

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ESCOLHA DOS NÍVEIS NUTRICIONAIS NA DETERMINAÇÃO  
DO NÍVEL-ÓTIMO E NO AJUSTE DE MODELOS  
ESTATÍSTICOS UTILIZADOS EM ENSAIOS DOSE-RESPOSTA**

**Fernando Augusto de Souza**  
Zootecnista

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL  
Fevereiro de 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ESCOLHA DOS NÍVEIS NUTRICIONAIS NA DETERMINAÇÃO  
DO NÍVEL-ÓTIMO E NO AJUSTE DE MODELOS  
ESTATÍSTICOS UTILIZADOS EM ENSAIOS DOSE-RESPOSTA**

**Fernando Augusto de Souza**

Orientador: Prof. Dr. Euclides Braga Malheiros

Resultados apresentados à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Zootecnia (Produção Animal)

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Fevereiro de 2010

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**FERNANDO AUGUSTO DE SOUZA** – nascido em Itapeva-SP em 17/08/1984, morou em Morrinhos-GO até os 15 anos e em 2002 cursou Ciências Sociais na FFLCH-USP, porém não concluiu o curso, ingressando em 2003 no curso de Zootecnia da FCAV-Unesp Jaboticabal. Trabalhou na graduação com Instalações Zootécnicas no Depto. de Engenharia Rural e com parasitologia animal no CPPAR, no qual foi bolsista CNPq-Pibic, com o projeto intitulado “Viabilidade da transmissão sexual do *toxoplasma gondii* em ovinos (*ovis aries*)”. Realizou estágio curricular na Perdigão Agroindustrial S.A., em Videira-SC e em 2008 ingressou no curso de mestrado em Zootecnia na FCAV-Unesp, se dedicando a estudar modelos estatísticos utilizados em ensaios dose-resposta, sob orientação do Prof. Euclides Braga Malheiros do depto. de Ciências Exatas.

**OFEREÇO,**

**À Deus, Pai, Filho e Espírito Santo,**

**À Maria Santíssima,**

**Este trabalho e toda a minha vida.**

“Senhor, fazei-me instrumento de vossa paz.  
Onde houver ódio, que eu leve o amor;  
Onde houver ofensa, que eu leve o perdão;  
Onde houver discórdia, que eu leve a união;  
Onde houver dúvida, que eu leve a fé;  
Onde houver erro, que eu leve a verdade;  
Onde houver desespero, que eu leve a esperança;  
Onde houver tristeza, que eu leve a alegria;  
Onde houver trevas, que eu leve a luz.  
Ó Mestre, Fazei que eu procure mais  
Consolar, que ser consolado;  
compreender, que ser compreendido;  
amar, que ser amado.  
Pois, é dando que se recebe,  
é perdoando que se é perdoado,  
e é morrendo que se vive para a vida eterna.”  
(São Francisco de Assis)

**DEDICO**

**Aos meus pais, Wilson Raimundo de Souza e Silvia Marcia Garcia de Souza,**

**Minha madrinha Maria Devani Moura Paglione (segunda mãe),**

**Às mulheres da minha vida, minha irmã Daniela Garcia de Souza,**

**E minha namorada, Erika Christina Lara,**

**Seus pais, Jackson e Cristina e a Dona Ilda,**

**À todos meus tios e primas que sempre torceram por mim!**

## **AGRADECIMENTOS**

A FCAV-Unesp Jaboticabal por todas as minhas realizações profissionais, desde a graduação e pela oportunidade do curso de mestrado;

À CAPES pela bolsa de estudo que possibilitou realizar esta curso;

Ao professor Euclides Braga Malheiros, em especial, pela dedicação, compreensão e pela oportunidade, sem a qual nada poderia ser feito, além de todo precioso ensinamento que soube, com muita paciência, transmitir;

À professora Nilva Kazue Sakomura, que soube repassar de modo louvável para seu livro “Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos” e pessoalmente grande parte de seu conhecimento sobre ensaios dose-resposta e por participar da minha banca contribuindo significativamente em todo o meu mestrado;

Ao professor Antonio Carlos de Laurentiz, que se esforçou muito para participar de minha banca e por toda sua contrição;

À professora Ana Claudia Ruggieri, coordenadora do programa de pós-graduação, pela paciência e dedicação em todos os momentos;

Aos funcionários do depto. de Ciências Exatas, em especial ao Kyoto, Juliana, Zezé e Shirlei, pelo companheirismo e auxílio nos momentos difíceis;

À todas(os) as(os) funcionárias(os) da biblioteca, por terem sido tão pacientes e compreensivas(os) durante esses dois anos;

Aos funcionários da seção de Pós-graduação por toda a ajuda e conselho;

A todos da equipe da professora Nilva, em especial ao doutorando Jéferson da Costa Siqueira que contribuiu com os dados e me auxiliou em diversos momentos;

Á Perdigão, em especial aos Zootecnistas Dr. Marcelo Piassi e Dr. Uislei Antonio Dias Orlando, pelo auxílio e incentivo à pesquisa;

À minha namorada Erika Christina Lara que sempre me deu apoio e esteve do meu lado nos momentos bons e nos mais difíceis da realização deste trabalho;

Ao grande amigo Miguel F. F. Alacon (Dunga) que compartilhou os melhores e piores momentos ao meu lado;

Ao grande amigo Pe. Marcelo Adriano Cervi, que além da valiosa amizade soube sempre ouvir e aconselhar no momento certo;

Aos amigos Kléber (Kojake), Moreno, Caubi, Bago, Akidauanus, Passivo, Hebe, Vurto, Mamaki, Elfo, Pistolinha pelos grandes momentos e contribuições;

Eu não seria justo se me limitasse a agradecer somente às pessoa descritas acima, porém, peço profundo perdão pelos que não estão citei e aproveito para agradecer-lhes por tudo!

### **À todos os meus amigos**

"Era uma vez um pequeno príncipe que habitava um planeta pouco maior que ele,  
e que tinha necessidade de um amigo...

Para aqueles que compreendem a vida, isto  
pareceria sem dúvida muito mais verdadeiro.

Os homens não têm mais tempo de conhecer coisa alguma.

Compram tudo prontinho nas lojas.

Mas como não existem lojas de amigos,  
os homens não têm mais amigos.

Se tu queres um amigo, cativa-me!

Os campos de trigo não me lembram coisa alguma.

E isso é triste. Mas tu tens cabelos cor de ouro.

Então será maravilhoso quando me tiveres cativado.

O trigo, que é dourado, fará lembrar-me de ti.

E eu amarei o barulho do vento no trigo ...

(Antoine de Saint-Exupèry)

## ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	v
RESUMO.....	vi
SUMMARY .....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
<i>Linear response plato (LRP)</i> .....	7
<i>Polinomial Quadrático</i> .....	9
<i>Modelos não-lineares</i> .....	10
<i>Combinação do Modelo Quadrático com o LRP</i> .....	12
<i>Aplicação dos modelos</i> .....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1. Considerações Gerais.....	16
3.2. Influência da Heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação nível-ótimo .	18
3.3. Influência do número de níveis experimentais e suas posições no ajuste dos modelos e na estimativa do nível-ótimo.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
4.1. Influência da Heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação nível-ótimo .	23
4.2. Influência do número e posição dos níveis no ajuste dos modelos e na estimativa do nível-ótimo.....	26
4.2.1. Situação base - 5 níveis experimentais.....	26
4.2.2. Situações com quatro níveis experimentais.....	28
4.2.3. Situações com três níveis experimentais .....	42
4.2.3. Combinação do modelo Quadrático com o LRP (LRP+QD).....	51
6. CONCLUSÕES.....	56
7. IMPLICAÇÕES .....	57
8. ANEXOS.....	58
9. REFERÊNCIAS .....	60

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Exigências de lisina digestível, para frangos machos de 22-42 dias de idade, de acordo com a linhagem comercial e parâmetro avaliado. ....	15
Tabela 2 – Dados utilizados para se verificar a influência da heterocedasticidade, com as respectivas médias e variâncias para cada situação. ....	20
Tabela 3 - Situações simuladas e os respectivos níveis experimentais. ....	22
Tabela 4 - Nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV); soma dos quadrados dos desvios (SQD) e p-valor para as distintas situações. ....	24
Tabela 5 – Equações ajustada aos dados das situações com heterocedasticidade (S1, S2 e S3) e da situação com homocedasticidade (S4). ....	25
Tabela 6 – Equações de regressão ajustadas para a situação com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD). ....	26
Tabela 7 – Equações de regressão ajustadas para as situações com quatro e com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD). ....	29
Tabela 8 – Equações de regressão ajustadas para as situações com três e com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD). ....	43
Tabela 9 – Equações e níveis-ótimos (NO) estimados para a combinação do modelo LRP+QD, em todas as situações com 5, 4 e 3 níveis. ....	52



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um modelo LRP. ....	8
Figura 2 – Combinação do modelo LRP e o modelo Quadrático. ....	12
Figura 3 - Situações simuladas para verificar a influência da heterocedasticidade.....	19
Figura 4 - Níveis nutricionais reais, com o desvio padrão e repetições simulados.....	21
Figura 5 - Representação gráfica dos modelos estudados para a situação com cinco níveis experimentais e suas médias com o desvio padrão.....	27
Figura 6 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo quadrático para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.....	30
Figura 7 – Representação gráfica do modelo quadrático para as situações 4S1, 4S5 e com cinco níveis. ....	31
Figura 8 - Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo exponencial para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.....	33
Figura 9 - Representação gráfica do modelo exponencial ajustado para as situações 4S1, 4S5 e com cinco níveis. ....	34
Figura 10 - Variação nos valores do nível-ótimo obtidos pelo modelo LRP para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.....	36
Figura 11 - Representação gráfica do modelo LRP ajustado para as situações 4S1, 4S3 e com os cinco níveis. ....	38
Figura 12 - Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo QRP para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.....	39
Figura 13 – Representação gráfica e equações da situação com cinco níveis e da situação 4S3.....	40
Figura 14 - Representação gráfica do modelo QRP ajustado para as situações 4S1, 4S3 e com os cinco níveis.....	41

Figura 15 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido nas situações com três níveis e com cinco níveis utilizando o modelo quadrático.....	44
Figura 16 – Representação gráfica das situações 3S1-2, 3S3-5 e 3S1-3, com a média e o desvio padrão de cada nível.....	45
Figura 17 – Variação nos valores do nível-ótimo para o modelo LRP nas situações com três níveis e com cinco níveis.....	47
Figura 18 – Representação das situações 3S4-5, 4S4 e a situação com cinco níveis, com a média e o desvio padrão. ....	48
Figura 19 – Representação das situações 4S1, 3S1-5, 4S3 e 3S3-5. ....	50
Figura 20 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido pela combinação do modelo quadrático com o LRP para todas as situações experimentais. ....	53
Figura 21 – Representação da combinação do LRP+QD para situação 3S1-4. ....	54
Figura 22- Representação das situações 3S2-3 e 3S2-4 para a combinação do modelo quadrático com o LRP. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS

**R<sup>2</sup>** – Coeficiente de determinação

**R<sup>2</sup>aj** – Coeficiente de determinação ajustado

**CV** – Coeficiente de variação

**SQD** – Soma dos quadrados dos desvios

**SQM** – Soma dos quadrados do modelo

**SQT** – Soma dos quadrados totais

**QMD** – Quadrado médio do desvio

**LRP** – Modelo linear com resposta em platô (*Linear response plato*)

**QD** – Modelo polinomial quadrático

**EXP** – Modelo exponencial

**QRP** – Modelo quadrático com resposta em platô (*Quadratic response platô*)

**LRP+QD** – Combinação dos modelos LRP e QD

**NO** – Nível-ótimo

**GP** – Ganho de peso

**CA** – Conversão alimentar

## ESCOLHA DOS NÍVEIS NUTRICIONAIS NA DETERMINAÇÃO DO NÍVEL-ÓTIMO E NO AJUSTE DE MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS EM ENSAIOS DOSE-RESPOSTA

**RESUMO** – Este trabalho avaliou a influência da heterocedasticidade e dos níveis nutricionais (número e posição) utilizados em ensaios dose-resposta, na estimativa do nível-ótimo e no ajuste dos modelos, além de verificar o quão informativas são as estatísticas utilizadas para avaliar a precisão do ajuste ( $R^2$ ,  $R^2$  ajustado, CV e SQD). Utilizaram-se dados dos experimentos realizados por Nascimento *et al.* (2007) e Siqueira (2009) e dados simulados. Constatou-se que, quando os níveis estiveram distribuídos próximos do verdadeiro requerimento, os modelos com platô proporcionaram resultados mais confiáveis. Já os modelos quadrático e exponencial se mostraram mais adequados para situações no qual os níveis estão mais dispersos em relação ao verdadeiro requerimento. A heterocedasticidade não interferiu na estimativa do nível-ótimo, porém influenciou no ajuste dos modelos e proporcionou pequenas mudanças nos parâmetros das equações obtidas. O coeficiente de determinação (ajustado e não ajustado) foi diretamente influenciado pela definição do nível mais próximo do ótimo e dos níveis extremos, enquanto que, o coeficiente de variação e a soma dos quadrados dos desvios, pelos níveis iniciais e pelo nível próximo do ótimo. A soma dos quadrados dos desvios demonstrou ser mais sensível, pois seu valor apresentou pequenas variações entre os modelos nas diferentes situações, que as outras estatísticas não detectaram. Ressalta-se a importância de se estabelecer corretamente o intervalo dos níveis estudados para que a dispersão dos valores do nível-ótimo estimado seja minimizada e que o ajuste seja satisfatório, independente do modelo utilizado.

**Palavras-chave:** análise de regressão, ensaios dose-resposta, heterocedasticidade, níveis nutricionais, LRP.

## THE CHOICE OF NUTRITIONAL LEVELS IN DETERMINATION OF OPTIMAL-LEVEL AND ADJUSTMENT OF STATISTICAL MODELS USED IN DOSE-RESPONSE TRIALS

**SUMMARY** – This work evaluated the influence of heteroskedasticity and the nutritional levels (number and position) used in dose-response trials to estimating the optimal-level and the adjustment of the models, also check how informative are the statistics used to evaluate the accuracy of fit ( $R^2$ ,  $R^2$  adjusted, CV and SQD). The data used in this experiment are from Nascimento *et al.* (2007) and Siqueira (2009) trials and simulated data. It was found that when levels were distributed close to the real requirement, the models with plateau have provided more reliable results. Since the quadratic and exponential models were more suitable for situations in which the levels are more dispersed about the real requirement. The heteroskedasticity did not affect the estimate of the level-optimal, but influenced the adjustment of the models and provided small changes in the parameters of the equations obtained. The coefficient of determination (adjusted and unadjusted) was directly influenced by the definition of the level closest to the optimum and extreme levels, while the coefficient of variation and the sum of squares of deviations were influenced by the initial levels and the level close to the optimum. The sum of squares of deviations was more sensitive, because its value showed small variations between models in different situations that the other statistics did not detect. Emphasized the importance to precisely define the range of levels studied to the dispersion of the obtained optimal-level is minimized and the fit is satisfactory regardless of the model.

**Keywords:** regression analysis, dose-response trials, heteroskedasticity, nutritional levels, LRP.

## 1. INTRODUÇÃO

O grande avanço na produção avícola brasileira após a década de 80, só foi possível graças ao desenvolvimento tecnológico e científico pelo qual o setor passou. Houve o melhoramento genético de linhagens, o incremento de novas tecnologias empregadas nas construções, tanto em relação à ambiência, quanto à utilização de materiais alternativos nas granjas, melhorias sanitárias e melhorias nutricionais, com um conhecimento maior das matérias-primas utilizadas e das exigências dos animais.

O método dose-resposta tem sido amplamente utilizado para determinar as exigências nutricionais ou níveis ótimos de nutrientes para frangos de corte. Para sua aplicação, faz-se uso de modelos de regressão que estimam a quantidade do nutriente em estudo com base nos níveis de inclusão desse nutriente na dieta e a resposta, no desempenho do animal.

Para o ajuste dos modelos de regressão, é necessário de que o número de níveis nutricionais estudados não seja inferior ao número de parâmetros do modelo. Devem-se atender, também, as pressuposições básicas, ou seja: que os erros tenham distribuição normal e que as variâncias das repetições para cada nível sejam homogêneas (homocedasticidade).

Na área de nutrição animal, apesar do amplo uso de ensaios dose-resposta para se determinar níveis ótimos de nutrientes, não há na literatura trabalhos que forneçam informações sobre o comportamento dos modelos estatísticos na estimativa do nível-ótimo, quando se utilizam um número maior ou menor de níveis, assim como a escolha dos níveis no ajuste dos modelos.

Observa-se, também, que a homocedasticidade nem sempre é testada e/ou verificada em experimentos com animais. A influência da heterocedasticidade na estimativa do nível-ótimo de um determinado nutriente precisa ser avaliada.

Os objetivos desse trabalho foram:

- Verificar se situações com heterocedasticidade podem influenciar na determinação do nível-ótimo e no ajuste dos modelos;

- Verificar como o número e a posição dos níveis estudados podem influenciar na estimativa do nível-ótimo e no ajuste dos modelos;

- Verificar o quão informativas são as estatísticas utilizadas para avaliar a precisão do ajuste e/ou comparar os modelos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com frangos de corte para se determinar as exigências nutricionais e o nível-ótimo de inclusão de nutrientes em rações para diferentes idades, sexos e linhagens, com o objetivo de obter um produto final de menor custo e uma ração que permita o máximo aproveitamento do potencial genético da ave (RUNHO *et al.*, 2001).

Ao se avaliar as exigências nutricionais e doses ótimas de nutrientes para frangos objetiva-se, teoricamente, alcançar o potencial biológico máximo da ave com o uso de dietas que supram adequadamente todas as necessidades nutricionais e energéticas, sem que haja excesso ou falta do nutriente. Na obtenção do nível-ótimo, consideram-se além das exigências nutricionais, fatores econômicos e produtivos.

A interpretação da resposta dos animais em ensaios dose-resposta tem sido por meio de equações de regressão, pois os testes de comparação múltipla ou testes de médias demonstram ser inadequados para se estimar o nível-ótimo de um nutriente. EUCLYDES e ROSTAGNO (2001) salientam que a pressuposição básica para se realizar tais testes é a independência entre os tratamentos e, no caso de experimentos dose-resposta, há uma dependência entre os níveis nutricionais e a resposta esperada é a observada no nível anterior acrescida ou reduzida de um valor.

SAKOMURA e ROSTAGNO (2007) ressaltam que uma das finalidades de experimentos do tipo dose-resposta consiste em determinar as exigências nutricionais dos animais com base em suas respostas de desempenho. Para isto, as dietas são formuladas de modo que se isole apenas o efeito do nutriente avaliado. Nestes experimentos, as dietas são formuladas de modo completo com exceção do nutriente em estudo, que é adicionado em níveis crescentes pré-determinados, considerando as respostas de desempenho das aves como determinante primário do requerimento (LAMBERSON e FIRMAN, 2002). Tais procedimentos resultam em curvas estimadas experimentalmente por meio de análises de regressão, caracterizadas por um



incremento no desempenho, seguidas de uma tendência de estabilização no crescimento (GOUS, 1986).

Segundo MORRIS (1999), de um modo geral, as respostas dos animais descrevem inicialmente uma trajetória linear ascendente (no caso da conversão alimentar a resposta é descendente) tornando-se curvilínea em seu máximo e tendendo a se estabilizar em um platô ou em uma linha assintótica, a partir do qual, a resposta será nula ou haverá declínio, possivelmente por efeitos adversos, como toxicidade. Em alguns casos, o platô formado é curto ou até mesmo inexistente, presente somente um único ponto representando o máximo.

SAKOMURA e ROSTAGNO (2007) descrevem que para se determinar níveis ótimos pelo método dose-resposta, o incremento do nutriente na ração deve ser estabelecido de modo que, as respostas de desempenho dos animais demonstrem melhorias na produção, chegando a um máximo que, posteriormente, se estabilize, ou seja, os níveis do nutriente não mais influenciarão nas respostas de produção. Portanto, a inclusão do nutriente deve ser controlada e pré-determinada, preferencialmente, estabelecida na fase de resposta até se estabilizar, para que não ocorram efeitos de toxicidade, interferindo-se, assim, nas respostas de crescimento e nas interações com os outros nutrientes (LAMBERSON e FIRMAN, 2002).

Para que um modelo de regressão seja eficaz, ele deve atender algumas pressuposições sobre os resíduos: deve haver independência entre eles; ter médias nulas; possuir distribuição normal e variâncias constantes – homocedasticidade (DRAPER e SMITH, 1966).

De acordo com HOFFMANN e VIEIRA (1977), o fato de haver independência dos erros exclui a existência de erros sistemáticos de medida da variável dependente. A presença de homocedasticidade garante ao modelo que, as distribuições da variável dependente para os diferentes valores da variável independente, tenham a mesma dispersão, sendo que, o uso de estimadores de mínimos quadrados quando há heterocedasticidade proporciona uma perda de eficiência do modelo. A normalidade dos erros é necessária para se realizar testes de hipóteses e para se construir intervalos de confiança para os parâmetros. Deve-se, ainda, verificar se o número de

observações é maior que o número de parâmetros da equação de regressão, para possibilitar o ajuste.

Os testes para a homogeneidade das variâncias são, freqüentemente, de interesse para se realizar outras análises, como a análise de variância ou de um agrupamento de dados de diferentes fontes para produzir uma melhor estimativa de variância (CONOVER *et al.*, 1981). MELO e HEPP (2008) explicam que ao se fazer um teste com dados que não tenham homogeneidade de variância, o valor de probabilidade obtido não é confiável. Para dados com falta de normalidade e, principalmente, heterocedásticos, pode-se tentar uma transformação dos dados e avaliar novamente se os requisitos foram atendidos.

