,22930} \text{ BICAR}^{-0,17227} \text{ Ca}^{0,17237} \text{ Mg}^{-0,15863} \quad (19)$$

$$\text{I.A.} = 0,91203$$

Para a análise das classes de solos em conjunto, constatou-se que a variável indicadora S, que se refere exatamente à classe de solo, não foi significativa, selecionando-se a equação (19). Em todos os casos estudados com os dados em conjunto, os ajustes foram inferiores aos considerados individualmente por classe de solo.

Observa-se que as variáveis DQO, CE, SDT, BICAR, K, Ca e Mg que foram selecionadas nas diferentes equações, apenas a DQO esteve presente nas três situações consideradas, uma vez que é uma medida de toda matéria presente na amostra, isto é, orgânica e inorgânica, possuindo, portanto, um alto grau de associação com a DBO que representa a parte biodegradável da amostra.

Segundo Esteves<sup>6</sup> (1988 citado por LIMA, 2001), a condutividade elétrica (CE), por fornecer informações sobre o metabolismo do ecossistema aquático, em relação à produção primária (redução de valores) e sobre decomposição (aumento de valores), pode justificar sua presença nas equações de forma diretamente proporcional a DBO, tendo em vista que aumentos em seus valores indicam processo de decomposição da matéria orgânica pelos microorganismos, resultando em maior

consumo de oxigênio do meio aquático, o que proporciona um incremento na DBO.

Com relação ao potássio (K), sua presença de forma diretamente proporcional com a DBO, pode ser em virtude da vinhaça possuir em sua composição média 74,85% dos constituintes sólidos formados por substâncias orgânicas e 63,97% dos constituintes minerais serem constituídos por potássio (HOROWITZ, 1988). Isto indica que, em virtude da presença do efluente, o teor de potássio evidencia indiretamente a presença de elevado percentual de matéria orgânica, na forma biodegradável, e, conseqüentemente, aumento da atividade microbiana. O fato desta variável não ter sido selecionada na equação do Gleissolo Háptico pode ser decorrente da mudança de textura do solo, que provoca maior retenção do efluente pelos colóides do solo.

Com relação às diferenças nas presenças das outras variáveis nas diferentes situações, pode-se inferir que essas também dependem das características das classes de solos e associação com a atividade microbiana. Por outro lado, justificativas puramente estatísticas são muito complexas, pois o processo de seleção de variáveis utilizado (stepwise) leva em consideração todas as correlações existentes entre as variáveis dependente e independentes e entre essas últimas, o que pode resultar em seleção de variáveis difíceis de serem explicadas quimicamente, e que vem a corroborar as afirmativas de Bollmann e Marques (2000).

<sup>6</sup> ESTEVES, F.A. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência/Finep, 1988. 575p. (Oecologia Brasiliensis, v. 1).



## 4 CONCLUSÃO

A DBO pode ser estimada com boa precisão através de modelos matemáticos que incluam variáveis independentes de fácil mensuração quando comparadas com as determinações usuais realizadas em laboratório.

Os modelos não-lineares mostraram-se mais eficientes na estimativa da DBO.

A análise conjunta das classes de solos mostrou-se menos precisa quando comparada às análises realizadas para cada classe de solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington, DC: American Public Health Association: American Water Works Association: Water Pollution Control Federation, 1995. 1432 p.
- BARTRAM J.; BALLANCE, R. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. London: UNEP/WHO, 2001. 383 p.
- BENKE, B.B. *Characterization and interaction of sugarcane industry residues with soil, kaolinite and Fe-oxides*. 1998. 139 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - University of Saskatchewan, Ottawa, 1998.
- BOLLMANN, H.A.; MARQUES, D.M. Bases para estruturação de indicadores de qualidade de águas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n.1, p. 37-60, jan./mar. 2000.
- BOX, G.E; COX, D.R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, London, B-26, p. 211-243, 1964.
- BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.A. *Manual de tratamento de águas residuárias industriais*. São Paulo: CETESB, 1979. 763 p.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: J. Wiley, 1981. 709 p.
- FREIRE, W.J.; CORTÊZ, L.A.B. *Vinhaça de cana-de-açúcar*. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.
- HOROWITZ, A. *O estado do potássio no vinhoto: resumo da Semana de Química (Fundamental e Tecnológica)*. Recife: UFPE, 1988. 16 p.
- KELLY, J.F.; BELTZ, R.C. *A comparison of tree volume estimation models for forest inventory*. Washington, D.C: USDA. Forestry Service, 1987. 233p. (Research Paper, 50).
- LIMA, E.B.N.R. *Modelação integrada para gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá*. 2001. 206 p. Tese (Doutorado) - UFRJ, Rio de Janeiro.
- MATOS, A.T. de; PINTO, A.B.; PEREIRA, O.G.; SOARES, A.A.; MONACO, P.A. Produtividade de forrageiras de tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.1, p. 154-158, 2003.
- NETTER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M.H. *Applied linear models: regression, analysis of variance and experimental designs*. 3th ed. Boston: Richard D. Irwin, 1990. 1181p.
- NIKAIDO, H. Environmental applications. In: MICROBIAL biotechnology. New York: W.H. Freeman, 1995. p. 561-620.
- PAGANINI, W.S. *Disposição de esgoto no solo (escoamento à superfície)*. São Paulo: AESABESP, 1997. 232p.
- PESSOA, C.A.; JORDÃO, E.P. *Tratamento de esgotos domésticos - concepções clássicas de tratamento de esgotos*. Rio de Janeiro: ABESAL, 1982. 536p.
- SAS INSTITUTE. *Statistical Analysis System*. Cary, 1999.

SCHLAEGEL, B.E. Testing, reporting, and using biomass estimation models. In: FOREST BIOMASS WORKSHOP, 1981, Georgetown. *Proceedings...* Georgetown, 1981. p. 95-112.

SILVA, J.A.A.; BAILEY, R.L. Uso de transformações normalizadoras no ajuste de modelos volumétricos. *Revista Árvore*, Viçosa (MG), v. 15, n. 12, p. 199-206, 1991.

SPADOTTO, C.A. *Modeling pesticide movement in soils*. Jaguariúma: Embrapa Meio Ambiente, 2002. 36 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documento, 31).

VIERA, D.B. *As técnicas de irrigação*. Rio de Janeiro: Globo, 1986. 263 p.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico das águas. In: INTRODUÇÃO à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. Belo Horizonte: UFMG/DESA, 1996, v. 1.