



## DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES  
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

---

# Dinâmica do Modelo Compartmental para Cinética de $^{15}\text{N}$ em Frangos de Corte

**Nelson José Peruzzi**<sup>1</sup>

Departamento de Ciências Exatas, FCAV, UNESP, Jaboticabal, SP

**Allan Reis Troni**<sup>2</sup>

Faculdade Dr. Francisco Maeda, FAFRAM, Ituverava, SP

**Nilva Kazue Sakomura**<sup>3</sup>

Departamento de Zootecnia, FCAV, UNESP, Jaboticabal, SP

**Edney Pereira da Silva**<sup>4</sup>

Departamento de Zootecnia, FCAV, UNESP, Jaboticabal, SP

**Amanda Liz Pacífico Manfrim Perticarrari**<sup>5</sup>

Departamento de Ciências Exatas, FCAV, UNESP, Jaboticabal, SP

**Fábio Roberto Chavarette**<sup>6</sup>

Departamento de Matemática, FEIS, UNESP, Ilha Solteira, SP

**Resumo.** Este trabalho apresentou um modelo teórico e um modelo compartmental mecanicista da cinética de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  em frangos de corte, além de um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares de primeira ordem com coeficientes constantes no tempo, assumindo-se que não há atraso no processo de transporte das moléculas de  $^{15}\text{N}$  entre os compartimentos. Foi realizada uma simulação do sistema de equações, apresentando a cinética do  $^{15}\text{N}$  após o seu metabolismo no jejuno, no fígado, no plasma, e a deposição de  $^{15}\text{N}$  no músculo peitoral e a excreção. A partir das simulações foi possível compreender a transferência dos nutrientes entre os tecidos de frangos de corte e as mudanças na cinética ao longo do crescimento (0 a 14 dias) dos animais, observando um rápido enriquecimento dos tecidos estudados.

**Palavras-chave.** Turnover, Isótopos, Traçador

---

<sup>1</sup> peruzzi@fcav.unesp.br

<sup>2</sup> allan.reis.troni@gmail.com

<sup>3</sup> sakomura@fcav.unesp.br

<sup>4</sup> edney@fcav.unesp.br

<sup>5</sup> amanda@fcav.unesp.br

<sup>6</sup> fabioch@mat.feis.unesp.br

## 1 Introdução

Para que haja o crescimento animal adequado, exige-se a ingestão de certas quantidades de nutrientes que, associados ao "maquinário biológico", são convertidos em matéria seca depositada [7]. Na nutrição animal aplicada é comum o uso de modelos matemáticos para entender os sistemas biológicos, na tentativa de englobar características fisiológicas a respostas ambientais que influenciam a produção animal.

De modo simplificado, pode-se afirmar que o crescimento animal é influenciado pelo provisionamento dos alimentos, pela sanidade animal, pelas condições ambientais e pela taxa de deposição dos nutrientes nos tecidos e órgãos, favorecendo as funções necessárias para o funcionamento ideal do metabolismo. Uma parte de todo nutriente ingerido pelos animais é convertida para a manutenção das suas funções fisiológicas básicas (manutenção), outra parte é depositada como produto (carne, leite, lã, ovo, penas) e o restante, que não é aproveitado, é excretado.

O sistema biológico do crescimento animal é um balanço entre síntese e degradação (*turnover*) dos nutrientes; processos estes que são independentes e influenciados por diversos fatores, tais como a qualidade das proteínas, o consumo de ração, a idade do animal [4], o nível proteico da dieta, a temperatura, o ambiente [5] e o nível energético da alimentação [3].

Para iniciar a descrição da cinética proteica em organismos animais, é necessário o conhecimento fisiológico e metabólico dos nutrientes, o que favorece a obtenção de dados do fluxo de massas de moléculas entre órgãos e, neste aspecto, os isótopos estáveis são utilizados como traçadores [2]. Os traçadores são utilizados em pesquisas por não sofrerem decaimento espontâneo e não emitirem radiação, fato oposto ao observado nos isótopos radioativos. Dentre os isótopos estáveis, o carbono, o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e o enxofre destacam-se por possuírem elementos abundantes, que são representados por  $^{12}\text{C}$ ,  $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{14}\text{N}$  e  $^{32}\text{S}$ , e elementos menos abundantes, isto é, com menor prevalência na biosfera, que são representados por  $^{13}\text{C}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{33}\text{S}$  e  $^{34}\text{S}$ .