WHITE (1980) salienta que a presença de heterocedasticidade em modelos lineares conduz a uma estimativa consistente dos parâmetros, porém estes são ineficientes e produzem matrizes de covariância inconsistentes. Como resultado, se elaborará inferências viciadas e incorretas ao se realizar um teste de hipóteses na presença de heterocedasticidade. Embora se tenha uma idéia bastante boa dos valores dos parâmetros do modelo, ainda há uma grande dificuldade em avaliar a precisão das estimativas dos parâmetros e testar hipóteses, devido à possível inconsistência do estimador usual da matriz de covariância.

A escolha do modelo estatístico que melhor se ajusta aos dados está relacionada com a estimativa dos parâmetros que minimizem os resíduos, apresentando a menor soma dos quadrados residuais, que, por sua vez, fornece uma medida do ajuste do modelo considerado (CHARNET *et al.*, 2008). BUSSAB e MORETIN (2005) sugerem que se façam diagramas de dispersão antes que se escolha o modelo, pois estes gráficos permitem ver o tipo de relação entre as variáveis, na maioria dos casos. MALHEIROS e FEITOSA (2005) salientam que a seleção de um modelo deve basear-se não apenas em um bom ajuste aos dados amostrais, mas principalmente na coerência com os eventos biológicos.

HOFFMAN e VIEIRA (1977) ressaltam que a diferença entre modelo matemático e modelo estatístico está no fato de que no primeiro, as variáveis estão relacionadas por uma expressão matemática sem que a variável dependente seja influenciada por

outros fatores, além dos considerados. No segundo, as variáveis se relacionam como um conjunto de pontos dispersos em torno da curva, ou seja, há variáveis externas ao modelo que o influenciam, chamadas de erro residual (erros de mensuração e efeitos de outras variáveis). Esses erros devem ser controlados e afetam diretamente a escolha e precisão do modelo estudado, portanto, ao se comparar diferentes modelos ou diferentes respostas estimadas por eles, deve-se atentar para as condições experimentais do qual provieram as respostas observadas.

O ajuste dos modelos pode ser avaliado de várias formas, entre elas: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a soma dos quadrados dos desvios (SQD), o coeficiente de variação (CV), a análise de variância (estatística F), o desvio padrão da regressão e outros. HOFFMANN e VIEIRA (1977) explicam que o coeficiente de determinação é uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido, entretanto, depende do número de observações, tendendo a crescer quando o número diminui.

O coeficiente de determinação é dado por:

$$R^2 = \frac{S.Q.M.}{S.Q.T.}$$

em que: S.Q.M. é a soma de quadrado do modelo e S.Q.T. é a soma de quadrado total. Esta estatística corresponde à quantidade da variação explicada pelo modelo (DRAPER e SMITH, 1966).

PAGANO e GAUVREAU (2004) ressaltam que devemos utilizar o  $R^2$  para comparar modelos diferentes com certa precaução, pois este depende do número de parâmetros. Para tanto, utiliza-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2_{aj}$ ), corrigido para graus de liberdade, que compensa a complexidade adicional de um modelo, permitindo fazer comparações entre modelos diferentes. Exceto o caso em que  $R^2=1$ , temos sempre  $R^2_{aj} < R^2$  (HOFFMANN e VIEIRA, 1977).

O coeficiente de determinação ajustado (CHATTERJEE e PRICE, 1991) é dado por:

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{(n-1) \times (1-R^2)}{n-p} \quad (1)$$

sendo:  $n$  é o número de observações e  $p$  o número de parâmetros.

HOFFMAN e VIEIRA (1977) também salientam que o uso do Coeficiente de Variação (CV) pode ser um indicador da qualidade do ajuste. O coeficiente de variação mede a dispersão relativa das observações, pois, por definição, é o quociente entre a medida da dispersão dos pontos em torno da reta e o valor médio da variável dependente, conforme se observa pela equação 2.

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}} \quad (2)$$

sendo:  $S = \sqrt{Q.M.Res.}$  e  $\bar{Y}$  = média.

O quadrado médio residual é uma medida usada para avaliar o ajuste da equação. É obtido através da relação entre a soma de quadrado dos desvios pelo número de observações decrescido do número de parâmetros do modelo (CHATTERJEE e PRICE, 1991).

Segundo EUCLYDES e ROSTAGNO (2001), a aplicação de cada modelo de regressão dependerá da relação entre os níveis do nutriente em estudo e a resposta dos animais aos mesmos, podendo haver subestimação ou superestimação do nível-ótimo.

Diversos modelos de regressão podem ser utilizados para se estimar os níveis ótimos do nutriente avaliado. Entre os principais modelos, têm-se: Modelos com platô (*linear response platô* ou quadrático com platô), modelos polinomiais e modelos não lineares (REZENDE *et al.*, 2007).

## PRINCIPAIS MODELOS

### *Linear response plato (LRP)*

O modelo *linear response plato* ou LRP foi desenvolvido com a finalidade de estimar objetivamente requerimentos nutricionais, resultando em uma resposta direta e com a dosagem do nutriente adequada (MAMEESH *et al.*, 1956).

Segundo ROBBINS (1986), o modelo LRP tem duas partes: uma linha inclinada ascendente ou descendente seguida de uma linha horizontal (platô), no qual a

intersecção entre essas linhas determina o nível adequado do nutriente. A primeira reta é representada por um modelo linear simples ( $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon$ ). A segunda reta, horizontal ao eixo X, é representada pelo platô ( $Y_i = P$ ). O ponto de intersecção das retas representa o nível-ótimo do nutriente, em função do desempenho do animal, conforme se pode observar na Figura 1.

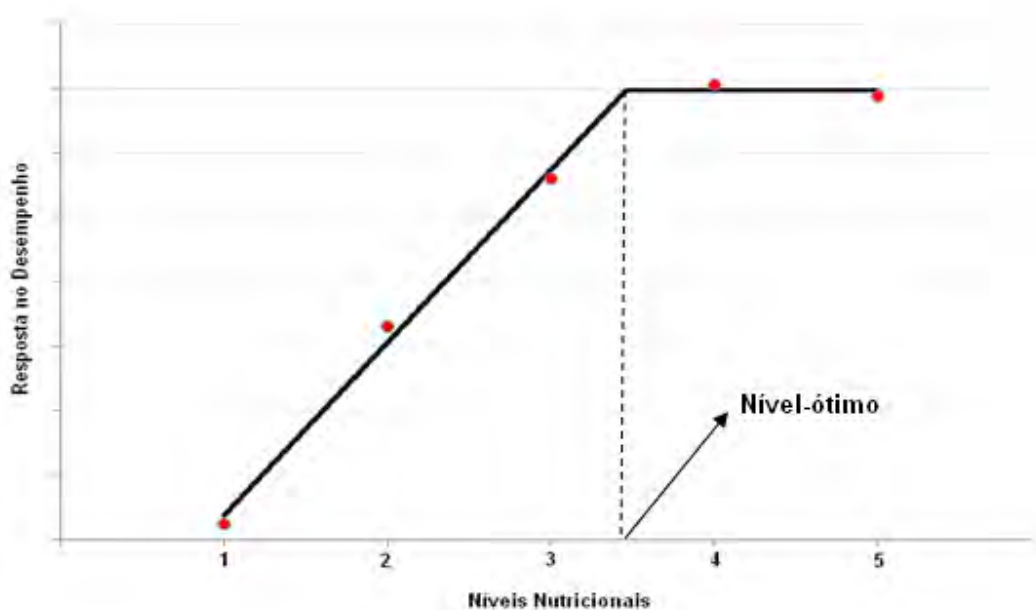


Figura 1 – Representação de um modelo LRP.

De acordo com ROBBINS *et al.* (1979) a notoriedade do modelo LRP recai sobre a seguinte concepção: o desenvolvimento do animal se daria de modo linear frente à adição de um nutriente limitante e indispensável, até atingir o nível requerido e exato desse nutriente, a partir do qual não se observaria mais resposta. O autor ressalta que por um período de crescimento do animal a resposta seria próxima da linear, porém, analisando-se todo o período de crescimento não se observa essa linearidade, como foi confirmado por PARKS (1970), ou seja, a resposta do crescimento descreve uma trajetória curvilínea.

MORRIS (1989) afirma que o LRP não ilustra situações reais, pois representa apenas respostas individuais e não considera as diferenças entre os animais, como as variações no ganho de peso e o potencial produtivo.

Diversos autores, entre eles DALE (1984), COELHO *et al.* (1987), MORRIS (1989) e PACK (1996) concluíram em seus estudos que o modelo LRP tenderia a subestimar a dose-ótima, pois ignora a lei biológica do retorno decrescente e a interrupção abrupta da curva pelo platô pode levar a deduções falsas sobre o nível-ótimo dos nutrientes, pois podem ser observadas respostas satisfatórias mesmo após o ponto de intersecção, sendo necessário, atentar-se para a distribuição e intervalo dos níveis nutricionais que serão estudados.

DALE (1984) afirma que o modelo LRP apresenta desvantagens, como: não considera o retorno econômico; a exigência pode ser ou não realista; o modelo oferece uma falsa impressão de que todas as aves têm a mesma exigência.

### *Polinomial Quadrático*

O modelo polinomial quadrático, cuja equação é dada por:  $Y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \varepsilon$ , graficamente descreve uma parábola. O ajuste do modelo deve ser feito com no mínimo três níveis estudados e o ponto de máximo, ou seja, o ponto que define o nível-ótimo é estabelecido pelo valor que anula a primeira derivada da equação quadrática (KRAPS e LAMBERSON, 2004).

De acordo com MORRIS (1989), quando se trabalha com poucos níveis nutricionais o modelo quadrático, geralmente, apresenta um ajuste adequado, principalmente, ao se levar em conta o  $R^2$ , além de que esse modelo não apresenta grandes complicações para se estimar o ponto de máximo. Porém, a parábola formada apresenta uma curvatura muito sensível a variações nos intervalos dos tratamentos, podendo estimar valores ótimos fora dos intervalos estudados e esse modelo é fisiologicamente incorreto, pois pressupõe respostas simétricas para a deficiência e para o excesso de determinado nutriente.

LAMBERSON e FIRMAN (2002) afirmam que ao se estimar o nível-ótimo utilizando-se regressões quadráticas, há uma tendência em superestimar os valores encontrados, principalmente quando as dietas experimentais não estão distribuídas igualmente acima e abaixo do verdadeiro requerimento. Os autores concluíram que o nível-ótimo obtido pela equação quadrática, mais próximo do valor real, se daria considerando 87,6% do valor máximo, ou seja, se multiplicar o valor máximo da equação quadrática por 0,876, resultaria em uma estimativa mais precisa do verdadeiro requerimento.

Vários autores (BAKER, 1986; ROBBINS *et al.*, 1979; ROSTAGNO *et al.*, 2007) ao utilizarem modelos quadráticos para estimar exigências nutricionais constataram a tendência desse modelo em superestimar a dose-ótima, por isso, consideraram 90% ou 95% da dose estimada pela primeira derivada da equação quadrática como valor mais coerente.

### *Modelos não-lineares*

Modelos não-lineares são amplamente utilizados em várias áreas da produção animal. Além de seu uso para determinar exigências ou dose-ótima de nutrientes, esses modelos, de acordo com SARMENTO *et al.* (2003), são utilizados para: descrever o crescimento do animal ao longo do tempo; ajustar curvas de lactação; avaliar fatores genéticos e fatores ambientais, entre outros.

PACK *et al.* (2003) ressaltam que a utilização de modelos não lineares é cada vez mais requerida, principalmente porque estes modelos descreverem de forma apropriada o significado biológico das respostas dos animais.

Há vários modelos não-lineares utilizados para se estimar exigências nutricionais, dentre eles destacam-se os modelos exponenciais. Baseiam-se no conceito de que a resposta do animal diminui à medida que se aproxima do desempenho máximo ou conversão alimentar mínima. Esse modelo proporciona um excelente ajuste às respostas biológicas do animal, porém apresenta dificuldades no estabelecimento do nível-ótimo e não prevê o efeito do excesso do nutriente, pois à

medida que se aumenta o nível do nutriente, a curva tende a estabilizar-se (SAKOMURA e ROSTAGNO, 2007).

REZENDE *et al.* (2000) compararam modelos exponenciais com o LRP e citam que os modelos utilizados, quando comparados pelo coeficiente de determinação, se comportaram de modo semelhante, sendo o modelo exponencial uma boa opção para avaliar resultados na área de nutrição animal.

HOFFMANN e VIEIRA (1977) citam a Equação 3:

$$y = a + (b \times \rho^x) + \varepsilon \quad (3)$$

Esta equação é chamada de função de Spillman e é proveniente de estudos com fertilidade de plantas. O parâmetro **a** refere-se à máxima produção a ser alcançada com o fornecimento de um nutriente em abundância e o parâmetro **p** é a quantidade de nutriente presente naturalmente no solo.

SAKOMURA e ROSTAGNO (2007) citam a Equação 4, para se determinar a exigência de nutrientes para frangos e a Equação 5 para se estimar o nível-ótimo considerando 95% da resposta assintótica obtida pela equação 4.

$$y = a + b[1 - e^{-c(x-d)}] + \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{Nível Ótimo} = \left( \frac{\ln 0,05}{-c} \right) + d \quad (5)$$

em que: *y* é a produção; *x* é o nível do nutriente; *a* representa o desempenho do animal com o nível do nutriente da dieta basal; *b* é a diferença entre a mínima e a máxima resposta à adição do nutriente; *c* é a inclinação da curva e *d* é o nível do nutriente na dieta basal.

A vantagem desse modelo é que ele proporciona um bom ajuste às respostas biológicas do animal e aos dados obtidos em ensaios dose-resposta, porém apresenta dificuldades no estabelecimento do nível-ótimo, pois a resposta máxima tende ao



infinito. Por isso, diversos autores propõem o uso arbitrário de 95% da resposta assintótica (D'MELLO e LEWIS, 1970; ROBBINS *et al.*, 1979) ou 90% (SCHUTTE e PACK, 1995) para se definir o nível-ótimo.

RIBEIRO (2007) cita que outra desvantagem do modelo exponencial é o fato de que este não prevê o efeito tóxico causado pela ingestão em excesso de um nutriente, portanto, é necessário que se atente para a definição dos níveis nutricionais que serão estudados.

#### *Combinação do Modelo Quadrático com o LRP*

Um outro procedimento difundido para se determinar exigências em experimentos dose-resposta é a combinação do LRP com o modelo quadrático (não confundir com o modelo quadrático com platô), que fornece valores intermediários entre esses dois modelos. O valor da intersecção (nível-ótimo) é calculado igualando-se a equação quadrática com o valor do platô do LRP (BAKER *et al.*, 2002).

EUCLYDES e ROSTAGNO (2001) citam que a vantagem desse modelo é que o nível-ótimo encontrado na primeira intersecção da parábola com o platô do LRP, não é alto como o estimado pela derivação da função quadrática, nem tão baixo como o estimado no modelo LRP, como se observa na Figura 2.

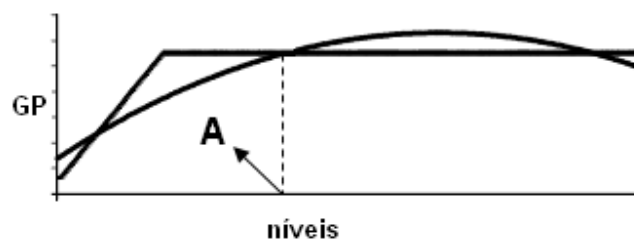


Figura 2 – Combinação do modelo LRP e o modelo Quadrático; o ponto A indica o nível-ótimo obtido pelo primeiro intercepto da parábola com o platô.

#### *Aplicação dos modelos*

BARROS *et al.* (2001) trabalhou com cinco níveis nutricionais, utilizando os modelos LRP e quadrático para determinar a exigência de sódio para frangos de corte

na fase inicial (1 a 21 dias). Os modelos apresentaram grande diferença para os valores ótimos estimados, porém, o modelo LRP apresentou melhor ajuste estatístico (considerando a menor SQD) para essa situação. Já OVIEDO-RONDÓN *et al.* (2001) utilizaram seis níveis de sódio e os mesmos modelos para estimar o nível-ótimo com frangos na fase inicial, porém, considerou-se apenas os resultados obtidos pelo modelo quadrático.

RIBEIRO (2007) avaliou seis níveis nutricionais de sódio para frangas de 1 a 6 semanas de idade. Os modelos utilizados foram: LRP, quadrático, 90% do modelo quadrático e a junção do LRP com o quadrático. Observou-se grande discrepância nos valores de sódio estimados pelos quatro modelos estatísticos, apesar dos modelos apresentarem um ajuste adequado considerando o  $R^2$ .

REZENDE (2002) aplicou a técnica platô de resposta a dois modelos exponenciais e a um modelo quadrático, avaliando nove doses de zinco. Os modelos apresentaram um bom ajuste (altos valores do  $R^2$ ) e os valores do nível-ótimo foram adequados.

CERRATO E BLACKMER (1990) compararam os modelos: LRP, quadrático com platô, quadrático, exponencial e da raiz quadrada, para descrever a resposta do milho com dez níveis diferentes de fertilização nitrogenada. Para a obtenção dos valores do  $R^2$  os autores calcularam utilizando dez (0, 28, 56, 84, 112, 140, 168, 224, 280 e 336  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e quatro (0, 112, 224 e 336  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) níveis estudados. Observou-se que os valores do  $R^2$ , em todas as situações, foram maiores quando se calculou utilizando apenas os quatro níveis. Os autores atentam que o uso do  $R^2$  ajustado poderia suavizar essas diferenças, porém esse critério é pouco utilizado em experimentos com adubação. Os valores do nível-ótimo só foram calculados com os dez níveis estudados, contudo é possível verificar uma grande disparidade entre os modelos.

SIQUEIRA *et al.* (2009) obtiveram, em ensaios dose-resposta com quatro níveis de lisina para frangos, diferentes valores para o nível-ótimo, porém altos valores para o  $R^2$  (próximos a 1,00). VALÉRIO *et al.* (2003) e LANA *et al.* (2005) utilizaram 5 níveis de lisina e o modelo LRP para determinar o nível-ótimo, porém, os valores encontrados para o  $R^2$  não foram tão altos. Com seis níveis nutricionais de lisina, BARBOZA *et al.*

(2000), COSTA *et al.*(2001), AMARANTE JR. *et al.*(2005), encontraram valores próximos para o nível-ótimo com o modelo quadrático, apresentando um bom ajuste ( $R^2$ ). Alguns desses resultados podem ser visualizados na Tabela 1.

Na área de nutrição animal, especificamente quando se estima o nível nutricional mais adequado, ao se ajustar os modelos de regressão aos dados experimentais a estimativa do nível-ótimo nem sempre é satisfatória, apresentando grande variação de um modelo para outro ou até mesmo entre os mesmos modelos, também, quanto ao número de níveis estudados, ainda que, os valores do  $R^2$  sejam elevados. Outra constatação é que, para um mesmo modelo, há diferenças na estimativa do nível-ótimo de acordo com os dados de resposta utilizado (conversão alimentar ou ganho de peso, por exemplo).

É importante ressaltar que não há uma metodologia estabelecida quanto ao número de níveis nutricionais estudados nem qual o melhor critério estatístico (CV, SDQ,  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , etc) deve ser utilizado para se estabelecer a dose ótima de um nutriente, pois, como se observa na Tabela 10, os valores do  $R^2$  tendem a ser maiores à medida que se diminuem os níveis nutricionais estudados.

Tabela 1 – Exigências de lisina digestível, para frangos machos de 22-42 dias de idade, de acordo com a linhagem comercial e parâmetro avaliado.

Autor*	Linhagem	Níveis	Parâmetro	Equação	R <sup>2</sup>	Dose Ótima
Amarante Jr. <i>et al.</i> , 2005	Ross	6	GP	$y = -0,2048 + 3,4353X - 1,5397X^2$	0,95	1,030%
			CA	$y = 4,6314 + 4,6009X - 2,0178X^2$	0,84	1,030%
Barbosa <i>et al.</i> , 2000	Ross	6	GP	$y = -1274,97 + 5041,44X - 2511,55X^2$	0,97	1,004%
			CA	$y = 5,04436 - 6,1291X + 2,97385X^2$	0,95	1,030%
	Hubbard		GP	$y = -1924,84 + 6551,16X - 3361,75X^2$	0,94	0,974%
			CA	$y = 6,58386 - 9,35369X + 4,68522X^2$	0,92	0,998%
Costa <i>et al.</i> , 2001	Ross	6	GP	$y = -2346,09 + 6861,15X - 3048,54X^2$	0,93	1,001%
			CA	$y = 5,80928 - 6,77354X - 2,91007X^2$	0,97	1,044%
Borges <i>et al.</i> , 2002	Avian Farms	5	GP	$y = -2177,17 + 6654,77X - 3179,67X^2$	0,96	0,945%
			CA	$y = 7,63131 - 11,2593X + 5,45108X^2$	0,98	0,930%
Siqueira <i>et al.</i> , 2007	Ross	4	GP	$y = 288,0728 + 318,232X$	1,00	0,999%
				$Y = -281,998 + 1598,12X - 715,774X^2$	0,99	1,116%
			$y = 558,503 + 48,132*(1-\exp(-13,88*(X-0,85)))$	0,99	1,066%	
			LRP+Qd.	$-281,998 + 1598,12X - 715,774X^2 = 605,96$		1,041%

\*adaptado de vários autores.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Considerações Gerais

A influência da heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação do nível-ótimo foi verificada utilizando os dados do experimento realizado por NASCIMENTO *et al.* (2007), com quatro níveis de lisina digestível, três repetições, delineamento inteiramente casualizado, com 480 aves da linhagem Isa-Label criadas em sistema semi-confinado.

Para o estudo da influência da quantidade e posição dos níveis experimentais no ajuste dos modelos e na estimativa do nível-ótimo, utilizaram-se dados do experimento conduzido por SIQUEIRA (2009), com 1200 frangos de corte, machos, da linhagem Cobb500, dos 8 aos 42 dias e dietas experimentais contendo 5 níveis de lisina digestível. Foram simuladas três repetições para cada nível, atentando-se para que estas apresentassem uma configuração e médias próximas aos dados originais.

Os modelos utilizados neste trabalho foram:

##### *a. Linear Response Plato (LRP):*

De acordo com a metodologia descrita por ROBBINS (1979) e BRAGA (1983), a equação geral desse modelo é:

$$Y = aX + b + \varepsilon, \text{ para } X \leq \text{ponto de quebra.}$$

$$Y = \text{platô}, \text{ para } X > \text{ponto de quebra.}$$

Neste modelo, *a* representa o coeficiente linear e *b* o intercepto da reta com o eixo Y. O platô representa um valor constante obtido através do ajuste do modelo aos dados. O nível-ótimo desse modelo foi obtido pela intersecção da reta com o platô.

##### *b. Polinomial Quadrático (QD):*

O modelo quadrático, representado pela função abaixo, descreve graficamente uma parábola, de modo que, permite determinar um ponto de máximo.

$$Y = aX^2 + bX + c + \varepsilon$$

sendo que:  $a$  define a concavidade da parábola, ou seja, o coeficiente quadrático;  $b$  chamado de coeficiente linear, representa a inclinação da parábola em determinado ponto e  $c$  é o ponto que corta o eixo  $y$ . O nível-ótimo desse modelo foi estimado pela primeira derivada da função igualada à zero, obtido pela fórmula:  $-b/2a$ .

*c. Exponencial (EXP):*

Dentre os vários modelos exponenciais existentes para se estimar nutrientes para frangos, utilizou-se o modelo abaixo:

$$y = a + b[1 - e^{-c(x-d)}]$$

Os coeficientes desse modelo possuem interpretação biológica, portanto:  $a$  representa o desempenho da ave com o nível do nutriente na dieta basal;  $b$  representa a diferença entre a mínima e a máxima resposta à adição do nutriente;  $c$  é a inclinação da curva e  $d$  é o nível do nutriente na dieta basal. Para se determinar o nível-ótimo, considerou-se 95% da resposta máxima e foi obtido pela fórmula:  $(\ln 0,05/-c)+d$ , presente em SAKOMURA e ROSTAGNO (2007).

*d. Quadrático com Platô (QRP):*

Semelhante ao modelo LRP, porém, a resposta associada a esse modelo é uma equação do segundo grau que, graficamente, descreve uma parábola e, posteriormente, forma um platô, conforme se observa a seguir:

$$Y = aX^2 + bX + c + \varepsilon, \text{ para } X \leq \text{ponto de quebra}$$

$$Y = \text{platô}, \text{ para } X > \text{ponto de quebra}$$

O nível-ótimo desse modelo foi calculado pelo valor obtido pela intersecção da parábola com o platô.

*e. Combinação do LRP com o Modelo Quadrático (LRP+QD):*

$$aX^2 + bX + c = \text{platô do LRP}$$

O nível-ótimo é obtido pela primeira intersecção da parábola com o platô.

Foram utilizados dados experimentais e simulados, baseados em experimentos do tipo dose-resposta conduzidos no setor de avicultura da FCAV-Unesp Jaboticabal, conforme descritos acima. As simulações, a estimativa dos parâmetros dos modelos, a obtenção dos gráficos e as análises estatísticas foram realizadas nos programas: SAS (2002) e Microsoft Office Excel (2007).

O desenvolvimento dos modelos seguiu as rotinas de programação do SAS, conforme apresentadas no Anexo 1. Para o modelo QD utilizou-se o procedimento Proc Reg e para os modelos LRP, QRP e EXP, utilizou-se o procedimento Proc Nlin do programa SAS (SAS Institute, 2002) com o método de Gauss-Newton, o qual, por um método iterativo, estima os valores dos parâmetros minimizando a soma dos quadrados dos desvios em relação aos valores ajustados (RATKOWSKY, 1983).

### 3.2. Influência da Heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação nível-ótimo

Para se testar a influência da heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação do nível-ótimo, simularam-se três situações heterocedásticas, que foram comparadas com os dados originais obtidos por NASCIMENTO *et al.* (2007), representando uma quarta situação com homocedasticidade, conforme pode ser observado na Figura 3.

As situações simuladas foram: S1: heterocedasticidade com a variância aumentando com o aumento da dose (A); S2: heterocedasticidade com a variância diminuindo com o aumento da dose (B); S3: heterocedasticidade com a variância maior nos níveis intermediários (C); S4: homocedasticidade – situação controle (D). Em todas as situações foram mantidas as mesmas médias e observada a condição de normalidade dos erros, verificada pelo teste de Crámer-von Mises, com nível de significância  $\alpha = 0,05$ . Os modelos utilizados foram: *linear response plato* (LRP), quadrático (QD), quadrático com platô (QRP) e exponencial (EXP).

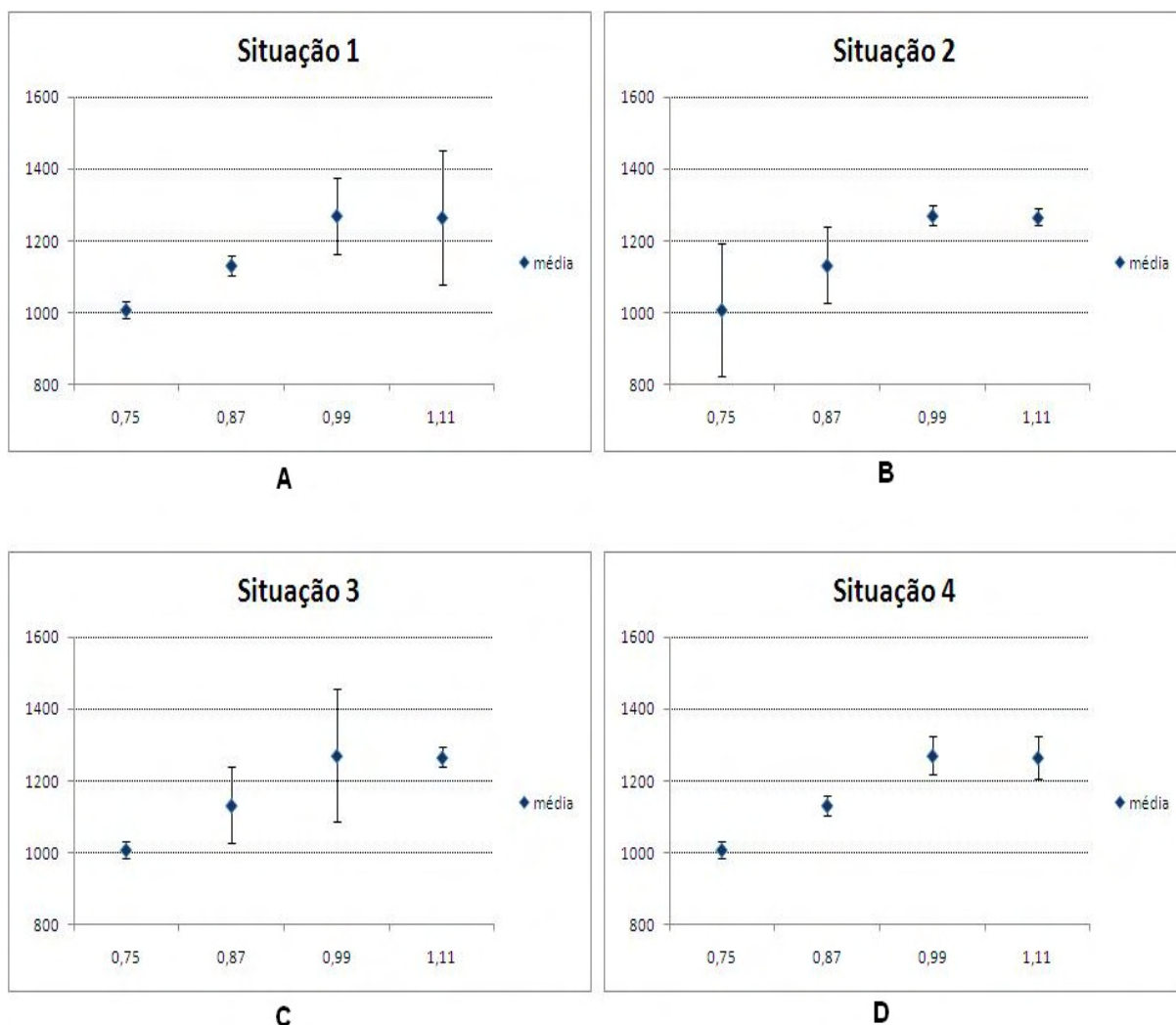


Figura 3 - Situações simuladas para verificar a influência da heterocedasticidade: (A) variância aumentando com o aumento da dose; (B) variância diminuindo com o aumento da dose; (C) variância maior nos níveis intermediários; (D) homocedasticidade.

Na Tabela 2 estão representadas as observações utilizadas para se verificar a influência da heterocedasticidade, com as repetições simuladas e as médias e níveis reais, para as quatro situações. Observa-se que em todos os casos a média foi mantida e o teste utilizado para verificar a presença de heterocedasticidade foi o de Levene com o nível de significância de 10%.



Tabela 2 – Dados utilizados para se verificar a influência da heterocedasticidade, com as respectivas médias e variâncias para cada situação.

Situações	Rep	Níveis			
		0,750	0,870	0,990	1,110
S1	1	990,47	1148,03	1148,83	1082,21
	2	1034,49	1099,88	1325,00	1262,70
	3	999,54	1147,64	1338,86	1452,23
<b>Média</b>		1008,17	1131,85	1270,90	1265,71
<b>Variância</b>		540,25	766,60	11223,23	34235,51
S2	1	824,66	1009,8	1287,06	1248,02
	2	1005,15	1185,97	1238,91	1292,04
	3	1194,68	1199,83	1286,67	1257,09
<b>Média</b>		1008,16	1131,87	1270,88	1265,72
<b>Variância</b>		16288,32	15517,93	1159,21	968,88
S3	1	990,47	1009,8	1087,39	1281,88
	2	1034,49	1185,97	1267,88	1233,73
	3	999,54	1199,83	1457,41	1281,49
<b>Média</b>		1008,17	1131,87	1270,89	1265,70
<b>Variância</b>		540,25	11223,23	34235,51	766,60
S4	1	990,47	1148,03	1209,86	1207,06
	2	1034,49	1099,88	1297,94	1264,41
	3	999,54	1147,64	1304,87	1325,64
<b>Média</b>		1008,17	1131,85	1270,89	1265,70
<b>Variância</b>		540,25	766,60	2805,50	3516,56

O teste de Levene foi escolhido, pois, de acordo com GLASS (1966), este realiza uma análise da variância entre os valores absolutos das diferenças de cada observação e a média dos grupos. Em resumo, o teste de Levene é robusto (considerando um número igual de observações nas amostras) para a hipótese de igualdade de variâncias e tem poder suficiente para rejeitar a hipótese alternativa, além da facilidade de cálculo e o uso de tabelas padrão de distribuição F.

Foi estimado para cada situação o nível-ótimo de acordo com o modelo utilizado e os valores obtidos foram comparados entre os mesmos modelos, nas diferentes situações. O ajuste foi avaliado considerando os maiores valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e os menores valores do CV e da SQD.

### 3.3. Influência do número de níveis experimentais e suas posições no ajuste dos modelos e na estimativa do nível-ótimo

Com os dados do experimento realizado por SIQUEIRA (2009), simularam-se três repetições para cada nível estudado, atendendo às pressuposições de homocedasticidade e normalidade dos erros. Para esse estudo, consideraram-se apenas as médias de ganho de peso referentes ao período de crescimento (22 a 35 dias). Na Figura 4 estão representadas as médias reais observadas e as repetições e o desvio padrão simulados.

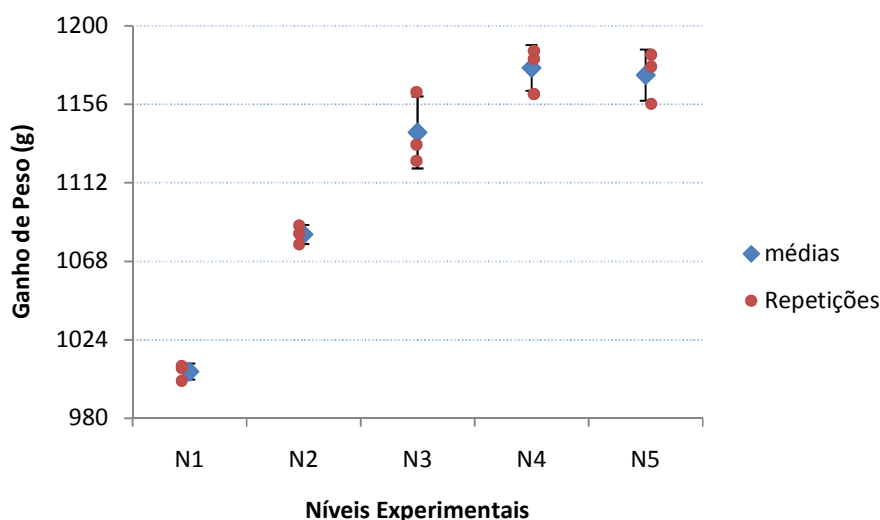


Figura 4 - Níveis nutricionais reais, com o desvio padrão e repetições simulados.

Considerou-se 16 situações de interesse para o estudo da influência do número de níveis experimentais e sua disposição para o ajuste dos modelos, conforme apresentadas na Tabela 3. Nas situações com 5 e 4 níveis os modelos utilizados foram: QD, LRP, EXP e QRP. Para as situações com três níveis, não foram estudados os modelos EXP e QRP, pois estes modelos possuem mais parâmetros que o número de níveis experimentais estudados.

Tabela 3 - Situações simuladas e os respectivos níveis experimentais.

SITUAÇÕES EXPERIMENTAIS		NÍVEIS	
<b>5 NÍVEIS</b>	todos os níveis	5S	N1, N2, N3, N4 e N5
<b>4 NÍVEIS</b>	sem 1	4S1	N2, N3, N4 e N5
	sem 2	4S2	N1, N3, N4 e N5
	sem 3	4S3	N1, N2, N4 e N5
	sem 4	4S4	N1, N2, N3 e N5
	sem 5	4S5	N1, N2, N3 e N4
<b>3 NÍVEIS</b>	sem 1 e 2	3S1-2	N3, N4 e N5
	sem 2 e 3	3S2-3	N1, N4 e N5
	sem 3 e 4	3S3-4	N1, N2 e N5
	sem 4 e 5	3S4-5	N1, N2 e N3
	sem 1 e 3	3S1-3	N2, N4 e N5
	sem 1 e 4	3S1-4	N2, N3 e N5
	sem 1 e 5	3S1-5	N2, N3 e N4
	sem 2 e 4	3S2-4	N1, N3 e N5
	sem 2 e 5	3S2-5	N1, N3 e N4
	sem 3 e 5	3S3-5	N1, N2 e N4

Depois de realizada a análise de variância, estimou-se o nível-ótimo em cada modelo e compararam-se as situações, primeiramente, tomando por base todos os níveis experimentais (5 níveis) e, posteriormente, as diferenças encontradas nos valores do nível-ótimo obtidos para as situações com o mesmo número de níveis estudados.

O ajuste dos modelos foi avaliado considerando: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), o coeficiente de variação (CV) e a soma dos quadrados dos desvios (SQD).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para maior clareza, primeiro serão apresentados e discutidos os resultados da influência da heterocedasticidade no ajuste dos modelos e determinação do nível-ótimo e, depois, os resultados e discussão da influência do número e posição dos níveis nutricionais no ajuste e nível-ótimo estimado por cada modelo.

Os resultados referentes à combinação do modelo quadrático com o LRP foram apresentados no item 4.2.3, pois, não se trata de um modelo regressivo, mas sim da combinação de dois modelos.

### 4.1. Influência da Heterocedasticidade no ajuste dos modelos e na determinação nível-ótimo

A homocedasticidade é uma das pressuposições básicas para validação do modelo regressivo, porém, dá-se maior importância para essa pressuposição no caso de modelos preditivos. Em ensaios do tipo dose-resposta, no qual o uso dos modelos está relacionado com a estimativa da dose-ótima, são escassas as informações sobre a influência da heterocedasticidade na estimativa da melhor dose e no ajuste dos modelos.

Na Tabela 4 estão representados os valores do nível-ótimo, da soma dos quadrados dos desvios (SQD), do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) e do coeficiente de variação (CV), obtidos para as distintas situações após o ajuste dos modelos e determinação do nível-ótimo. Não se observou diferenças na estimativa dos valores do nível-ótimo para as situações avaliadas, porém, nos casos com heterocedasticidade (S1, S2 e S3) o ajuste dos modelos foi pior, tanto pela redução do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$ , quanto pelo aumento da SQD e do CV. A situação com homogeneidade (S4) apresentou maiores valores para o  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e menores valores para a SQD e CV, ou seja, o ajuste dos modelos foi melhor, como

pode ser confirmado em DRAPER e SMITH (1966), SEARLE (1971) e FREUND e WILSON (1998).

Tabela 4 - Nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV); soma dos quadrados dos desvios (SQD) e p-valor para as distintas situações.

Modelo*	Situações	NO	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	CV(%)	SQD	p-valor <sup>1</sup>
LRP	S1	0,990	60,05	51,17	8,73	93665,2	0,089
	S2	0,990	60,05	51,17	8,73	93664,1	0,089
	S3	0,990	60,05	51,17	8,73	93664,7	0,089
	S4	0,990	90,14	87,95	3,54	15393,8	0,252
QRP	S1	0,987	60,09	45,12	8,72	93569,8	0,089
	S2	0,987	60,09	45,12	8,72	93569,4	0,089
	S3	0,987	60,09	45,12	8,72	93569,9	0,089
	S4	0,987	90,21	86,53	3,53	15298,5	0,252
QD	S1	1,100	58,48	49,26	8,89	97350	0,089
	S2	1,100	58,48	49,26	8,89	97345	0,089
	S3	1,100	58,48	49,26	8,89	97347	0,089
	S4	1,100	87,79	85,07	3,93	19078	0,252
EXP	S1	1,362	57,61	41,71	8,99	99384,2	0,089
	S2	1,362	57,61	41,71	8,99	99377,3	0,089
	S3	1,362	57,61	41,71	8,99	99381,5	0,089
	S4	1,362	86,48	81,41	4,14	21111,7	0,252

\* LRP (Linear response plato); QRP (quadrático com resposta em platô); QD (modelo polinomial quadrático) e EXP (modelo exponencial).

<sup>1</sup>p-valor = associado ao teste de Levene para homogeneidade das variâncias.

Nas situações com heterocedasticidade, o  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$  e CV apresentaram os mesmos valores, entretanto, houve algumas pequenas diferenças nas equações obtidas, conforme se observa na Tabela 5. A soma dos quadrados dos desvios apresentou valores diferentes entre as situações e, por ser um critério mais robusto, se mostrou mais sensível ao detectar as pequenas variações entre os modelos e seus ajustes. Por se tratar do mesmo conjunto de dados em todas as situações heterocedásticas, alternando somente a variância entre os níveis, as equações

originadas foram semelhantes, tanto entre as situações com heterocedasticidade (S1, S2 e S3), quanto entre as situações heterocedásticas e homocedástica.

Tabela 5 – Equações ajustada aos dados das situações com heterocedasticidade (S1, S2 e S3) e da situação com homocedasticidade (S4).

Modelo*	Situações	Equações
LRP	S1	$y = 1082,3x - 5,277$ , para $x \leq 0,990$
	S2	$y = 1082,4x - 5,376$ , para $x \leq 0,990$
	S3	$y = 1082,8x - 5,178$ , para $x \leq 0,990$
	S4	$y = 1082,3x - 5,277$ , para $x \leq 0,990$
QRP	S1	$y = 568,5x^2 + 109,781x + 606,131$ , para $x \leq 0,987$
	S2	$y = 566,2x^2 + 113,721x + 604,482$ , para $x \leq 0,987$
	S3	$y = 567,0x^2 + 112,342x + 605,064$ , para $x \leq 0,987$
	S4	$y = 568,2x^2 + 110,270x + 605,937$ , para $x \leq 0,987$
QD	S1	$y = -2237,29x^2 + 4921,08x - 1432,15$
	S2	$y = -2237,29x^2 + 4921,09x - 1432,16$
	S3	$y = -2237,66x^2 + 4921,73x - 1432,42$
	S4	$y = -2237,24x^2 + 4920,98x - 1432,09$
EXP	S1	$y = 1032,9 + 303,2[1 - e^{-5,0436(x-0,7685)}]$
	S2	$y = 1032,9 + 303,2[1 - e^{-5,0442(x-0,7685)}]$
	S3	$y = 1032,9 + 303,2[1 - e^{-5,0451(x-0,7684)}]$
	S4	$y = 1032,9 + 303,2[1 - e^{-5,0438(x-0,7685)}]$

\* LRP (Linear response plato); QRP (quadrático com resposta em platô); QD (modelo polinomial quadrático) e EXP (modelo exponencial).

A igualdade entre os valores do nível-ótimo obtida para as situações heterocedásticas e homocedástica pode ser justificada pelo fato de todas as situações (tratamentos) apresentarem o mesmo número de repetições e semelhanças entre as equações. A heterocedasticidade não foi tão acentuada, o que, segundo BOX (1954), não causaria grandes danos à análise de variância, entretanto, com grupos desiguais associados à ausência de normalidade dos erros, as discrepâncias seriam maiores. PIMENTEL-GOMES (1985) comenta que é possível fazer a análise conjunta de experimentos com heterocedasticidade sem grandes prejuízos para as variáveis

regressoras, se o quociente entre o maior e o menor quadrado médio residual for menor que sete.

As equações das situações S1, S2 e S3 estimaram um valor adequado para o nível-ótimo, igual ao estimado pela situação S4, porém, situações heterocedásticas devem ser evitadas, pois, de acordo com RODRIGUES e DINIZ (2006), as variâncias dos estimadores não são mínimas, embora o estimador de mínimos quadrados ordinários seja não viciado, sua variância é viciada e as estimativas intervalares ou os testes de hipóteses podem produzir resultados imprecisos ou inválidos.