Os isótopos estáveis estão presentes nos diversos sistemas naturais e sua distribuição reflete, de forma integrada, o histórico dos processos físicos e metabólicos do ambiente [6]. Desta forma, funcionam como excelentes traçadores pois podem ser usados como uma referência na análise da cinética do enriquecimento tecidual por ser em menos abundantes no organismo em estudo. Esta metodologia consiste em fornecer ao indivíduo uma dieta controle com excesso de um isótopo estável, de modo que a razão entre o elemento menos abundante e o mais abundante seja diferente da razão natural no sistema. A razão entre o composto menos abundante e o mais abundante é chamada razão isotópica. Exemplificando: a razão  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  entre as moléculas de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  (menos abundante) e  $^{14}\text{N}$  (mais abundante) em uma dieta, pode ser modificada de modo a torná-la diferente do enriquecimento natural de um animal.

Esta técnica está baseada na hipótese de que o equilíbrio do  $^{15}\text{N}$  nos diversos tecidos do animal é perturbado com a dieta controle. Uma vez aplicada a metodologia, estuda-se a cinética da distribuição de  $^{15}\text{N}$  no corpo do animal em função do tempo para avaliar a

sua síntese e degradação. A trajetória do  $^{15}\text{N}$  pode ser descrita por meio da modelagem matemática compartimental para obter informações sobre o comportamento cinético dos sistemas biológicos [1].

Este trabalho tem como objetivo descrever a cinética do nitrogênio  $^{15}\text{N}$  em frangos de corte na fase de crescimento inicial (0 a 14 dias) por análise compartimental e estudar a dinâmica do modelo matemático do sistema resultante.

## 2 Modelo teórico para cinética de $^{15}\text{N}$ em frangos de corte

A definição do modelo teórico é o passo inicial da análise compartimental, pois nele serão definidos os compartimentos e as taxas de transferências entre os mesmos [1]. A Figura 1 apresenta o modelo teórico para cinética do nitrogênio  $^{15}\text{N}$  (isótopo estável) em frangos de corte (machos Cobb 500®), sendo que (I) representa a passagem do alimento pelo trato gastrointestinal desde a ingestão do  $^{15}\text{N}$  até sua completa absorção, (II) representa os órgãos internos centrais responsáveis pelo metabolismo, (III) representa tecido de deposição do nitrogênio absorvido e (IV) representa a excreta.

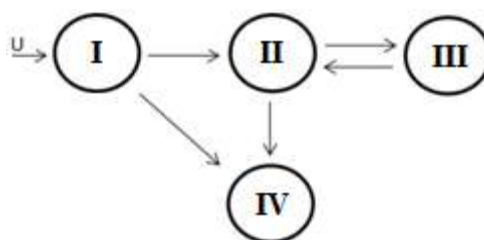


Figura 1: Modelo teórico inicial da cinética de nitrogênio em frangos de corte.

No modelo teórico representado na Figura 1 supõem-se que, dentro dos compartimentos, o  $^{15}\text{N}$  possui distribuição uniforme no tempo, isto é, o  $^{15}\text{N}$  é misturado instantaneamente e de forma homogênea em todos os tecidos estudados e a quantidade de  $^{15}\text{N}$  fornecida aos frangos de corte é suficientemente pequena de forma a não alterar o estado de equilíbrio das funções metabólicas do animal. Além disso, supõe-se que o  $^{15}\text{N}$  ingerido é absorvido instantaneamente pelo jejuno.

## 3 Modelo Matemático para Cinética de $^{15}\text{N}$ em Frangos de Corte

A cinética de  $^{15}\text{N}$  do modelo compartimental mecanicista de frangos de corte na fase de crescimento (0 a 14 dias) é apresentado na Figura 2. Nesse modelo considera-se 5 compartimentos e 7 taxas de transferências, sendo que os compartimentos fígado e plasma pertencem ao compartimento II do modelo teórico.