#### 4.2. Influência do número e posição dos níveis no ajuste dos modelos e na estimativa do nível-ótimo

##### 4.2.1. Situação base - 5 níveis experimentais

Na Tabela 6 estão apresentadas as equações ajustadas aos cinco níveis, os valores do nível-ótimo,  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , CV e SQD. Observa-se que o ajuste dos modelos foi adequado, apresentando valores acima de 96% para o  $R^2$  e acima de 95% para o  $R^2_{aj}$ . O CV, assim como a SQD, apresentaram valores baixos.

Tabela 6 – Equações de regressão ajustadas para a situação com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD).

MODELOS*	EQUAÇÕES	5 NÍVEIS				
		NO	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	CV(%)	SQD
QD	$y = -1764,88x^2 + 3876,38x - 952,14$	1,098	97,17	96,69	1,09	1793,25
EXP	$y = 800,2 + 400[1 - e^{-6,6869(x-0,6794)}]$	1,118	96,22	95,19	1,26	2390,10
LRP <sup>1</sup>	$y = 779,1x - 397,07$	0,997	97,04	96,54	1,11	1872,20
QRP <sup>2</sup>	$y = -1331,8x^2 + 3101,829x - 609,124$	1,034	97,34	96,62	1,10	1678,10

\* QD (modelo polinomial quadrático); EXP (modelo exponencial); LRP (Linear response plato) e QRP (quadrático com resposta em platô).

<sup>1</sup> Equação válida para  $x \leq 0,997$ .

<sup>2</sup> Equação válida para  $x \leq 1,034$ .

Essa situação foi considerada como base para comparar o nível-ótimo estimado e o ajuste dos modelos às outras situações, com 4 e com 3 níveis estudados. Na Figura 5 estão representados graficamente os modelos ajustados com os cinco níveis.

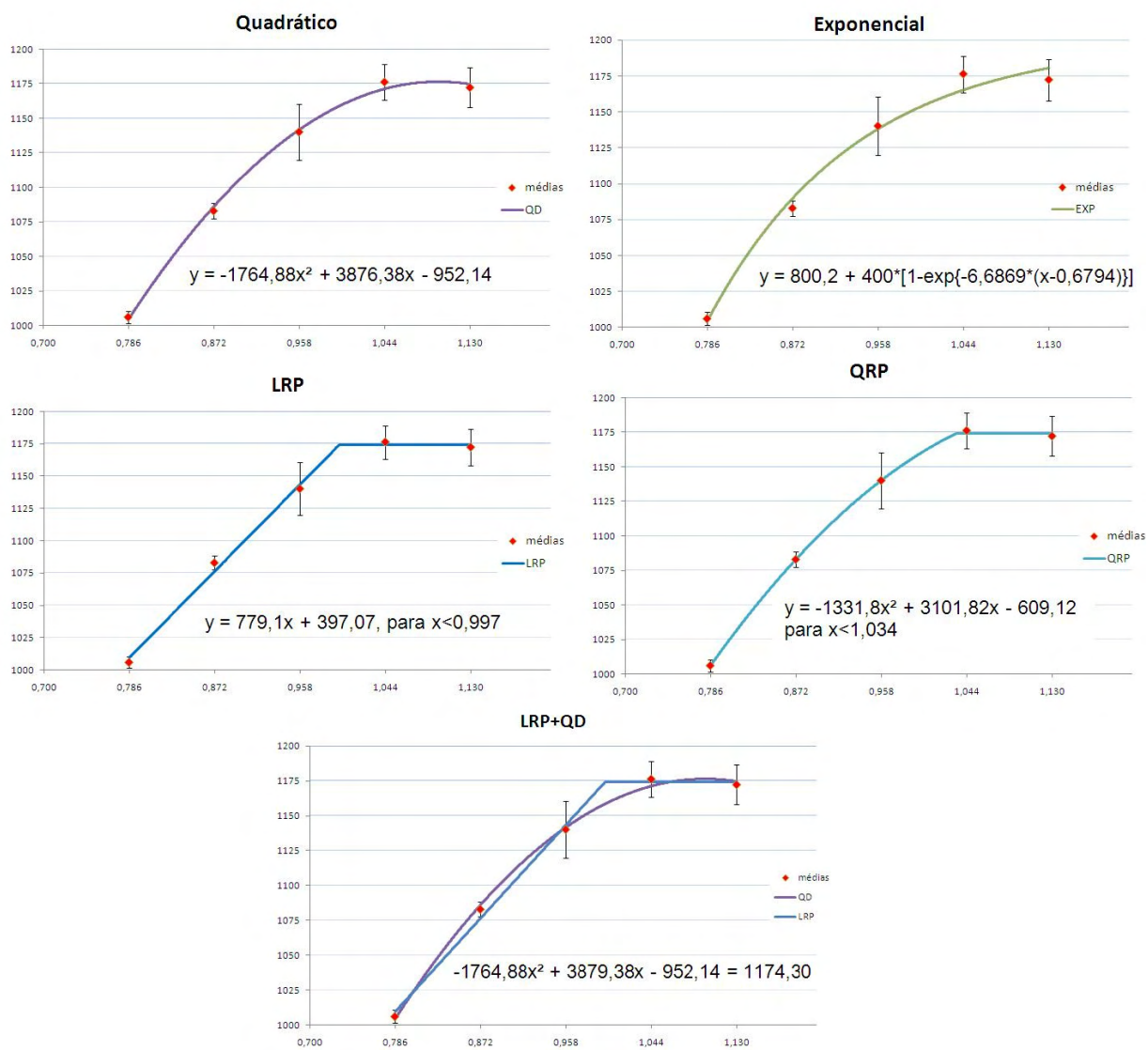


Figura 5 - Representação gráfica dos modelos estudados para a situação com cinco níveis experimentais e suas médias com o desvio padrão.



Os valores apresentados na Tabela 6 para as estimativas do nível-ótimo variaram de acordo com o modelo utilizado, o que é perfeitamente justificável, pois cada modelo estima o nível-ótimo de acordo com diferentes critérios. O LRP apresentou o menor valor (0,997) e o EXP, considerando 95% da resposta máxima, apresentou o maior valor (1,118), seguido do QD (1,098). Estes resultados concordam com CERRATO e BLACKMER (1990), ao descreverem a dificuldade em se eleger a dose adequada nos ensaios dose-resposta e vários pesquisadores obtiveram diferentes doses-ótimas de acordo com o modelo, utilizando o mesmo conjunto de dados (ABRAHAM e RAO, 1965; ANDERSON e NELSON, 1971, 1975; BARRETO e WESTERMAN, 1987; NELSON *et al.*, 1985; BLACKMER e MEISINGER, 1990).

Entretanto, neste trabalho, não se abordará as diferenças entre os modelos, mas sim o ajuste dos mesmos e a variação no valor do nível-ótimo de acordo com as situações propostas.

#### 4.2.2. Situações com quatro níveis experimentais

As situações avaliadas com quatro níveis estão representadas na Tabela 7, assim como, as equações ajustadas para cada modelo, o nível-ótimo estimado, o coeficiente de determinação, o coeficiente de determinação ajustado, o coeficiente de variação e a soma dos quadrados dos desvios.

##### *Modelo Polinomial Quadrático*

O nível-ótimo é obtido para o modelo quadrático, por uma relação entre o coeficiente  $b$  e o dobro do coeficiente  $a$ , ou seja, é a primeira derivada da equação quadrática igualada a zero ( $-b/2a$ ). Percebe-se, pelos resultados da Tabela 7 e na Figura 6, que o modelo quadrático apresentou pouca variação no valor do nível-ótimo estimado com quatro níveis em relação ao valor obtido com os cinco níveis. As situações que apresentaram as maiores variações foram: 4S1 e 4S5, sendo que, esta última além de superestimar o nível-ótimo, apresentou a maior variação.

Tabela 7 – Equações de regressão ajustadas para as situações com quatro e com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD).

MODELOS	SITUAÇÕES	EQUAÇÕES	4 NÍVEIS				
			NO	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	CV(%)	SQD
QD	4S1	$y = -2067,67x^2 + 4492,97x - 1263,61$	1,086	90,90	88,88	1,19	1668,6
	4S2	$y = -1812,09x^2 + 3961,15x - 988,35$	1,093	97,15	96,51	1,22	1690,9
	4S3	$y = -1822,38x^2 + 3986,54x - 1003,46$	1,094	98,40	98,04	0,93	965,3
	4S4	$y = -1686,31x^2 + 3716,37x - 873,79$	1,102	97,28	96,67	1,11	1338,3
	4S5	$y = -1375,85x^2 + 3177,84x - 641,70$	1,155	97,56	97,01	1,07	1242,1
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = -1764,88x^2 + 3876,38x - 952,14</math></b>	<b>1,098</b>	<b>97,17</b>	<b>96,69</b>	<b>1,09</b>	<b>1793,25</b>
EXP	4S1	$y = 782,5 + 400[1 - e^{-11,2454(x-0,740)}]$	1,006	89,41	85,44	1,29	1941,7
	4S2	$y = 788,0 + 400[1 - e^{-8,3366(x-0,6919)}]$	1,051	96,60	95,32	1,33	2012,9
	4S3	$y = 801,7 + 400[1 - e^{-6,4692(x-0,6768)}]$	1,140	97,41	96,43	1,19	1555,7
	4S4	$y = 791,9 + 400[1 - e^{-6,8472(x-0,6750)}]$	1,113	96,90	95,74	1,18	1520,3
	4S5	$y = 865,2 + 400[1 - e^{-4,1768(x-0,6822)}]$	1,398	97,53	96,60	1,07	1252,8
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = 800,2 + 400[1 - e^{-6,6869(x-0,6794)}]</math></b>	<b>1,118</b>	<b>96,22</b>	<b>95,19</b>	<b>1,26</b>	<b>2390,10</b>
LRP	4S1	$y = 664,6x + 503,453$	1,009	91,06	89,08	1,18	1637,7
	4S2	$y = 779,1x + 393,798$	1,002	97,26	96,65	1,19	1620,9
	4S3	$y = 893,6x + 303,755$	0,974	98,56	98,24	0,88	863,9
	4S4	$y = 779,1x + 397,096$	0,995	96,91	96,22	1,18	1517,9
	4S5	$y = 779,1x + 397,20$	1,000	97,17	96,54	1,15	1435,9
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = 779,1x + 397,07</math></b>	<b>0,997</b>	<b>97,04</b>	<b>96,54</b>	<b>1,11</b>	<b>1872,20</b>
QRP	4S1	$y = -381,3x^2 + 1362,3x + 185,037$	1,014	91,06	87,71	1,18	1637,7
	4S2	$y = -885,8x^2 + 2324,0x - 273,299$	1,018	97,26	96,23	1,19	1620,9
	4S3	$y = -1822,4x^2 + 3986,66x - 1003,56$	1,163	98,39	97,79	0,93	965,4
	4S4	$y = -1331,8x^2 + 3101,646x - 608,913$	1,028	97,30	96,29	1,17	1323,9
	4S5	$y = -1375,9x^2 + 3177,98x - 641,84$	1,077	97,55	96,63	1,07	1242,2
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = -1331,8x^2 + 3101,829x - 609,124</math></b>	<b>1,034</b>	<b>97,34</b>	<b>96,62</b>	<b>1,10</b>	<b>1678,10</b>

\* QD (modelo polinomial quadrático); EXP (modelo exponencial); LRP (Linear response plato) e QRP (quadrático com resposta em platô).

<sup>1,2</sup> As equações são válidas para  $x \leq NO$ ; para  $x > NO$ ,  $y = \text{platô}$

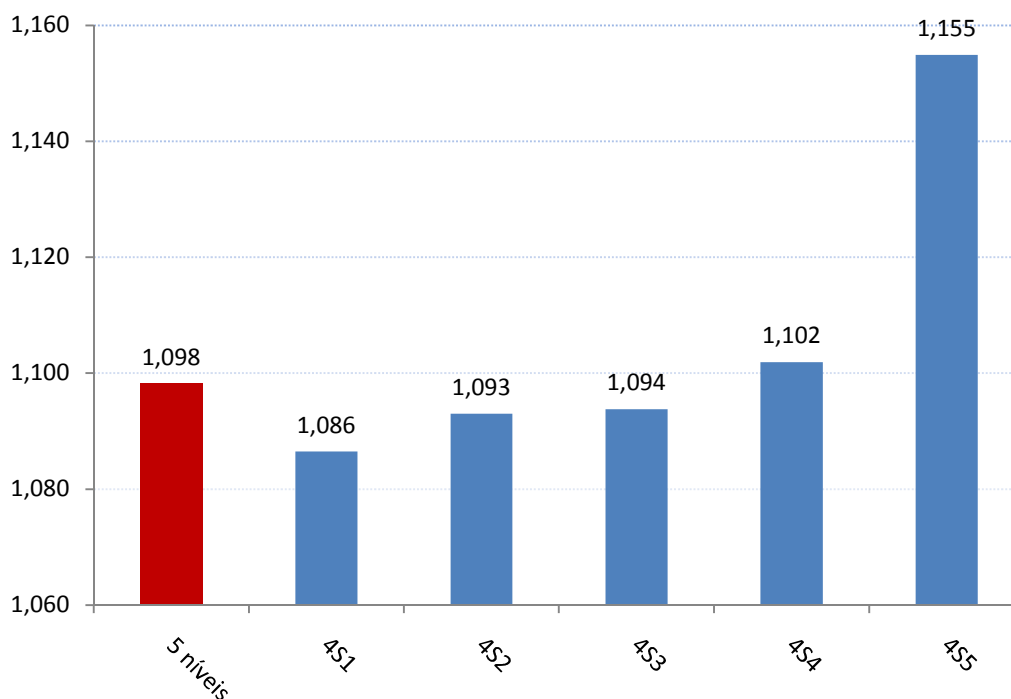


Figura 6 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo quadrático para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.

A retirada do primeiro nível (4S1) proporcionou uma subestimativa (-0,012) do nível-ótimo quando comparado com a situação base de cinco níveis. A equação ajustada para esse conjunto de dados foi a que apresentou os maiores valores para os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , porém, a menor relação entre o coeficiente  $a$  e  $b$ , justamente os que definem o nível-ótimo. Pôde-se constatar que, quando se substituiu os níveis estudados (de 0,786 a 1,130) na variável independente ( $x$ ), os valores obtidos para a variável dependente ( $y$ ) subestimaram as doses iniciais, comparadas com os valores obtidos nos outros casos e com cinco níveis, conforme se observa na Figura 7.

Essa situação apresentou o pior ajuste quando se observou somente o  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  em relação às outras situações e à situação base. Quanto ao CV, o valor apresentado em 4S1 foi superior que ao apresentado na situação com cinco níveis, demonstrando que aumentou dispersão entre os valores preditos e suas médias (HOFFMANN e

VIEIRA, 1977). Entretanto, na situação com cinco níveis a SQD foi maior que em todos os casos, mas deve-se salientar que a SQD tende a ser maior com a presença de um número maior de observações, indicando a dispersão dos resíduos provindos dessas observações em relação a sua média (ZAR, 1999).

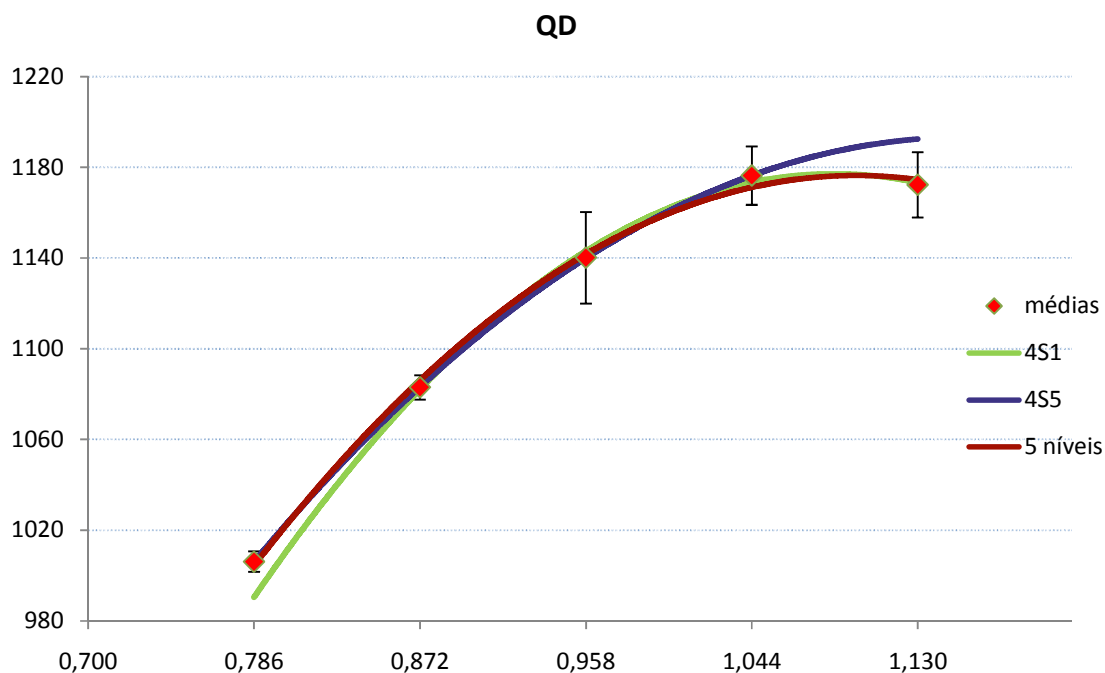


Figura 7 – Representação gráfica do modelo quadrático para as situações 4S1, 4S5 e com cinco níveis.

Em 4S2 e 4S3 os valores estimados para o nível-ótimo foram semelhantes ao obtido na situação base e os coeficientes das equações para estas duas situações foram próximos, porém, em 4S3 foi obtido o melhor ajuste, considerando todos os critérios utilizados, inclusive em relação aos cinco níveis.

Em 4S2, apesar dos valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  terem sido altos (97,15% e 96,51%, respectivamente), essa situação apresentou os maiores valores para o CV e a SQD, entretanto, a SQD foi menor do que na situação com cinco níveis. A retirada desse nível proporcionou uma queda na qualidade do ajuste em relação às outras situações, porém, não interferiu na estimativa do nível-ótimo.

Quanto à situação 4S3, pode-se inferir que a retirada do 3º nível não causou grandes prejuízos ao modelo quadrático, tanto na determinação do nível-ótimo, quanto nos critérios utilizados para avaliar o ajuste, proporcionando, até mesmo, um melhor ajuste nessa situação que em todas as outras.

Na situação 4S4, o valor do nível-ótimo foi ligeiramente maior que na situação com cinco níveis (+0,004), porém, os valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram altos e o CV e SQD foram condizentes com os valores das outras situações e à situação base.

Em 4S5, apesar do ajuste do modelo ter sido adequado com valores elevados do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e baixos para o CV e a SQD, essa situação apresentou a maior variação no valor do nível-ótimo, que foi superestimado em +0,057 quando comparado ao obtido com os cinco pontos.

Verifica-se pela Figura 7, que o 5º nível define a tendência da curva em reduzir a resposta frente à adição de um nutriente. Com a retirada desse nível em 4S5, os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação estimada apresentaram os menores valores, sendo assim, observou-se a parábola com menor curvatura, que de acordo com Ávila (2003), foi definida pelo coeficiente  $a$ , porque este define a abertura da parábola. Com isso, a dose ótima foi superestimada, pois o ponto de máximo (nível-ótimo) foi estimado muito acima da faixa estudada devido à menor curvatura da parábola.

Mesmo que em 4S5 tenha se observado o melhor ajuste, percebe-se que o valor do nível-ótimo foi incoerente com a faixa estudada (0,786 a 1,130). As equações estimadas nas situações 4S1 e 4S5 foram, respectivamente, as que apresentaram os maiores e menores coeficientes ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) em relação à situação base, portanto, quando se observam seus gráficos presentes na Figura 7, percebe-se que a situação 4S1 proporcionou a parábola com maior curvatura (subestimou a dose ótima) e a situação 4S5 a menor curvatura (superestimou a dose ótima). Na mesma figura, observa-se que a parábola formada com os cinco níveis se sobrepôs no início a situação 4S5 e no final a situação 4S1, apresentando uma configuração intermediária a esses dois modelos.

Para o modelo quadrático, comparando-se as situações experimentais com a situação base, concluiu-se que os níveis extremos (1º e 5º nível) foram os que mais influenciaram na determinação do nível-ótimo, pois com a retirada destes, observou-se

a maior variação em relação à situação base. Quanto ao ajuste do modelo, com a retirada do 1º nível, os valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram muito inferiores aos obtidos nas situações e o CV e a SQD foram maiores com a retirada do 2º nível, evidenciando a importância de se estabelecer de modo adequado os níveis extremos para se obter um bom ajuste em ensaios dose-resposta utilizando o modelo quadrático.

### *Modelo Exponencial*

A determinação do nível-ótimo no modelo exponencial se dá através da fórmula apresentada por SAKOMURA e ROSTAGNO (2007), que envolve os parâmetros  $c$  e  $d$ . Esse modelo apresentou grande diferença nos valores obtidos para estes coeficientes, ocasionando grande variação nos valores estimados do nível-ótimo para as distintas situações, como se observa na Tabela 7.

Assim como no modelo quadrático, a maior variação na estimativa do nível-ótimo no modelo exponencial foi observada quando se removeu os níveis extremos, ou seja, em 4S1 e 4S5, conforme se observa na Figura 8.