A entrada de  $^{15}\text{N}$  no corpo da ave é representado pela função impulso  $U$ , simulando a entrada do alimento em uma dose única. As taxas de transferências do nitrogênio entre os diversos compartimentos são denotadas por  $K(i,j)$ , onde  $i$  representa o compartimento de destino do nitrogênio e  $j$  o de origem.

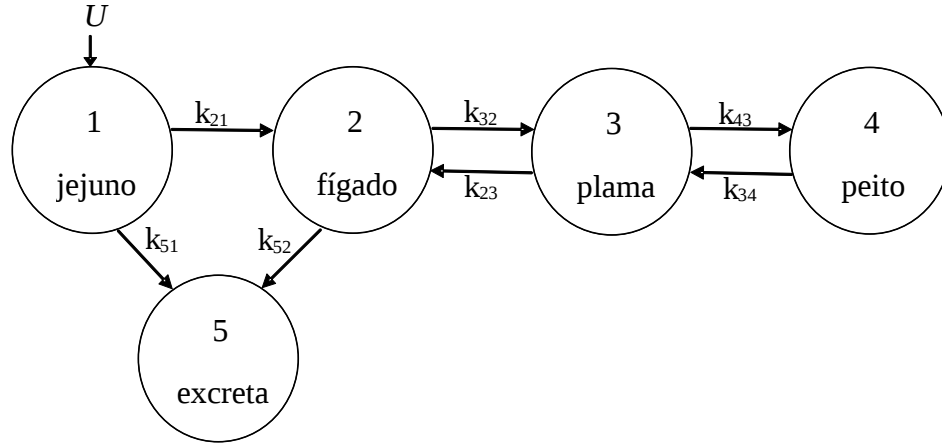


Figura 2: Modelo compartimental mecanicista da cinética de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  em frangos de corte durante a fase de crescimento.

Embora o processo cinético seja interdependente, as taxas de transferências entre os compartimentos podem ser consideradas como independentes umas das outras. Desta forma, o modelo compartimental mecanicista apresentado na Figura 2 pode ser escrito como um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares de primeira ordem com coeficientes constantes no tempo, e é dado por:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -(k_{21} + k_{51})y_1 \\ \dot{y}_2 = k_{21}y_1 + k_{23}y_3 - (k_{32} + k_{52})y_2 \\ \dot{y}_3 = k_{32}y_2 + k_{34}y_4 - (k_{23} + k_{43})y_3 \\ \dot{y}_4 = k_{43}y_3 - k_{34}y_4 \\ \dot{y}_5 = k_{51}y_1 + k_{52}y_2 \end{cases} \quad (1)$$

onde,  $y_1$  é a quantidade de  $^{15}\text{N}$  no compartimento jejuno,  $y_2$  é a quantidade de  $^{15}\text{N}$  fígado,  $y_3$  no plasma,  $y_4$ , no músculo peito e  $y_5$  é a quantidade de  $^{15}\text{N}$  excretada.

Em (1), as taxas de transferências representam as trocas de moléculas  $^{15}\text{N}$  nos diversos compartimentos. Neste modelo, assume-se que não há atraso no processo de transporte das moléculas de  $^{15}\text{N}$  entre os compartimentos.

A solução do sistema de equações diferenciais (1) e a simulação da cinética do  $^{15}\text{N}$  na fase de crescimento (0 a 14 dias) de frangos de corte foram obtidas numericamente pelo método de Runge Kutta de 4ª Ordem no software Octave.

## 4 Simulação do Modelo

A Tabela 1 apresenta as taxas de transferências do nitrogênio entre os diversos compartimentos [8].

Tabela 1: Taxas de transferências ( $k_{ij}$ ) do compartimento  $j$  para  $i$ .

| <i>Origem (j)</i> | <i>Destino (i)</i> | <i><math>k_{ij}</math></i> | <i>taxas</i> |
|-------------------|--------------------|----------------------------|--------------|
| Jejuno (1)        | Fígado (2)         | $k_{21}$                   | 13,2         |
| Plasma (3)        | Fígado (2)         | $K_{23}$                   | 60,09        |
| Fígado (2)        | Plasma (3)         | $K_{32}$                   | 33,48        |
| Peito (4)         | Plasma (3)         | $K_{34}$                   | 1,0          |
| Plasma (3)        | Peito (4)          | $K_{43}$                   | 1,078        |
| Jejuno (1)        | Excreta (5)        | $K_{51}$                   | 0,30         |
| Fígado (2)        | Excreta (5)        | $K_{52}$                   | 1,049        |

As taxas de transferências da Tabela 1 são dos coeficientes das equações (1) e estes valores foram usados na obtenção da solução numérica do sistema e dos históricos no tempo da quantidade de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  nos diversos compartimentos. A Figura 3 mostra a cinética do  $^{15}\text{N}$  após o seu metabolismo no jejuno, no fígado, no plasma. A Figura 4 mostra a deposição de  $^{15}\text{N}$  no músculo peitoral e a excreção. A condição inicial usada na simulação é (100, 0, 0, 0, 0), ou seja, inicialmente a razão isotópica do compartimento jejuno é ligeiramente diferente da natural devido a dose única de  $^{15}\text{N}$  e os demais compartimentos não enriquecidos.

Pode-se observar que a cinética do  $^{15}\text{N}$  no jejuno tem decaimento exponencial. De fato, considerando que a dose única de  $^{15}\text{N}$  é instantaneamente incorporada ao compartimento 1 (jejuno), o tempo de esvaziamento deste compartimento é cerca de 13,5 horas. É a partir do início do esvaziamento do jejuno que o  $^{15}\text{N}$  é distribuído aos demais compartimentos.

Inicialmente, o fígado recebe o  $^{15}\text{N}$  do jejuno e o direciona para o plasma, para que este nutriente seja depositado no tecido de destino (neste caso o músculo peitoral). Em um segundo momento o fígado recebe o  $^{15}\text{N}$  do plasma após o processo de síntese e degradação que ocorrem no músculo (com taxa diferente do primeiro envio) e, como forma de finalizar o processo metabólico, o fígado envia este  $^{15}\text{N}$  resultante para as excretas. A porcentagem máxima no fígado é de 44% do  $^{15}\text{N}$  ingerido e o compartimento atinge esse valor 4 horas após o início do processo metabólico. O tempo de esvaziamento (quase) completo deste compartimento é cerca de 13,7 dias.

O plasma troca  $^{15}\text{N}$  dos compartimentos fígado e peito. A porcentagem máxima de  $^{15}\text{N}$  no plasma é de 24% e o compartimento atinge o valor máximo 4,5 horas após o início do processo. O tempo de esvaziamento deste compartimento é em cerca de 12,3 dias.

O músculo peitoral troca  $^{15}\text{N}$  somente com o plasma e a porcentagem máxima é de 12% do total ingerido isto em 1,2 dia. O tempo de esvaziamento quase completo deste compartimento é por volta de 13,8 dias.

Finalmente, a excreção de  $^{15}\text{N}$  oriunda do jejuno e do fígado atinge o máximo de 99,7% do ingerido em 14 dias.

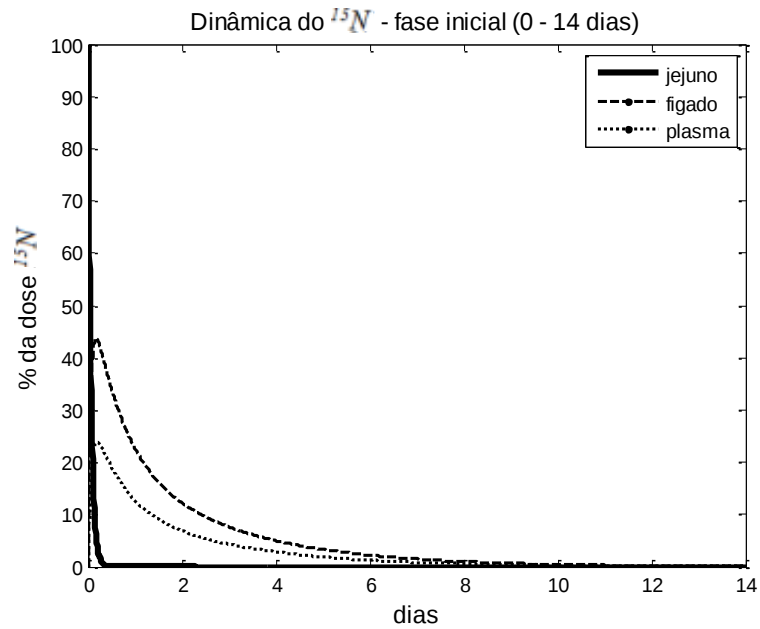


Figura 3: Histórico no tempo da quantidade de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  nos compartimentos jejuno, fígado e plasma.