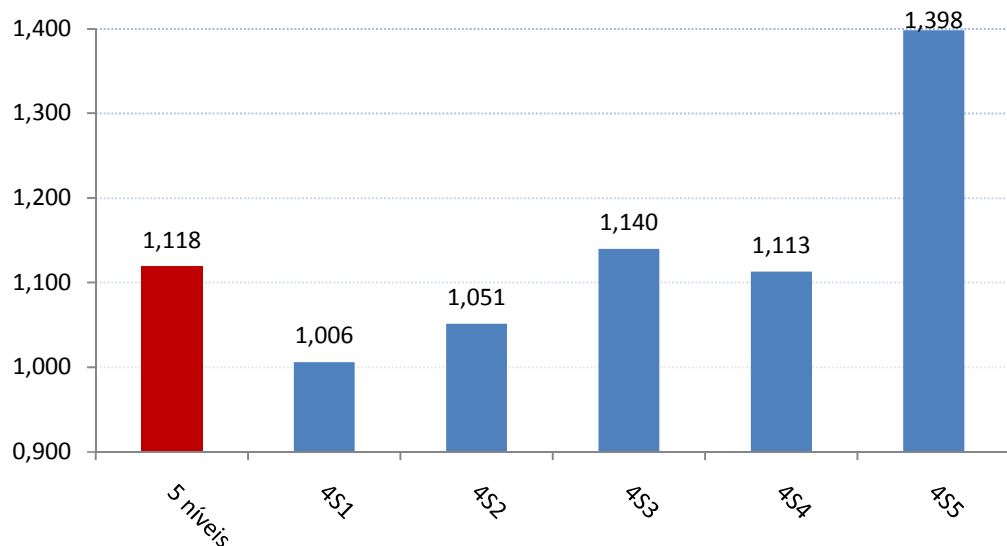


Figura 8 - Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo exponencial para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.

A situação 4S1 apresentou o maior valor para o coeficiente  $c$ , que além de definir a inclinação da curva, está diretamente envolvido na determinação do nível-ótimo. Nessa situação, o valor do nível-ótimo foi subestimado em -0,112 quando comparado com a situação base e, graficamente, essa situação apresentou a maior curvatura, como se pode observar na Figura 9. Nessa mesma figura, constata-se que a curva formada com os cinco níveis se inicia sobreposta à situação 4S5, porém, próximo ao 3º nível, ela começa a se sobrepor à curva formada pela situação 4S1.

Com a remoção do 1º nível em 4S1, observou-se o menor valor para o coeficiente de determinação, ajustado ou não, o que de acordo com diversos autores (DRAPER e SMITH, 1966; HOFFMANN e VIEIRA, 1977; ZAR, 1999; REGAZZI, 2003) não tem muita importância no caso de modelos não-lineares, pois os mesmos salientam que o coeficiente de determinação deve ser analisado considerando a relação dos parâmetros do modelo com as bases biológicas que eles expressam, sendo mais sensato analisar a distribuição dos resíduos como critérios de avaliação do ajuste. A análise do CV para 4S1 apresentou um valor maior do que com os cinco níveis. Já a SQD apresentou-se inferior que a situação base.

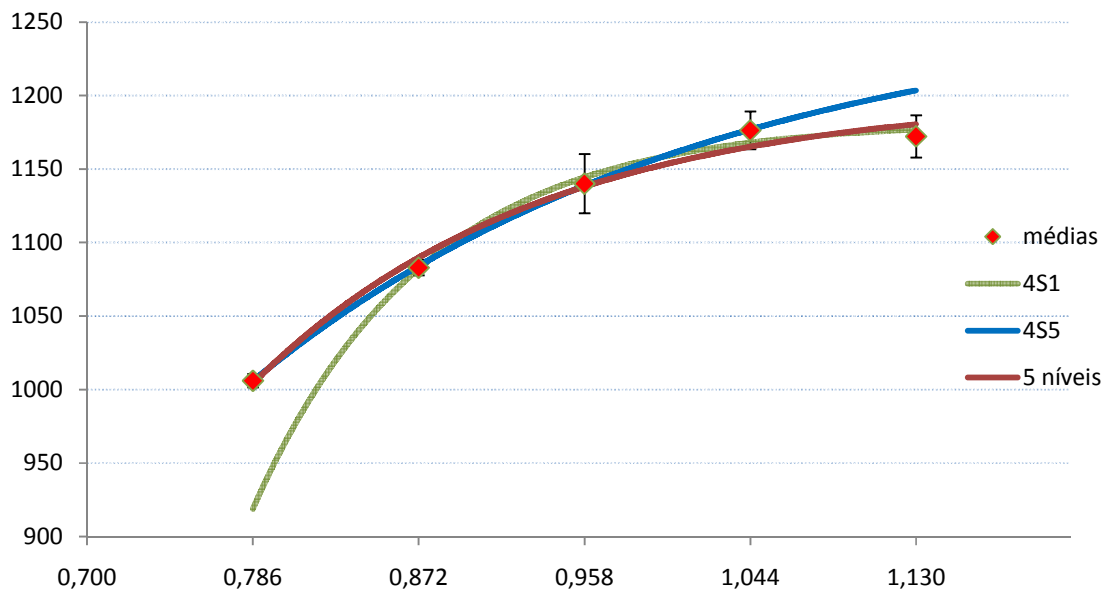


Figura 9 - Representação gráfica do modelo exponencial ajustado para as situações 4S1, 4S5 e com cinco níveis.

O valor do nível-ótimo na situação 4S2 também foi subestimado (-0,067) em relação aos cinco níveis, mas a variação foi menor do que em 4S1 e os valores para o  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram ligeiramente superiores que os valores da situação base. O CV e a SQD apresentaram valores superiores que as outras situações, com exceção do valor apresentado pela SQD da situação com cinco níveis, que foi superior.

Em 4S3 e 4S4 a variação no valor nível-ótimo foi menor que em todos os outros casos, sendo que o nível-ótimo de 4S2 foi o mais próximo da situação base. O ajuste dos modelos para essas situações foi superior que as situações anteriores, porém inferior que em 4S5. O  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram superiores e o CV e a SQD foram inferiores que a situação base.

Com a remoção do 5º nível na situação 4S5, obteve-se o melhor ajuste do modelo aos dados, mas o valor do nível-ótimo apresentou a maior variação, sendo superestimado fora da faixa estudada em +0,280 do valor estimado para a situação base. As mesmas considerações sobre o 5º nível feitas para o modelo quadrático valem para o modelo exponencial, pois esse nível define a tendência de decréscimo na resposta frente ao incremento da dose (MORRIS, 1999) e com esse nível presente, o ajuste no modelo exponencial em todos os casos foi pior, pois esse modelo não prediz uma resposta decrescente.

Observou-se na Figura 9, que a situação 4S5 apresentou o menor valor para o coeficiente  $c$  (-4,1768), conseqüentemente, a curva com menor inclinação. A ausência desse nível proporcionou a situação com o melhor ajuste para o modelo exponencial, entretanto, nesse caso não se pode considerar somente o ajuste, pois o nível-ótimo estimado não foi apropriado.

Em todas as situações apresentadas, o modelo exponencial apresentou semelhanças ao modelo quadrático. Ao se comparar os valores dos níveis-ótimos obtidos nas situações com quatro níveis com o valor da situação base (cinco níveis), pôde-se concluir que com a ausência dos níveis extremos (1º e 5º nível) ocorreu a maior variação no valor do nível-ótimo estimado, sendo estes níveis os que mais influenciaram na estimativa obtida com o modelo exponencial. Quanto ao ajuste, a



retirada do 1º nível causou uma redução nos valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  quando comparados aos obtidos nas outras situações, com quatro ou cinco níveis. O CV e a SQD foram maiores com a retirada do 2º nível, evidenciando a importância de se estabelecer de modo adequado a faixa que será estudada nos ensaios dose-resposta para se obter um bom ajuste utilizando o modelo exponencial.

#### *Modelo “Linear Response Plato” (LRP)*

O modelo LRP apresentou a menor variação nos valores do nível-ótimo, dentre todas as situações propostas e dentre todos os modelos. O nível-ótimo no LRP é definido pelo encontro da reta (representada por uma equação do 1º grau) com o platô, ou seja, há influência direta dos níveis que definem a inclinação da reta representada pelo parâmetro  $a$  da equação linear (coeficiente linear) no valor do nível-ótimo estimado (BRAGA, 1983).

As equações obtidas e os critérios utilizados para avaliar o ajuste do modelo estão na Tabela 7. A variação nos valores estimados para o nível-ótimo pode ser visualizada na Figura 10.

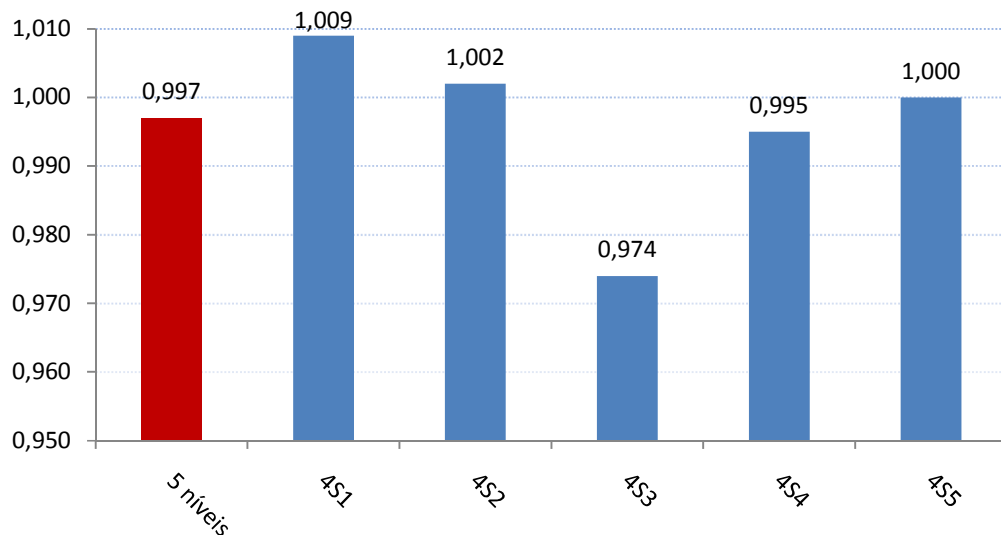


Figura 10 - Variação nos valores do nível-ótimo obtidos pelo modelo LRP para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.

Com a retirada do 1º nível em 4S1, observou-se que os valores dos coeficientes da equação linear foram, respectivamente, o menor valor para  $a$  (coeficiente linear) e o maior valor para  $b$  (intercepto da reta com o eixo  $y$ ), com isso, a inclinação da reta foi menor e o nível-ótimo foi superestimado em +0,012 quando comparado com o valor obtido com cinco níveis. Essa situação foi a que apresentou o pior ajuste, com os menores  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e a maior SQD, além de um valor elevado para o CV. A equação obtida para essa situação proporcionou valores preditos para os níveis iniciais superestimados em relação às outras situações.

As equações obtidas em 4S2, 4S4 e 4S5 apresentaram valores próximos para os coeficientes  $a$  e  $b$  e os níveis-ótimos estimados variaram pouco em relação à situação com cinco níveis. Quanto ao ajuste, a situação 4S2 apresentou valores elevados para o  $R^2$  e  $R^2_{aj}$ , ligeiramente superiores aos cinco níveis. Já o CV e a SQD foram altos, porém, esta última foi inferior que a situação base.

Em 4S4, a equação gerada pelo modelo foi a mais próxima da obtida com os cinco níveis e o nível-ótimo sofreu a menor variação dentre todas as situações. O ajuste do modelo para essa situação foi inferior que a situação base, exceto pela SQD que foi mais baixa. A situação 4S5 foi semelhante, mas o ajuste foi superior à situação base em todos os parâmetros, exceto pelo CV.

A maior variação no valor do nível-ótimo estimado ocorreu em 4S3, subestimando-o em -0,023. O ajuste sem o 3º nível foi superior do que em todas as outras situações e o valor obtido para o coeficiente linear  $a$  foi o maior, conseqüentemente, essa situação apresentou a reta com maior inclinação, como se observa na Figura 11.

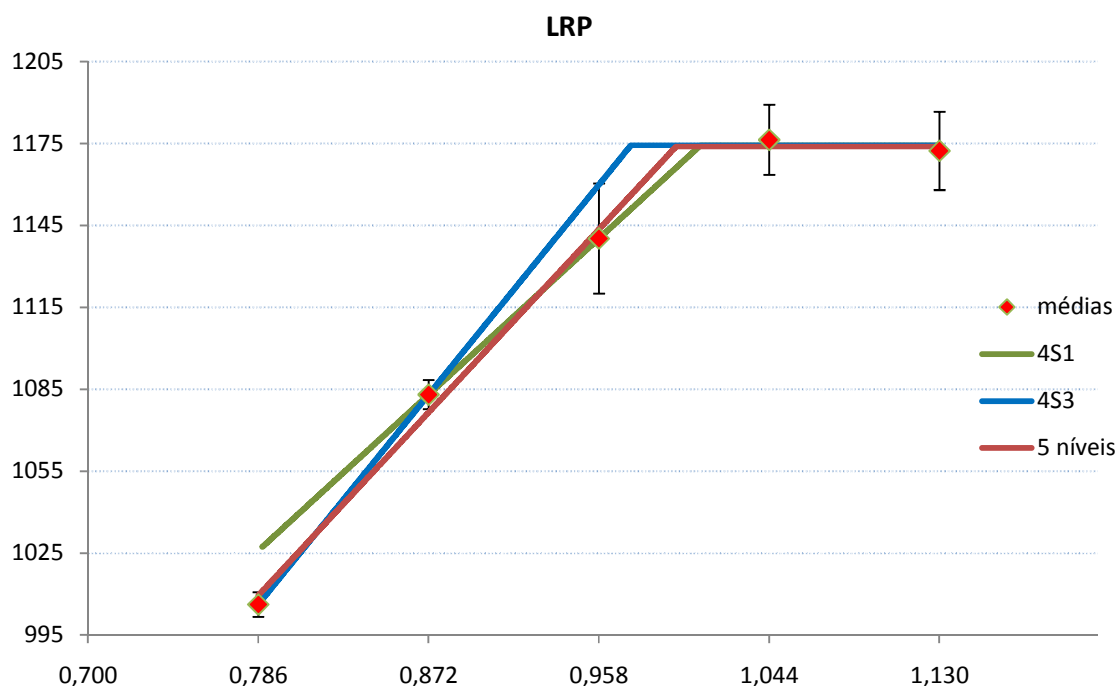


Figura 11 - Representação gráfica do modelo LRP ajustado para as situações 4S1, 4S3 e com os cinco níveis.

Para o modelo LRP, pôde-se concluir que o 3º e o 1º nível foram, respectivamente, os que mais influenciaram no ajuste do modelo e estimação do nível-ótimo. A retirada destes níveis promoveu grandes mudanças nos coeficientes da equação linear e, conseqüentemente, na inclinação das retas. Sem o 3º nível, o ajuste do modelo foi melhor do que o da situação base, porém, o valor do nível-ótimo foi o que apresentou a maior variação, ressaltando assim, a importância desse nível para o modelo LRP. Com a ausência do 1º nível ocorreu o inverso, pois além de superestimar o valor ótimo houve uma queda na qualidade do ajuste.

As situações 4S1 e 4S3 demonstraram a importância do 1º e do 3º nível na estimativa das equações e no ajuste do modelo LRP, portanto a definição desses níveis para esse modelo merece atenção.

### Modelo Quadrático com Platô

O modelo quadrático com platô é semelhante ao LRP quanto à determinação do nível-ótimo, a diferença é que antes do platô não há uma reta, mas sim uma parábola, que define o nível-ótimo por sua intersecção com o platô (CERRATO E BLACKMER, 1990).

As equações e o ajuste obtido por esse modelo nas situações estudadas estão presentes na Tabela 7. A variação no valor do nível-ótimo pode ser visualizada na Figura 12.

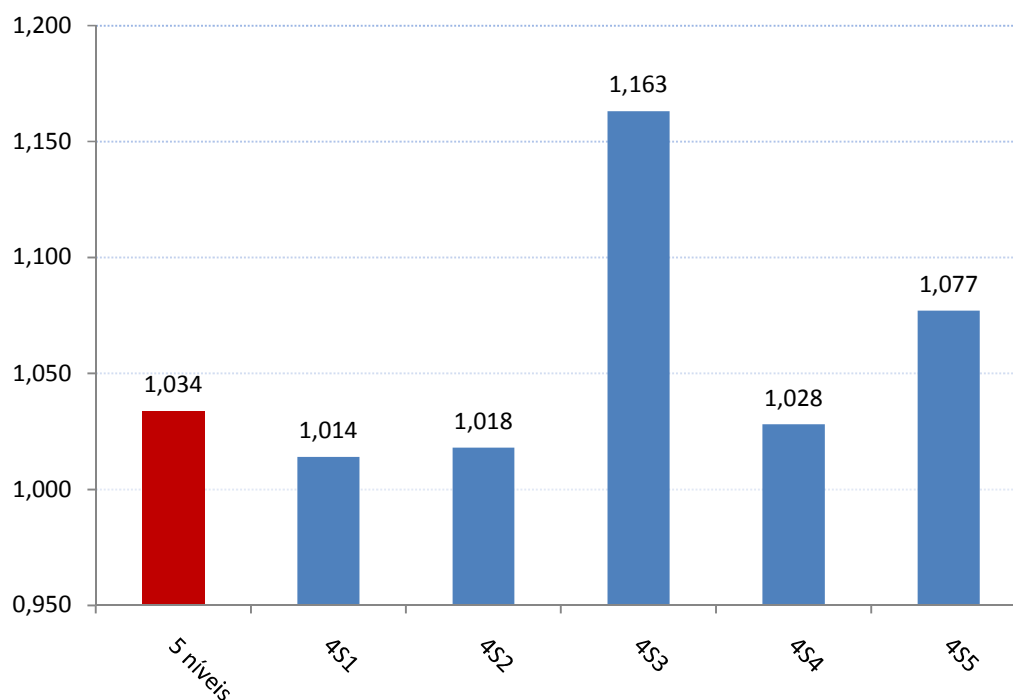


Figura 12 - Variação nos valores do nível-ótimo obtido pelo modelo QRP para as situações com cinco e com quatro níveis experimentais.

Observam-se que as maiores variações no valor do nível-ótimo ocorreram em 4S3 e 4S5, que superestimaram em +0,129 e +0,043, respectivamente, o valor do nível-ótimo encontrado na situação base.

Na situação 4S3, não houve a formação do platô dentro da faixa estudada, sendo que este apresentou o menor valor (1167,9) dentre todas as situações, inclusive com cinco níveis. O platô se formou quando a parábola já havia chegado ao ponto de máximo e registrava queda, conforme pode ser verificado na Figura 13, por isso, o valor do nível-ótimo 1,163 foi superestimado em relação à situação base, que foi de 1,034. A equação de 4S3 apresentou os maiores valores para os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Essa situação proporcionou a maior variação no valor do nível-ótimo e o melhor ajuste considerando os maiores  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e menores CV e SQD dentre todas as situações.

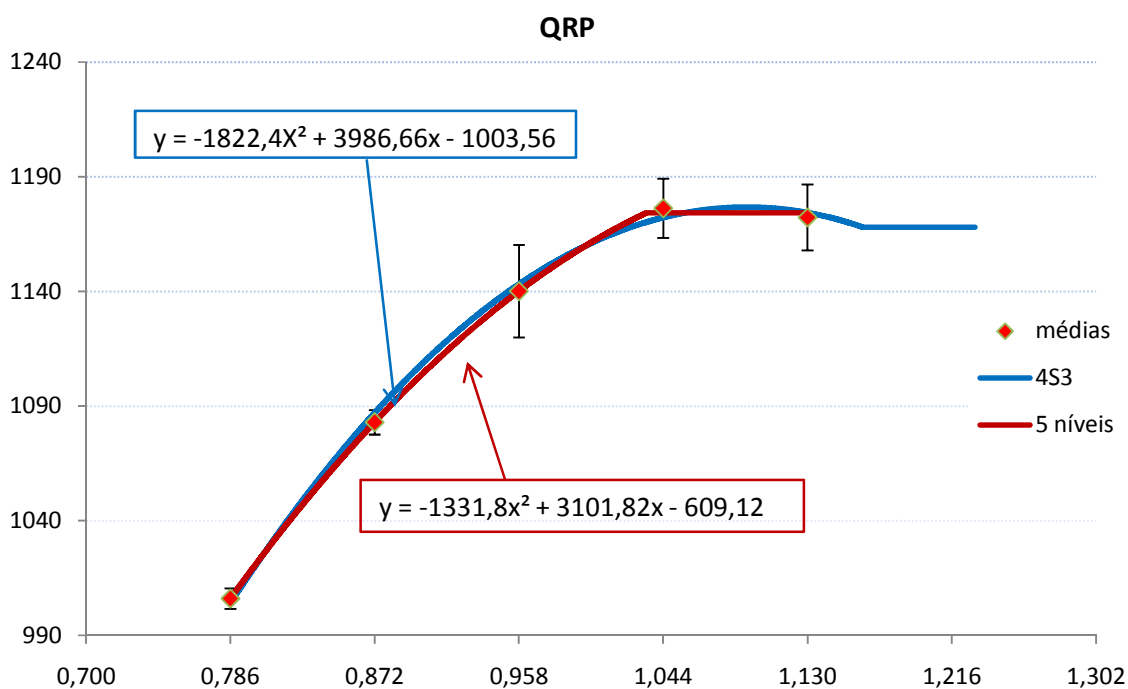


Figura 13 – Representação gráfica e equações da situação com cinco níveis e da situação 4S3.

Semelhante a 3S3, na situação sem o 5º nível, o ajuste do modelo foi superior às outras situações e os valores dos coeficientes da equação quadrática só foram inferiores aos de 3S3. O platô estimado para essa situação apresentou o maior valor (1184,9) dentre todas as situações e o valor do nível-ótimo foi o segundo que mais variou em relação aos cinco níveis.

Na situação 4S1 ocorreu o oposto da 4S3, ou seja, foram observados os menores valores para os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  da equação quadrática, com isso, a curvatura da parábola foi mínima, assemelhando-se ao modelo LRP, conforme se observa na Figura 14. A variação no valor do nível-ótimo em relação à situação com cinco níveis foi pequena (-0,02) e os valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram os mais baixos. A SQD foi mais elevada do que nas outras situações e o CV só foi mais baixo do que em 4S2.

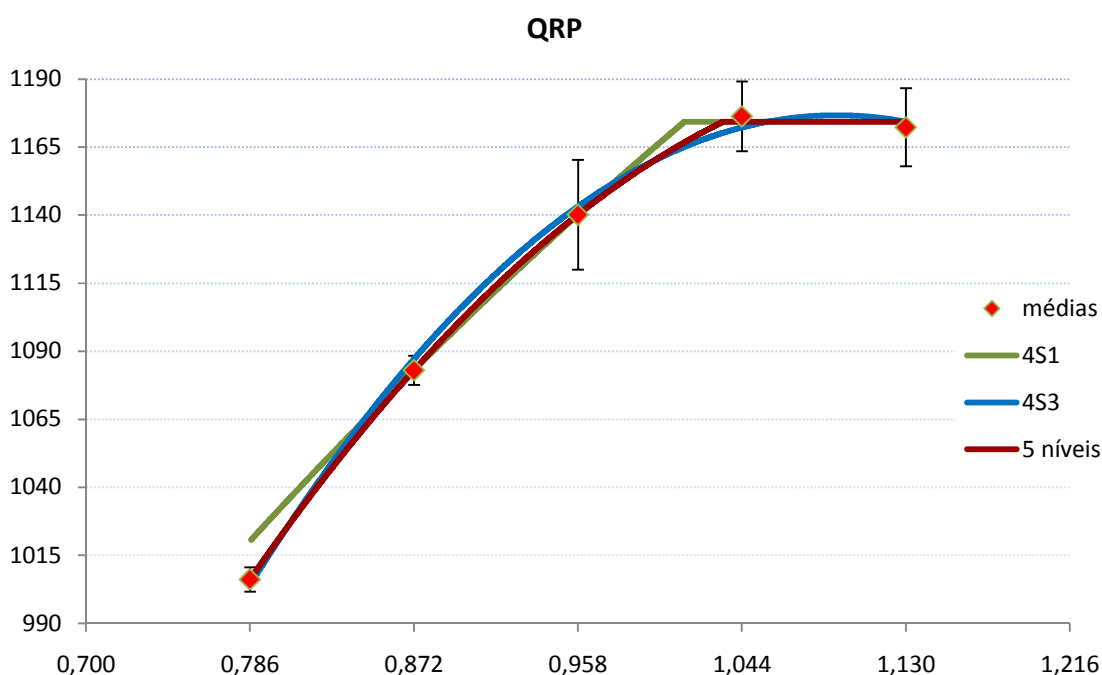


Figura 14 - Representação gráfica do modelo QRP ajustado para as situações 4S1, 4S3 e com os cinco níveis.

Em 4S2 a variação no valor do nível-ótimo foi pequena em relação à situação base e o ajuste do modelo foi adequado, apresentando valores para o  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$  e a SQD melhores do que os da situação com cinco níveis. O CV foi o mais elevado de todas as situações, mas ficou próximo do obtido em 4S1 e 4S4.

A menor variação no valor do nível-ótimo e a equação mais próxima da obtida com cinco níveis ocorreram em 4S4. Essa situação apresentou um ajuste adequado, com valores do  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  próximos da situação com cinco níveis, o CV mais elevado e a SQD inferior.

Com a remoção do 5º nível em 4S5, o modelo QRP utilizou o 4º nível como parte da parábola e não do platô, diferente do que ocorreu no modelo LRP, que ajustou a reta com os três níveis anteriores e utilizou o 4º nível para ajustar o platô. No modelo QRP pôde-se inferir que, após o 3º nível, o 1º e o 5º nível assumem importância quanto ao ajuste da equação quadrática, além de influenciarem na formação do platô. Suas ausências conduziram a variações no nível-ótimo e na qualidade do ajuste. Esse modelo apresentou uma estimativa confiável do nível-ótimo quando a distribuição dos níveis esteve próxima do nível central e os níveis extremos estavam presentes.

#### 4.2.3. Situações com três níveis experimentais

As situações avaliadas com três níveis estão representadas na Tabela 8, assim como, as equações ajustadas para os modelos quadrático e LRP, o nível-ótimo, o coeficiente de determinação, o coeficiente de determinação ajustado, o coeficiente de variação e a soma dos quadrados dos desvios.

##### *Modelo Polinomial Quadrático*

As situações com três níveis foram, de certa forma, semelhantes às situações com quatro níveis. Observa-se na Tabela 8, que a ausência do 1º nível proporcionou uma queda na qualidade do ajuste em todas as situações, principalmente em 4S1-2, no qual o modelo não foi significativo a 0,05, com p-valor de 0,063. Já a ausência do 3º nível (3S1-3, 3S2-3, 3S3-4 e 3S3-5) promoveu uma melhoria na qualidade do ajuste em todas as situações e em 3S1-3, os valores apresentados para o  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , CV e SQD, foram intermediários entre estes dois níveis, ou seja, o nível 1 que apresentou os piores valores e o nível 3 que apresentou os melhores valores.

Quanto ao nível-ótimo, foi observado que a ausência do 5º nível ocasionou em todos os casos estudados uma superestimativa do valor ótimo obtido em relação à situação base. A variação nos valores do nível-ótimo estimado pelo modelo quadrático com três níveis pode ser visualizada na Figura 15.

Tabela 8 – Equações de regressão ajustadas para as situações com três e com cinco níveis experimentais; nível-ótimo estimado (NO); coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); coeficiente de variação (CV) e soma dos quadrados dos desvios (SQD).

MODELOS	SITUAÇÕES	EQUAÇÕES	3 NÍVEIS				
			NO	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	CV(%)	SQD
QD	3S1-2	$y = -2715,13x^2 + 5856,64x - 1978,38^*$	1,078	60,22	46,95	1,38	1556,27
	3S2-3	$y = -2052,98x^2 + 4416,48x - 1196,88$	1,077	98,64	98,18	1,02	782,45
	3S3-4	$y = -1591,77x^2 + 3532,8x - 787,24$	1,110	98,79	98,38	0,84	509,65
	3S4-5	$y = -1331,80x^2 + 3101,76x - 609,06$	1,164	96,75	95,66	1,14	911,84
	3S1-3	$y = -2283,59x^2 + 4917,82x - 1468,93$	1,077	95,43	93,91	1,01	799,32
	3S1-4	$y = -1851,75x^2 + 4053,27x - 1043,41$	1,094	90,53	87,37	1,29	1283,47
	3S1-5	$y = -1419,91x^2 + 3263,01x - 682,66$	1,149	91,70	88,94	1,24	1201,51
	3S2-4	$y = -1721,76x^2 + 3781,86x - 902,70$	1,098	97,35	96,47	1,31	1266,60
	3S2-5	$y = -1390,54x^2 + 3204,21x - 653,29$	1,152	97,60	96,80	1,26	1184,64
	3S3-5	$y = -1361,17x^2 + 3150,46x - 629,19$	1,157	99,03	98,70	0,78	427,69
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = -1764,88x^2 + 3876,38x - 952,14</math></b>	<b>1,098</b>	<b>97,17</b>	<b>96,69</b>	<b>1,09</b>	<b>1793,25</b>
LRP	3S1-2	$y = 812,90x + 361,40$	1,000	59,59	46,12	1,29	1580,50
	3S2-3	$y = 785,70x + 388,60$	1,000	98,59	98,12	0,96	806,70
	3S3-4	$y = 893,60x + 303,81$	0,972	98,79	98,38	0,85	509,70
	3S4-5	$y = 779,1x + 397,10$	1,000	96,06	94,74	1,17	1105,90
	3S1-3	$y = 713,20x + 461,10$	1,000	95,29	93,72	0,95	823,50
	3S1-4	$y = 664,6x + 503,45$	1,006	90,53	87,37	1,29	1283,40
	3S1-5	$y = 664,60x + 503,45$	1,012	91,70	88,94	1,25	1201,60
	3S2-4	$y = 779,10x + 393,82$	0,999	97,35	96,47	1,31	1266,60
	3S2-5	$y = 779,10x + 393,77$	1,004	97,60	96,80	1,27	1184,60
	3S3-5	$y = 893,60x + 303,79$	0,976	99,03	98,70	0,78	427,70
	<b>5 níveis</b>	<b><math>y = 779,1x + 397,07</math></b>	<b>0,997</b>	<b>97,04</b>	<b>96,54</b>	<b>1,11</b>	<b>1872,20</b>

\* QD (Modelo polinomial quadrático); LRP (Linear response platô).

<sup>ns</sup> Não significativo a 0,05 ( $P = 0,0630$ ).



## Nível-Ótimo

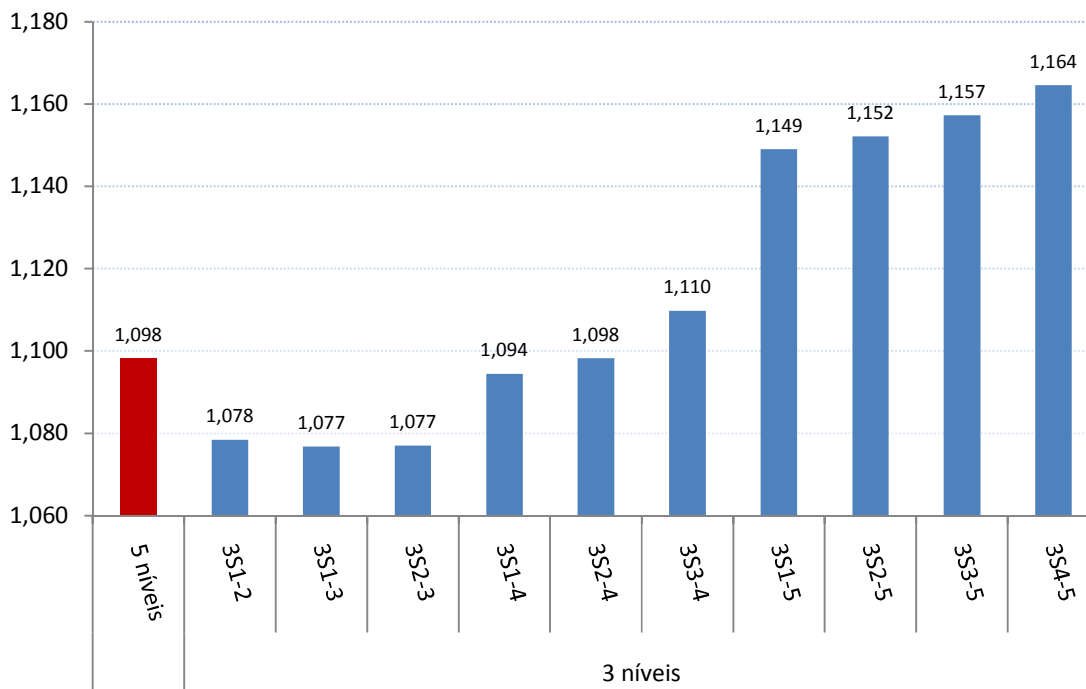


Figura 15 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido nas situações com três níveis e com cinco níveis utilizando o modelo quadrático.

As situações 3S1-4, 3S2-4 e 3S3-4 apresentaram as menores variações para o nível-ótimo quando comparadas com situação base. A situação 3S2-4 não apresentou variação no valor do nível-ótimo e sua equação foi a mais próxima situação com cinco níveis.

Do mesmo modo que ocorreu nos estudos utilizando os quatro níveis, observou-se nas situações com três níveis, que com a remoção do 1º nível o ajuste obtido pelos modelos foi inferior quando comparados com as situações em que este nível estava presente. O nível-ótimo estimado nas situações sem o 1º nível não apresentou grandes variações em relação à situação base, a maior variação ocorreu com a remoção do 5º nível em 3S1-5.

As situações sem o 2º nível apresentaram um bom ajuste, exceto quando se removeram os níveis 1 e 2 na situação 3S1-2, que proporcionou os valores mais baixos

para o  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e mais elevados para o CV e a SQD, sendo que a SQD só foi menor na situação com cinco níveis. O nível-ótimo para as situações sem o 2º nível variou pouco, somente em 3S2-5 que a variação foi maior.

Nas situações 3S2-3, 3S3-4 e 3S3-5, sem o 3º nível, houve uma melhoria no ajuste destes modelos, sendo que os valores do  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , CV e SQD foram melhores que os da situação com cinco e com quatro níveis. Na Figura 16 estão representados, além da situação 3S1-3, os gráficos das situações 3S1-2, que apresentou o pior ajuste e da situação 3S3-5, que apresentou o melhor ajuste dentre todos os casos e situações estudados.

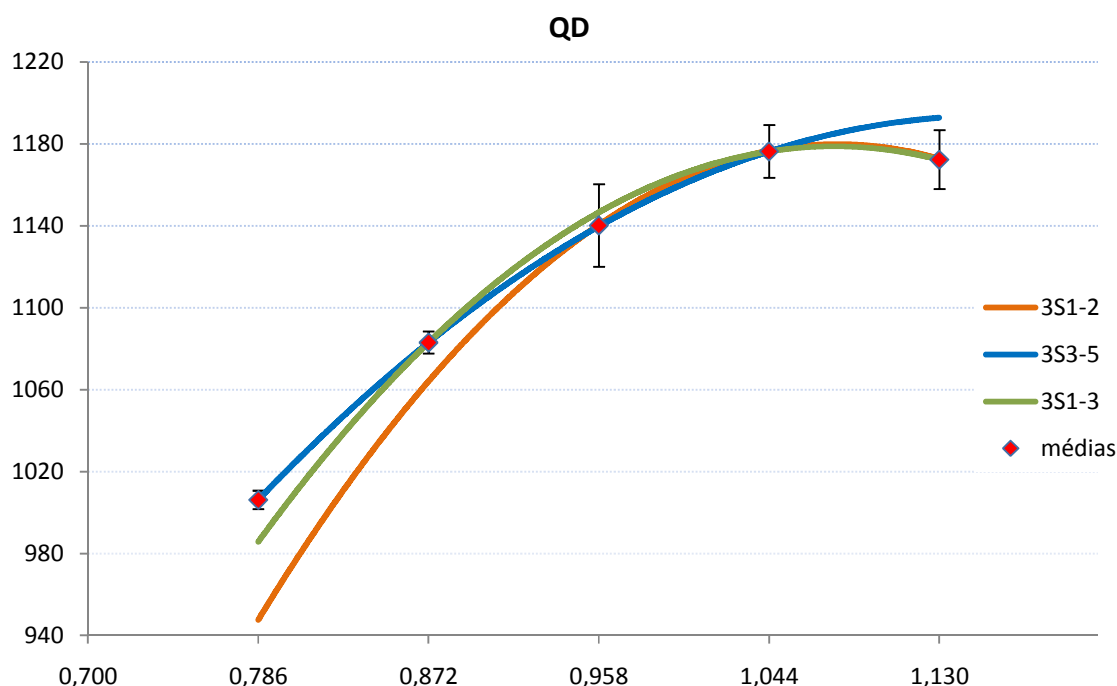


Figura 16 – Representação gráfica das situações 3S1-2, 3S3-5 e 3S1-3, com a média e o desvio padrão de cada nível.

Observa-se na Figura 16, a situação 3S1-3 que se caracterizou pela ausência dos níveis que proporcionaram o pior e o melhor ajuste (1 e 3). Essa situação

apresentou um ajuste mediano, porém, melhor que todas as outras situações em que o 1º nível estava ausente.

As situações 3S1-5, 3S2-5, 3S3-5 e 3S4-5 se distinguiram por apresentar valores superestimados para o nível-ótimo quando comparadas com a situação base. As equações para estas situações apresentaram coeficientes (a, b e c) menores do que nos outros casos, conseqüentemente, a curvatura da parábola foi menor e os valores do nível-ótimo foram superestimados em todas as situações com ausência do 5º nível.

Constatou-se que, com três níveis estudados, a ausência do 1º nível ocasionou queda na qualidade do ajuste em todas as outras situações. Sem o 3º nível, ocorreu o oposto, ou seja, todos os modelos apresentaram melhorias em seus ajustes, inclusive quando se compara 3S1-3 com as outras situações com o 1º nível ausente. O 5º nível foi decisivo para a estimativa adequada do nível-ótimo, pois com a sua ausência os coeficientes das equações apresentaram valores menores, com isso, a curvatura da parábola para estes casos foi menor, confirmando as constatações de Morris (1989) sobre a curvatura da parábola ser muito sensível às variações entre os níveis estabelecidos.

As situações com três e com quatro níveis experimentais demonstraram que para se obter um ajuste adequado e uma estimativa confiável do nível-ótimo utilizando o modelo quadrático em ensaios dose-resposta, devem-se estabelecer os níveis que serão estudados de modo que não se extrapole excessivamente os valores próximos ao requerimento real do animal. Os níveis extremos e o central (neste caso foram, respectivamente, o nível 1 e 5 e o nível 3) merecem maior atenção, pois constatou-se que a ausência destes níveis promoveram alterações nos coeficientes da equação quadrática quando comparados com a equação estimada com cinco níveis, confirmando as observações de Lamberson e Firman (2002) que as dietas experimentais devem estar igualmente distribuídas acima e abaixo do verdadeiro requerimento para que o modelo quadrático apresente um bom ajuste e estimativa do nível-ótimo.

### Modelo “Linear Response Plato” (LRP)

As situações com três níveis podem ser visualizadas na Tabela 8, assim como, os valores do  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , CV e SQD. Para esse modelo, todas as situações apresentaram significância a 0,05, porém, em 3S1-2 o ajuste foi inferior, semelhante ao que ocorreu com o modelo quadrático.

Na Figura 17 está representada a variação nos valores do nível-ótimo estimados com o modelo LRP para as distintas situações. Observou-se que houve pouca variação em relação à situação com cinco níveis, exceto em 3S3-4 e 3S3-5 que subestimaram e 3S1-4 e 3S1-5 que superestimaram o valor ótimo, semelhante ao que ocorreu com quatro níveis, em que 4S3 subestimou e 4S1 superestimou o nível-ótimo em relação à situação base.

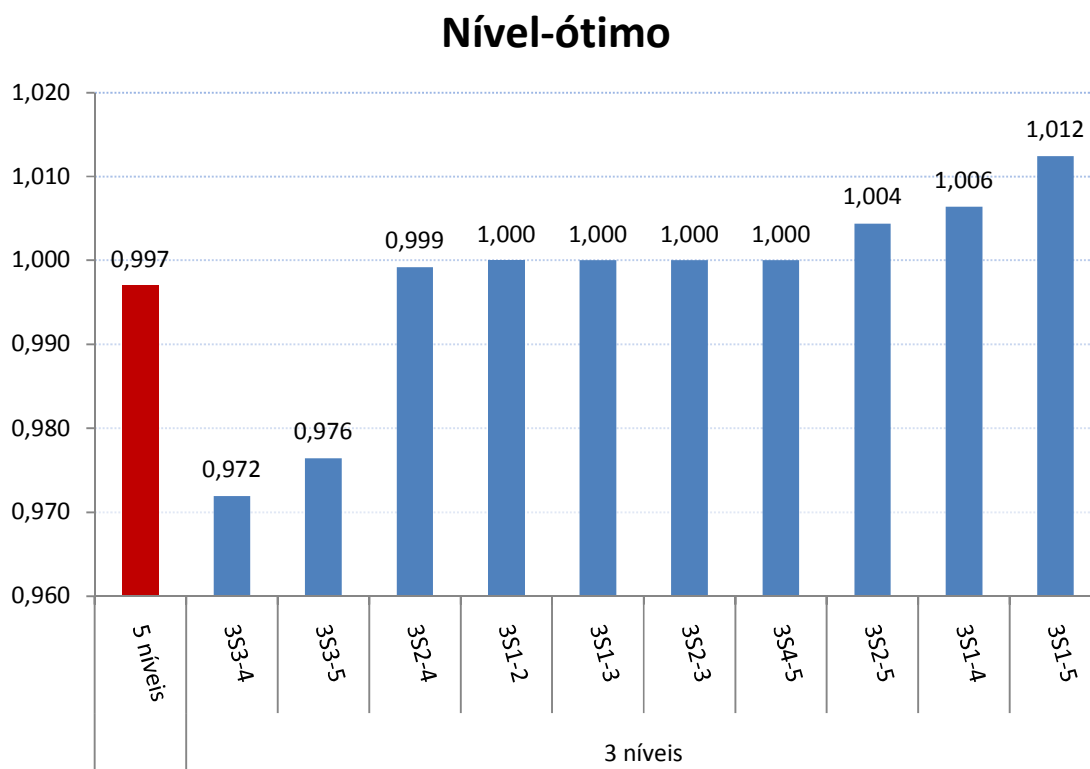


Figura 17 – Variação nos valores do nível-ótimo para o modelo LRP nas situações com três níveis e com cinco níveis.

Para as situações com três níveis, pôde-se constatar que quando o 1º nível não estava presente, houve uma queda na qualidade do ajuste obtido, considerando todos os critérios avaliados e todas as situações, até mesmo em 3S1-3, que apresentou valores intermediários aos outros casos em que o 3º nível estava ausente. As situações 3S1-4 e 3S1-5 apresentaram equações idênticas à situação 4S1, com quatro níveis.

A retirada do 1º nível não causou grandes variações nos valores do nível-ótimo, exceto quando se retirou, também, o 4º e o 5º nível em 3S1-4 e 3S1-5, o que proporcionou uma superestimativa em relação à situação base de +0,009 e +0,015, respectivamente. Nas situações em que os níveis 4 e 5 estavam ausentes (3S4-5), observou-se que o nível-ótimo (1,000) foi muito próximo da situação com cinco níveis, os parâmetros da equação ajustada foram, praticamente, idênticos à situação base e à situação 4S4, como se observa na Figura 18. O ajuste entre essas situações, também, foi muito próximo, apesar de ter sido inferior para o  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$  e CV e superior para a SQD.