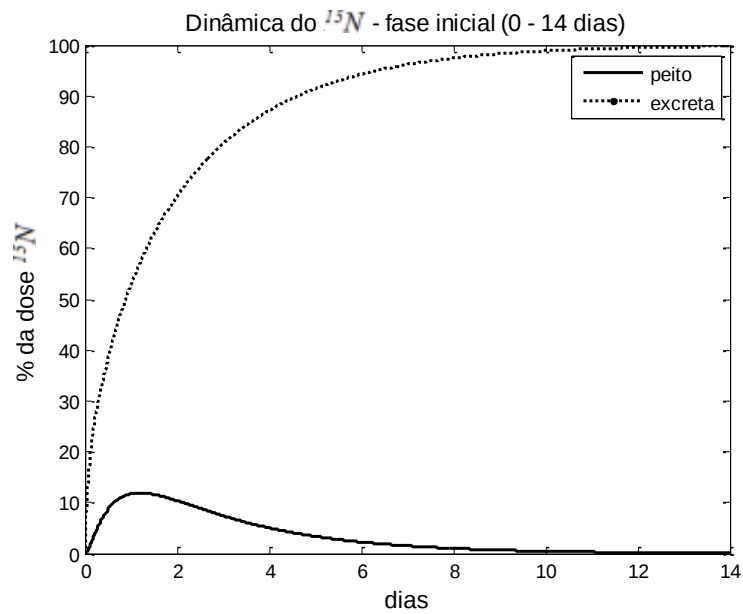


Figura 4: Histórico no tempo da quantidade de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  nos compartimentos músculo peitoral e excretas.

## 5 Conclusão

A descrição da cinética de nitrogênio  $^{15}\text{N}$  por meio do sistema compartimental aumenta a compreensão da transferência dos nutrientes entre os tecidos de frangos de corte e as mudanças na cinética ao longo do crescimento (0 a 14 dias) animal. De fato, pode-se notar o rápido enriquecimento dos tecidos estudados bem como a excreção mantendo o equilíbrio do  $^{15}\text{N}$  no jejuno, fígado, plasma e músculo peitoral.

## Referências

- [1] G. L. Atkins, Multicompartment models for biological systems. London: Methuen, 1969.
- [2] C. Cobelli; D.M. Foster, Compartmental models: theory and practice using the SAAM II software system. In: Mathematical Modeling in Experimental Nutrition. Springer US, p. 79-101, 1998.
- [3] L. D. Coletta; A. L. Pereira; A. A. D. Coelho; V. J. M. Savino; J. F. M. Mentem; E. Correr; L. C. França; L. A. Martinelli, Barn vs. free-range chickens: Differences in their diets determined by stable isotopes. Food Chemistry, v.131, p. 155-160, 2012.
- [4] C. Ducatti; A. S. Carrijo; A. C. Pezzato; P. F. A Mancera. Carbon turnover in poultry tissues at different growth stages. Ciência Rural, v. 44, n. 8, p. 1472-1478, 2014.
- [5] D. E. Faria Filho; P. S. Rosa; D. F. Figueiredo; F. Dahke; M. Macari; R. L. Furlan. Dietas de baixa proteína no desempenho de frangos criados em diferentes temperaturas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 1, p. 101-106, 2006.
- [6] A. L. Pereira; E. Benedito. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. Revista biociências, v. 13, n. 3, 2008.
- [7] J.H.M. Thornley, J. France. Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences. Trowbrige: Cromwell Press, 2007. 2 ed., 906p.
- [8] A. R. Troni. Cinética do  $^{15}\text{N}$  em frangos de corte. Tese de doutorado. FCAV UNESP-Jaboticabal, SP 2016.