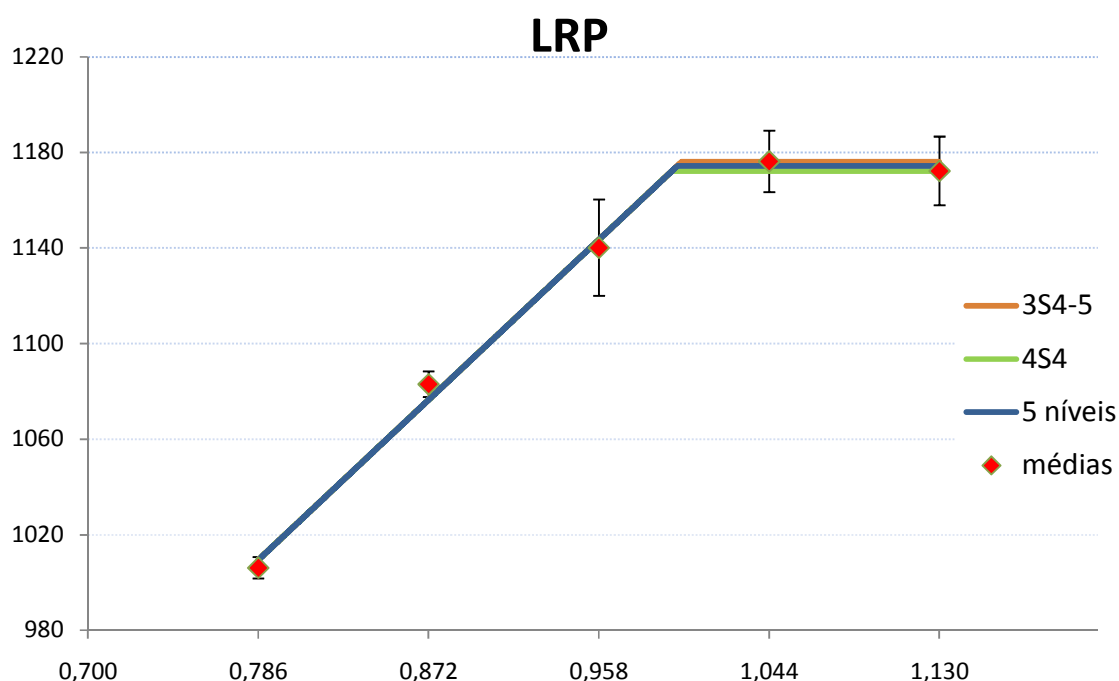


Figura 18 – Representação das situações 3S4-5, 4S4 e a situação com cinco níveis, com a média e o desvio padrão.

A retirada conjunta dos níveis 4 e 5 não influenciou de modo a causar grandes mudanças nos valores do nível-ótimo e no ajuste dos modelos, sendo que, isso ocorreu somente quando a retirada destes níveis estava associada à retirada dos níveis 1 ou 3.

As mesmas constatações sobre o 4º e 5º nível podem ser feitas para as situações 3S3-4 e 3S3-5, que apresentaram equações muito próximas à situação 4S3. Essas situações apresentaram as maiores variações nos valores do nível-ótimo (-0,025 e -0,021, respectivamente) em relação à situação com cinco níveis e os melhores ajustes dentre todos os casos, considerando  $R^2$ ,  $R^2_{aj}$ , CV e SQD, exceto na situação 3S1-3 em que o 1º nível também estava ausente, porém o ajuste nessa situação foi melhor do que todas as outras em que se ausentou o 1º nível.

Na Figura 19, estão representadas as situações extremas com quatro níveis, 4S1 e 4S3 e as situações com três níveis, 3S1-4, 3S1-5, 3S3-4 e 3S3-5. Observa-se que os gráficos 1 e 2 proporcionaram situações idênticas, com a sobreposição das curvas de quatro níveis sobre as curvas de três níveis. As situações 3S3-4 e 3S3-5 apresentaram os maiores valores para o coeficiente linear, conseqüentemente, inclinação das retas foi maior e estas subestimaram o valor do nível-ótimo. As situações 3S1-4 e 3S1-5 apresentaram os menores valores para o coeficiente linear e, nestes casos, ocorreu o oposto, ou seja, a inclinação das retas foi menor e o nível-ótimo foi superestimado.

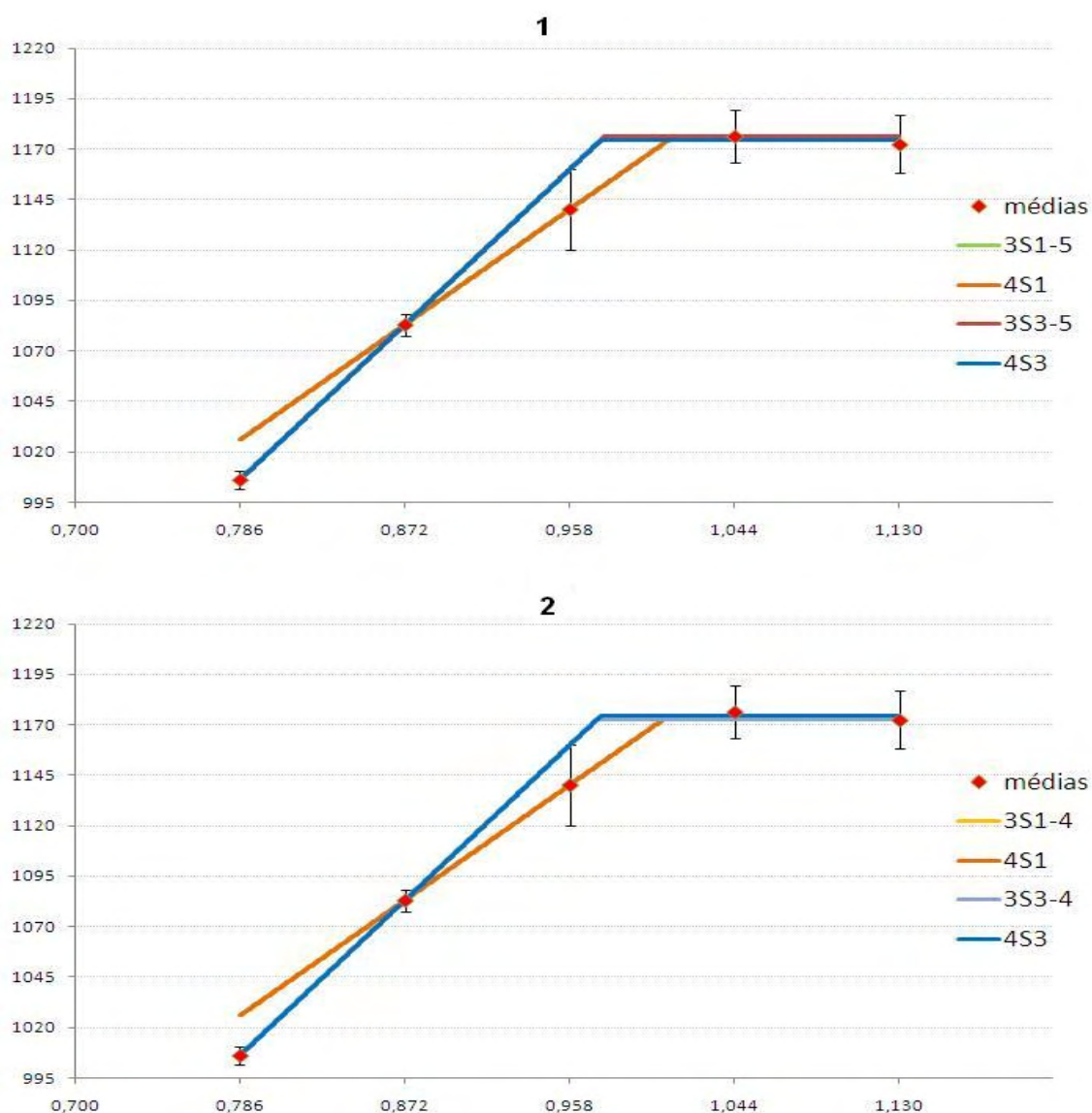


Figura 19 – Representação das situações 4S1, 3S1-5, 4S3 e 3S3-5.

As situações 3S2-4 e 3S2-5 apresentaram resultados muito próximos para o nível-ótimo, com pouca variação em relação à situação com cinco níveis. As equações dessas duas situações foram semelhantes entre si e, também, à situação 4S2. Com exceção do CV, todos os outros valores dos indicadores do ajuste foram superiores que os obtidos para a situação base.

Pôde-se concluir para as situações com três níveis, que o 1º e o 3º nível foram os que mais influenciaram na determinação do nível-ótimo e no ajuste do modelo LRP. Com a retirada destes níveis houve grande variação no valor do nível-ótimo e no ajuste do modelo, concordando com as observações de Anderson e Nelson (1975) que descreveram a importância de se estabelecer adequadamente os níveis próximos à dose-ótima em modelos com platô de resposta.

#### 4.2.3. Combinação do modelo Quadrático com o LRP (LRP+QD)

Na Tabela 9 estão expressos os valores obtidos para a combinação do modelo LRP+QD, assim como as equações quadráticas igualadas ao platô, para cada situação. Observou-se que os valores do nível-ótimo foram intermediários entre os modelos QD e LRP para todas as situações, semelhante às constatações de Baker *et al.* (2002) e Euclides e Rostagno (2001).

A variação nos valores do nível-ótimo para a combinação LRP+QD pode ser visualizada na Figura 20. A maior variação, com quatro níveis estudados, ocorreu após a retirada do 1º e do 5º nível, semelhante ao ocorrido com o modelo quadrático. Para as outras situações a variação foi baixa.

Com três níveis, houve maior dispersão quanto ao valor do nível-ótimo estimado em relação com a situação base, principalmente nas situações: 3S1-2, 3S1-3 e 3S2-3, que subestimaram o valor-ótimo. Nas situações 3S1-4 e 3S2-4 os valores estimados foram os mais próximos da situação com cinco níveis.



Tabela 9 – Equações e níveis-ótimos (NO) estimados para a combinação do modelo LRP+QD, em todas as situações com 5, 4 e 3 níveis.

MODELO	SITUAÇÕES	Modelo quadrático = Platô do LRP	5 NÍVEIS	4 NÍVEIS	3 NÍVEIS
			NO	NO	NO
LRP+QD	5 níveis	$-1764,88x^2 + 3876,38x - 952,14 = 1174,30$	1,064		
	4S1	$-2067,67x^2 + 4492,97x - 1263,61 = 1174,30$		1,049	
	4S2	$-1812,09x^2 + 3961,15x - 988,35 = 1174,30$		1,059	
	4S3	$-1822,38x^2 + 3986,54x - 1003,46 = 1174,30$		1,057	
	4S4	$-1686,31x^2 + 3716,37x - 873,79 = 1172,30$		1,072	
	4S5	$-1375,85x^2 + 3177,84x - 641,70 = 1176,30$		1,044	
	3S1	$2715,13x^2 + 5856,64x - 1978,38 = 1174,30$			1,035
	3S2	$-2052,98x^2 + 4416,48x - 1196,88 = 1174,30$			1,026
	3S3	$-1591,77x^2 + 3532,8x - 787,24 = 1172,30$			1,090
	3S4	$-1331,80x^2 + 3101,76x - 609,06 = 1176,20$			1,040
	3S5	$-2283,59x^2 + 4917,82x - 1468,93 = 1174,30$			1,033
	3S6	$-1851,75x^2 + 4053,27x - 1043,41 = 1172,30$			1,059
	3S7	$-1419,91x^2 + 3263,01x - 682,66 = 1176,30$			1,044
	3S8	$-1721,76x^2 + 3781,86x - 902,70 = 1172,30$			1,067
	3S9	$-1390,54x^2 + 3204,21x - 653,29 = 1176,30$			1,044
	3S10	$-1361,17x^2 + 3150,46x - 629,19 = 1176,30$			1,044

## Nível-Ótimo

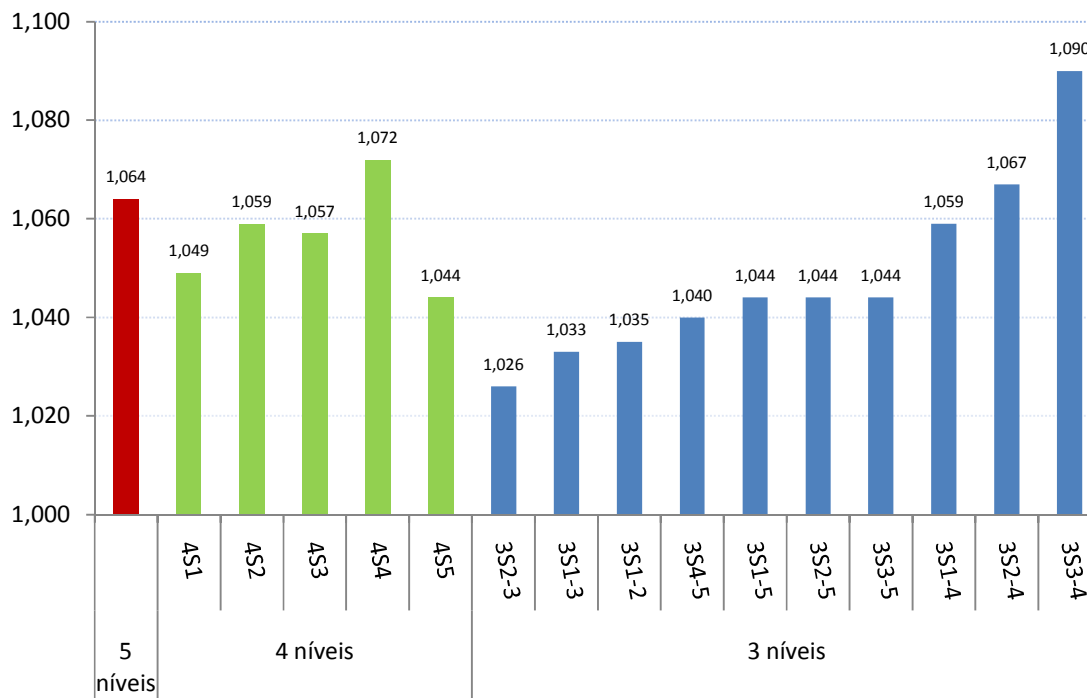


Figura 20 – Variação nos valores do nível-ótimo obtido pela combinação do modelo quadrático com o LRP para todas as situações experimentais.

Tanto no modelo quadrático quanto no LRP, os níveis 2 e 4 não interferiram no valor do nível-ótimo, assim, a estimativa para o LRP+QD em 4S2, 4S4 e 3S2-4 apresentou pouca variação em relação à situação com cinco níveis. A situação 3S1-4, também, apresentou pouca variação, apesar da ausência do 1º nível ter influenciado diretamente no ajuste e determinação do nível-ótimo dos modelos LRP e QD, quando combinados, o valor do nível-ótimo estimado apresentou pouca variação em relação à situação base, conforme se observa na Figura 20.

O ajuste do modelo quadrático e do LRP na situação 3S1-4 foi baixo para os dois modelos e na Figura 21, pode-se observar que, apesar do modelo não ter se ajustado bem, o valor do nível-ótimo não foi influenciado para a combinação dos dois modelos, apresentando pouca variação em relação à situação com cinco níveis.

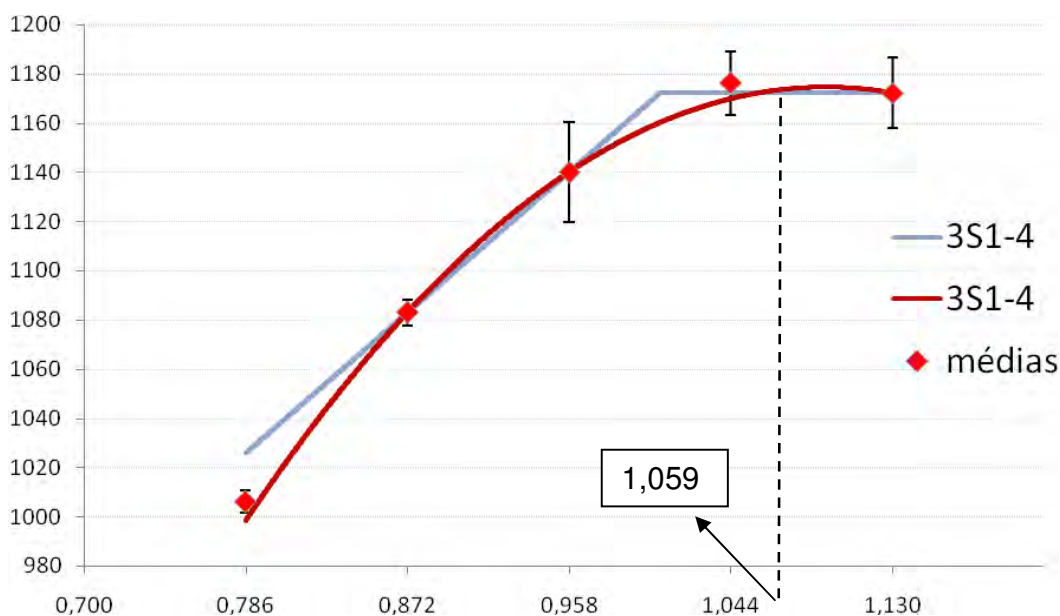


Figura 21 – Representação da combinação do LRP+QD para situação 3S1-4.

Na Figura 22 estão representadas as situações 3S2-3 e 3S2-4, que apresentaram a maior e a menor variação do nível-ótimo em relação à situação base. A situação 3S2-3 apresentou a maior variação na estimativa do nível-ótimo com a combinação do LRP+QD, porém, com o LRP houve pouca variação no valor do nível-ótimo estimado e o ajuste foi adequado. Com o modelo quadrático, o ajuste foi superior do que o da situação base, mas o nível-ótimo foi subestimado, principalmente, devido à curvatura da parábola ter sido maior.

Em 3S2-4 ocorreu a menor variação no nível-ótimo estimado pela combinação LRP+QD em relação aos cinco níveis. Pode-se observar que essa situação nos modelos LRP e quadrático, quando analisados separados, foi a mais próxima do valor estimado com os cinco pontos e o ajuste foi adequado nos dois modelos.

O nível-ótimo estimado pela combinação do modelo LRP e QD (LRP+QD) depende, principalmente, do ajuste obtido em cada modelo separado. A curvatura da parábola (coeficiente quadrático) e o platô formado são resultados do ajuste dos

modelos aos níveis observados. Pôde-se constatar que o nível-ótimo estimado pela combinação do LRP+QD foi influenciado, principalmente, pelos níveis 1, 3 e 5.

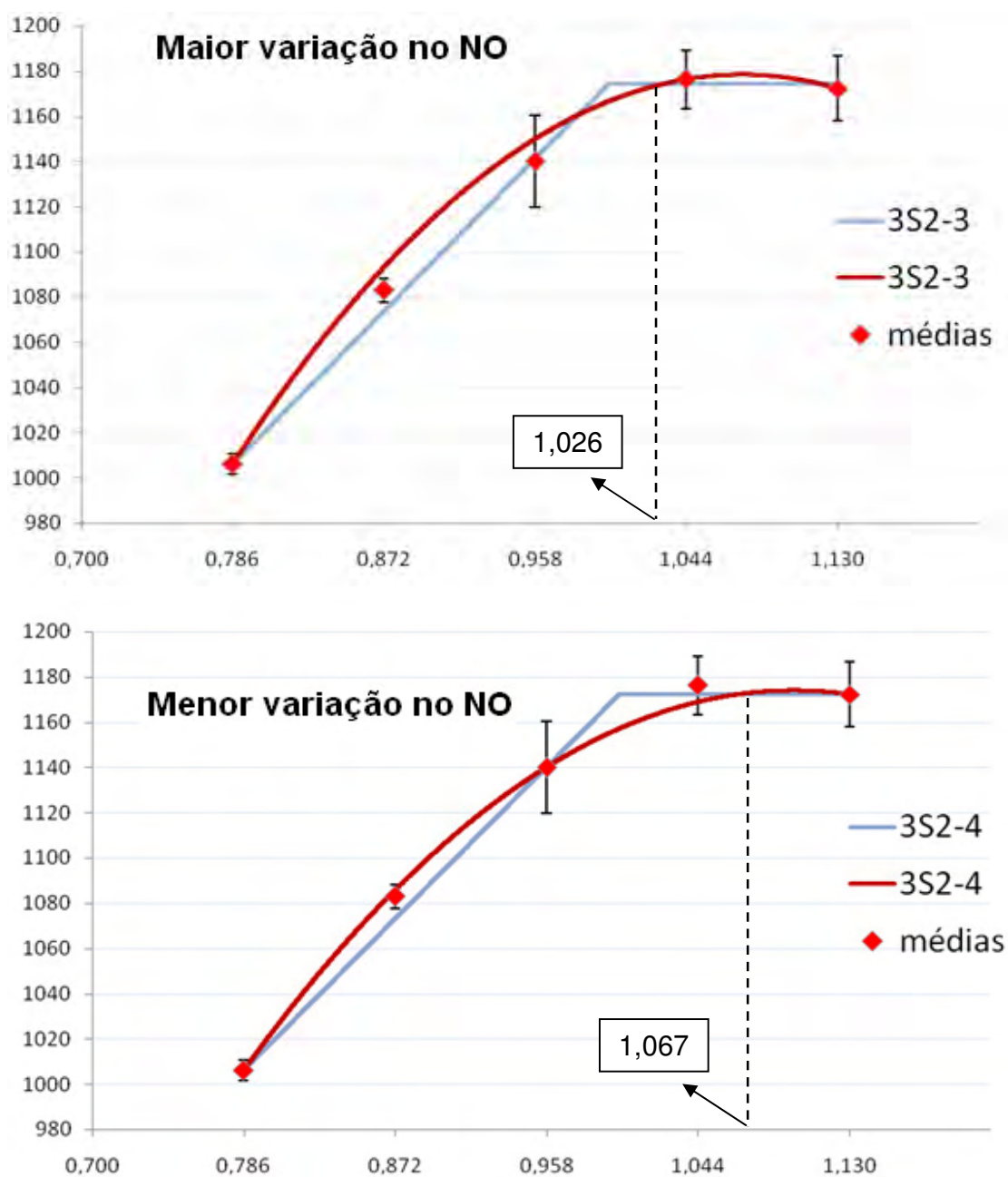


Figura 22- Representação das situações 3S2-3 e 3S2-4 para a combinação do modelo quadrático com o LRP.

## 6. CONCLUSÕES

A heterocedasticidade não influenciou na estimativa do nível-ótimo, independente do modelo utilizado, porém, proporcionou variações nos parâmetros das equações estimadas e influenciou na qualidade do ajuste representado pelas estatísticas:  $R^2$ ,  $R^2$  ajustado, Coeficiente de Variação e Soma dos Quadrados dos Desvios.

O número e a posição dos níveis influenciaram na estimativa do nível-ótimo e no ajuste dos modelos. Constatou-se que, com os níveis distribuídos próximos ao verdadeiro requerimento os modelos LRP e QRP apresentaram menor variação e uma estimativa mais confiável do nível-ótimo, entretanto, quando houve maior dispersão em relação ao verdadeiro requerimento, os modelos QD e EXP apresentaram melhores resultados.

Recomenda-se que para avaliar o ajuste e adequação de um modelo aos dados, se utilize mais de uma estatística, pois como se pôde constatar, o  $R^2$  e o  $R^2$  ajustado foram influenciados pelos primeiros níveis e pelo nível-ótimo. O CV foi influenciado pela média gerada em cada situação, por isso, foi maior sem os primeiros níveis. A SQD foi sensível ao número de níveis presentes, sendo maior nas situações com um número maior de níveis.

## 7. IMPLICAÇÕES

Constatou-se que o bom ajuste de um modelo aos dados experimentais depende não apenas da escolha do modelo, mas também do número e da posição dos níveis utilizados para o ajuste. Quando os níveis estiverem distribuídos em uma faixa próxima aos níveis centrais, os modelos com platô proporcionariam resultados mais confiáveis. Já modelos como o quadrático e o exponencial seriam mais adequados para situações quando os níveis estiverem distribuídos em uma faixa mais ampla em torno do verdadeiro requerimento.

A heterocedasticidade influenciou diretamente nas estatísticas utilizadas para avaliar o ajuste e ocasionou pequenas variações nos valores dos parâmetros das equações obtidas, porém, não interferiu na estimativa do nível-ótimo. Apesar de não ter se observado alterações nos valores ótimos, ressalta-se que as pressuposições de normalidade e homocedasticidade devem ser sempre atendidas em ensaios dose-resposta.

A presença de um número maior de níveis estudados proporciona resultados mais confiáveis e os níveis devem ser distribuídos com base no verdadeiro requerimento do animal. Para os modelos QD e EXP, os níveis extremos foram os que mais influenciaram, ocasionando variações consideradas no ajuste e nos valores do nível-ótimo, sendo, recomendável escolher esses modelos em situações na qual se observa dispersão dos níveis em relação ao verdadeiro requerimento do animal. Quando os níveis estiverem condensados próximos do verdadeiro requerimento, os modelos com platô (LRP e QRP) são mais adequados. A combinação dos modelos LRP+QD proporcionou pouca variação nos valores do nível-ótimo, porém os valores foram diretamente dependentes do ajuste obtido pelo modelo quadrático e pelo LRP.

A escolha dos modelos em ensaios dose-resposta deve ser criteriosa, preferencialmente realizada junto com o planejamento do experimento, assim como o número de níveis que serão estudados, a distribuição dos níveis e dos animais e as dietas que serão avaliadas.

## 8. ANEXOS

### Anexo 1 – Rotinas de programação utilizadas no programa SAS

```
OPTIONS LS=78 PS=64 PAGENO=1;
DATA A;
TITLE "DADOS";
INPUT LS YO;
CARDS;
0.786 1001.01
0.786 1008.08
0.786 1009.35
0.872 1077.43
0.872 1083.47
0.872 1088.10
0.958 1162.85
0.958 1133.36
0.958 1124.25
1.044 1181.35
1.044 1185.86
1.044 1161.70
1.130 1177.04
1.130 1156.16
1.130 1183.66;
PROC PRINT;
RUN;
```

```
PROC GLM DATA=A ALPHA=0.05;
CLASS LS;
MODEL YO=LS / SS3;
MEANS LS / HOVTEST=LEVENE;
RUN;
```

```
*****REGRESSAO QUADRATICA *****;
DATA AQ; SET A;
LS2=LS**2;
RUN;
PROC REG DATA=AQ;
MODEL YO=LS LS2;
OUTPUT OUT=PQ P=PQD R=RQD;
RUN;
```

```
PROC PRINT DATA=PQ;
RUN;
PROC GPLOT DATA=PQ;
```

```

PLOT YO*LS PQD*LS/OVERLAY;
SYMBOL1 V=STAR C=BLUE I=NONE;
SYMBOL2 V=DOT C=RED I=JOIN;
RUN;

```

```

****REGRESSAO EXPONENCIAL ****;
PROC NLIN METHOD=DUD DATA=A;
PARAMETERS A=1600 B=400 C=6 D=0.76;
MODEL YO=A+B*(1-EXP(-C*(LS-D)));
OUTPUT OUT=EP P=PRED_EP R=RES_EP;
RUN;
PROC PRINT DATA=EP;
RUN;
PROC GPLOT DATA=EP;
PLOT YO*LS PRED_EP*LS/OVERLAY;
SYMBOL1 V=STAR C=BLUE I=NONE;
SYMBOL2 V=DOT C=RED I=JOIN;
TITLE H=1.5 "REGRESSAO EXPONENCIAL";
RUN;

```

```

***** MODELO LRP *****;
PROC NLIN DATA=A;
PARAMETERS L=1270 U=200 R=1;
Z=(LS<R)*(LS-R);
MODEL YO=L+U*Z;
OUTPUT OUT=LP P=PLP R=RLP;
RUN;
PROC PRINT DATA=LP;
RUN;
PROC GPLOT DATA=LP;
PLOT YO*LS PLP*LS/OVERLAY;
SYMBOL1 V=STAR C=BLUE I=NONE;
SYMBOL2 V=DOT C=RED I=JOIN;
RUN;

```

```

***** MODELO QRP *****;
PROC NLIN DATA=A;
PARAMETERS L=1270 U=200 R=1 W=8;
Z=(LS<R)*(LS-R);
MODEL YO=L +U*Z + W*Z**2;
OUTPUT OUT=QP P=PQP R=RQP;
RUN;
PROC PRINT DATA=QP;
RUN;
PROC GPLOT DATA=QP;
PLOT YO*LS PQP*LS/OVERLAY;
SYMBOL1 V=STAR C=BLUE I=NONE;
SYMBOL2 V=DOT C=RED I=JOIN;
RUN;

```



## 9. REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, T.P.; RAO, V.Y.; An investigation on functional models for fertilizer response studies. **Journal of Indian Society of Agricultural and Statistics**. v. 18, p. 45–61, 1965.
- ALVAREZ V., V.H.; ALVAREZ, G.A.M.; Apresentação de equações de regressão e suas interpretações. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v.28, p. 28-32, 2003.
- AMARANTE JÚNIOR, V.S.; COSTA, F.G.P.; BARROS, L.R.; NASCIMENTO, G.A.J.; BRANDÃO, P.A.; SILVA, J.H.V.; PEREIRA, W.E.; NUNES, R.V.; COSTA, J.S.; RIBEIRO M.L.G.; Níveis de lisina para frangos de corte nos períodos de 22 a 42 e de 43 a 49 dias de idade, mantendo a relação metionina + cistina. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.34, n.4, p.1188-1194, 2005.
- ANDERSON, R.L.; NELSON, L.A.; Some problems in estimation of single nutrient functions. **Bulletim of International Statistic Institute**. v. 44, p. 203–222, 1971.
- ANDERSON, R.L.; NELSON, L.A.; A family of models involving intersecting straight lines and concomitant experimental designs useful in evaluating response to fertilizer nutrients. **Bulletim of International Statistics Institute**. v. 31, p. 303–318, 1975.
- ÁVILA, G.S.S.; **Cálculo das funções de uma variável**. 7 ed, vol.1, Rio de Janeiro: LTC, 2003, 304 p.
- BAKER, D.H.; BATAL, A.B.; PARR, T.M.; AUGSPURGER, N.R.; PARSONS, C.M.; Ideal Ratio (Relative to Lysine) of Tryptophan, Threonine, Isoleucine, and Valine for Chicks During the Second and Third Weeks Posthatch. **Poultry Science**, v.81, p. 485-494, 2002.
- BAKER, D.H.; Ideal amino acids patterns for broiler chicks. In: D'MELLO, J.P.F.; **Amino acid in animal nutrition**. 2<sup>nd</sup> edition, CABI. 2003. p.223-235.
- BAKER, D.H.; Problems and pitfalls in animal experiments designed to establish dietary requirements for essential nutrients – Critical Review. **The Journal of Nutrition**. v. 116, p. 2339-2349, 1996.
- BARBOZA W.A.; ROSTAGNO, H.S.; ALBINO, L.F.T.; RODRIGUES, P.B.; Níveis de lisina para frangos de corte de 22 a 40 e 42 a 48 dias de idade. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.29, n.4, p.1091-1097, 2000.
- BARRETO, H.J.; WESTERMAN, R.L.; YIELDFIT: A computer program for determining economic fertilization rates. **Agronomy Journal**, v. 16, p. 11-14, 1987.

- BARROS, J.M.S.; GOMES, P.C.; ROSTAGNO, H.S.; ALBINO, L.F.T.; NASCIMENTO, A.H.; Exigência nutricional de sódio para frangos de corte de 1 a 21 dias de idade. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 3, suplemento 01, p.1044-1051, 2001.
- BÉLANGER, G.; WALSH, J.R.; RICHARDS, J.E.; MILBURN, P.H.; ZIADI, N.; Comparison of Three Statistical Models Describing Potato Yield Response to Nitrogen Fertilizer. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 902-908, 2000.
- BLACKMER, A.M.; MEISINGER, J.J.; Re-examination of the methodology used for selecting nitrogen inputs in to crop production. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.78, p. 571–575, 1990.
- BORGES, A.F.; OLIVEIRA, R.F.M.; DONZELE, J.L.; ORLANDO, U.A.D.; FERREIRA, R.A.; SARAIVA, E.P.; Exigência de lisina para frangos de corte machos no período de 22 a 42 dias de idade, mantidos em ambiente quente (26°C). **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n.5, p.1993-2001, 2002.
- BOX, G.E.P.; Some theorems on quadratic forms applied in the study of analysis of variance problems, i. effect of inequality of variance in the one-way classification. **The Annals of Mathematical Statistics**. v.25, n.2, pp. 290-302, 1954.
- BRAGA, J. M. Avaliação da fertilidade do solo: **Ensaio de campo**. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária. 1983. 101p.
- BUSSAB, W.O; MORETTIN, P.A; **Estatística Básica**. 5 ed, São Paulo, Saraiva, 2005, 521 p.
- CARRIJO, O.A.; HOCHMUTH, G.; Estimativa do rendimento do tomateiro usando modelos estatísticos com teores iniciais de fósforo no solo e níveis de adubação fosfatada. 1998. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/pa/pa19.html>. Acesso em: 12/12/2008.
- CERRATO, M. E.; BLACKMER, A. M; Comparison of models for describing corn yields response to nitrogen fertilizer. **Agronomy Journal**, v.82, p.138-143, 1990.
- CHARNET, R.; FREIRE, C.A.L.; CHARNET, E.M.R.; BONVINO, H.; **Análise de modelos de regressão linear**: com aplicações. 2 ed. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 368p.
- CHATTERJEE, S.; PRICE, B.; **Regression Analysis by Example**. 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 1991, 278 p.
- COELHO, L. S. S.; COSTA, P. M. A.; SILVA, M. A.; PEREIRA, J. A. A.; ROSTAGNO, H. S.; BARBOSA, H. P. Modelos para estimar exigências nutricionais em suínos.

- Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 16, n. 1, p. 102-110, 1987.
- COLWELL, J.D.; **Estimating fertilizer requirements. A quantitative approach.** CAB International, Wallingford, UK, 1994.
- CONOVER, W.J.; JOHNSON, M.E.; JOHNSON, M.M.; A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf bidding data. **Technometrics**, v.23, n.4, p. 351-361, 1981.
- COSTA, F.G.P.; ROSTAGNO, H.S.; ALBINO, L.F.T.; GOMES, P.C.; TOLEDO, R.S.; Níveis dietéticos de lisina para frangos de corte de 1 a 21 e 22 a 40 dias de idade. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.30, n.5, p.1490-1497, 2001.
- DALE, N.; Los requerimientos de nutrientes: hasta que punto son aplicables? **Revista Avicultura Profesional**, v.2, p.63-64, 1984.
- D'MELLO, J.P.F; LEWIS, D.; Amino acids interactions in chick nutrition. 3. Interdependence in amino acids requirements. **British Poultry Science**. v.11, p.367-385, 1970.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H.; **Applied Regression Analysis**. 1 ed. New York, John Wiley & Sons, 1966, 407p.
- EUCLYDES, R.F.; ROSTAGNO, H.S.; Estimativas dos Níveis Nutricionais Via Experimentos de Desempenho. Nutrição Aves e Suínos. In. WORKSHOP LATINO-AMERICANO AJINOMOTO BIOLATINA, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu. 2001. p.77-88.
- FREUND, R.J.; WILSON, W.J. **Regression analysis: statistical modeling of a response variable**. San Diego: Academic Press, 1998. 444p.
- GLASS, G.V.; Testing Homogeneity of Variances. **American Educational Research Journal**. v.3, n.3, p. 187-190, 1966.
- GOUS, R. M.; Measurement of response in nutritional experiments. In: FISHER, C., BOOLMAN, K.N, **Nutrient Requirements of Poultry and Nutritional Research**. London, ed. Butterworth Press, 1986, p. 41-58.
- HOFFMANN, R; **Estatística para economistas**. 4 ed. São Paulo, Ed. Pioneira Thomson Learning, 2006, 432p.
- HOFFMANN, R.; VIEIRA, S.; **Análise de Regressão: uma introdução à Econometria**. 1 ed., São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977, 339 p.

- KRAPS, M.; LAMBERSON, W.R.; **Biostatistics for Animal Science**. CABI Publishing. ISBN 0 85199 820 8. 2004.
- LAMBERSON, W.R.; FIRMAN, J.D.; A comparison of quadratic versus segmented regression procedures for estimating nutrient requirements. **Poultry Science**. v.81, p.481-484, 2002.
- MALHEIROS, E.B., FEITOSA, J.V.; Ajuste de modelos para descrever a cinética da degradação ruminal de concentrados e volumosos. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 50., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina: 50 RBRAS e 11 SEAGRO, 2005. 1 CD-ROM.
- MAMEESH, M. S.; SCHENDEL, H. E.; NORTON, H.W.; JOHNSON, B. C.; The effect of penicillin on the thiamine requirement of the rat. **Br. J. Nutr.**, v.10, p.23-27, 1956.
- MELO, A.S.; HEPP, L.U.; Ferramentas estatísticas para análises de dados provenientes de biomonitoramento. **Oecologia Brasiliensis**, v.12, n.3, p.463-486, 2008.
- MORRIS, T.R.; **Experimental design and Analysis in Animal Sciences**. Ed. 8. University of Reading-UK; CABI Publishing, 1999. 208p.
- MORRIS, T.R.; The interpretation of response data from animal feeding trials. In: **Recent Developments in Poultry Nutrition** (eds DJA Cole and W Haresign), pp.1-11. Butterworths, London. 1989.
- NASCIMENTO, D.C.N.; SAKOMURA, N.K.; SIQUEIRA, J.C.; DOURADO, L.R.B.; MARCATO, S.M.; DORIGAM, J.C.P.; Exigências de lisina digestível para aves da linhagem Isa Label, criadas no sistema semi-confinado. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 44., 2007, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2007. p.1-3.
- NELSON, L.A.; VOSS, R.D.; PESEK, J.T.; Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. In: Engelstad, O.P. (Ed.), **Fertilizer Technology and Use**, 3<sup>th</sup> ed. ASA, Madison, 1985, p. 53–90.
- PACK, M.; Models use to estimate nutrient requirements with emphasis in economic aspects. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS DE AVES E SUÍNOS. 1996, Viçosa, **Anais**. Viçosa-MG: Universidade Estadual de Viçosa, 1996, p.43-54.
- PACK, M.; HOEHLER, D.; LEMME, A.; Economic assessment of amino acid responses in growing poultry. In: D'MELLO, J.P.F., **Amino acids in animal nutrition**. CAB International, 2 ed., 2003, p.459-483.
- PAGANO, M.; GAUVREAU, K.; **Princípios de Bioestatística**. Tradução da 2 ed. norte-americana. São Paulo, Ed. Pioneira Thomson Learning, 2004, 506p.

- PARKS, J.R.; Growth curves and the physiology of growth. II. Effects of dietary energy. **American Journal of Physiology**, v.219, p.837-839, 1970.
- PIMENTEL-GOMES, F.; **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.
- PORTZ, L.; DIAS, C.T.S.; CYRINO, J.E.P.; Regressão Segmentada como Modelo de Determinação na Exigência Nutricional de Peixes. **Scientia Agrícola**, v.57, n.4, p.601-607, 2000.
- RATKOWSKY, D.A.; **Nonlinear regression modeling**: a unified practical approach. New York: M. Dekker, 1983. p.135-154.
- REGAZZI, A. J.; Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**, Viçosa, v.50, n.287, p.9-26, 2003.
- REZENDE, D.M.L.C.; MUNIZ, J.A.; FERREIRA, D.F.; FONSECA e SILVA, F.; AQUINO, L.H.; Ajuste de modelos de platô de resposta para a exigência de zinco em frangos de corte. **Revista Ciência e Agrotecnologia**. v.31, n.2, p.468-478, 2007.
- REZENDE, D.M.L.C.; **Ajustes de modelos de platô de resposta aplicados ao estudo de exigência nutricional de frangos de corte**. 2002. 76p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia / Estatística Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- REZENDE, D.M.L.C.; MUNIZ, J.A.; FERREIRA, D.F.; Proposição de um modelo não linear com response plateau. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA (RBRAS), 45, 2000. São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p.96-99.
- RIBEIRO, M.L.G.; **Níveis de Sódio na ração de frangas e galinhas poedeiras durante o primeiro e o segundo ciclos de postura**. 2007. 128f. Tese (Doutorado em Zootecnia), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2007.
- ROBBINS, K.L.; **A method, SAS program, and example for fitting the broken-line to growth data**. Tennessee: University of Tennessee, Agricultural Experiment Station, 1986. 8p. (Research Report 86/09).
- ROBBINS, K.L.; NORTON, H.W.; BAKER, D.H.; Estimation of nutrient requirements from growth data. **Journal of Nutrition**, v.109, p.1710-1714, 1979.
- RODRIGUES, S.A.; DINIZ, C.A.R.; Modelo de regressão heterocedástico. **Revista de Matemática e Estatística**. V.24, n.2, p.133-146, 2006.

- ROSTAGNO, H.S.; BÜNZEN, S.; SAKOMURA, N.K.; ALBINO, L.F.T.; Avanços metodológicos na avaliação de alimentos e de exigências nutricionais para aves e suínos. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 36, suplemento especial, p.295-304, 2007.
- ROSTAGNO, H.S.; BARBARINO JUNIOR, P.; BARBOSA, W.A.; Exigências nutricionais das aves determinadas no Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS DE AVES E SUÍNOS, Viçosa, MG, 1996. **Anais...** Viçosa: DZO, 1996. p.361-388
- RUNHO, R.C.; GOMES, P.C.; ROSTAGNO, H.S.; ALBINO, L.F.T.; LOPES, P.S.; POZZA, P.C.; Exigência de fósforo disponível para frangos de corte machos e fêmeas de 1 a 21 dias de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.30, n.1, p.187-196, 2001.
- SAKOMURA, N.K.; ROSTAGNO, H.S.; Métodos Dose-Resposta para Determinar Exigências Nutricionais. In. \_\_\_\_ **Métodos de Pesquisa em Nutrição de Monogástricos**. Jaboticabal, FunepUnesp, 2007. v.01, cap. 05, p. 157-194.
- SARMENTO, J.L.R.; TORRES, R.A.; SOUSA, W.H.; BRENDA, F.C.; COBUCI, J.A.; FREITAS, M.S.; ARAUJO, C.V.; Comparação de modelos de regressão não-linear no ajuste da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. In: 40ª REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, Sociedade Brasileira de Zootecnia. 2003. 5p.
- SCHUTTE, J.B.; PACK, M.; Sulfur amino acids requirements of broiler chick from 14 to 38 days of age. 1. Performance and carcass yield. **Poultry Science**. v.74, p.480-487, 1995.
- SEARLE, S.R.; **Linear models**. New York: John Wiley, 1971. 532p.
- SIQUEIRA, J.C.; **Estimativa das exigências de lisina para frangos de corte pelo método dose-resposta e fatorial**. 2009. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.
- SIQUEIRA, J.C.; SAKOMURA, N.K.; NASCIMENTO, D.C.N.; NARUMOTO, R.; GABRIEL JUNIOR, C.; MORELATO, R.G.N.; Modelos para estimar as exigências de lisina de aves da linhagem Isa-Label. In: 44ª REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 2007, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal, Sociedade Brasileira de Zootecnia. 2007.
- SOUSA, M.S.; **Efeitos de fontes protéicas com distintas degradabilidades sobre o aproveitamento da fibra, no nitrogênio e do amido em rações para bovinos**.

Jaboticabal, 1998. 79p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1998.

WHITE, H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. **Econometrica**, Malden, v.48, p.817-838, 1980.

ZAR, J.H. 1999. **Biostatistical Analysis**. Prentice Hall, New Jersey, 663 pp.