

La ecuación de Gompertz como modelo integral para evaluar el ajuste de datos de producción de gases *in Vitro*.

The Gompertz equation as an integral model to evaluate the production data adjustment of gases *in vitro*.

Autores: Osmany Jay Herrera¹, Verena Torres², José P. Torres³

Centro de Estudios de Especies Menores. Universidad de Guantánamo. Cuba.

ojay@ica.co.cu

Instituto de Ciencia Animal. San José de las Lajas: Mayabeque, Cuba.

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. México

Resumen.

Con el objetivo de proponer un modelo integral para el ajuste de las curvas de producción de gas *in vitro*. Se evalúa la bondad de ajuste de la ecuación de Gompertz en cuatro experimentos llevados a cabo en diferentes condiciones de laboratorio. Se empleó el método de regresión no lineal y se evaluaron los criterios de significación del modelo, el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de la regresión. A partir de las estimaciones de los parámetros: la significación de los estimadores, el error estándar y el intervalo de confianza de las estimaciones. Con los valores de residuos se evaluó la incorrelación (estadístico de Durbin-Watson), la normalidad (estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks) y la homocedasticidad (estadístico de Levene). Se comprobó que el modelo de Gompertz muestra un buen comportamiento para ajustar estas curvas, siendo más efectivo en la medida que en el experimento se obtengan un mayor número de puntos experimentales.

Palabras clave: producción de gas *in vitro*, criterios de bondad de ajuste.

Abstract.

With the aim to propose a standard model for the adjustment of the gas *in vitro* production curves, the adjustment kindness of Gompertz equation was evaluated in four experiments carried out in different laboratories conditions. Nonlinear regression method was employed. The significance criteria of the model, the determination coefficient (R^2), and regression standard error were evaluated from parameter estimations: the estimator's significance, the standard error and the confidence interval of the estimations. It was evaluated, with the residuals' values, the incorrelation (statistic of Durbin Watson), the normality (statistic of Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilks) and the homogeneity (statistic of Levene). It was confirmed that Gompertz model show a good performance to adjust gas production curves, being more effective when greater number of experiment points were used.

Key Words: *in vitro* gas production, adjustment kindness criteria

Introducción.

A partir de los rumiantes se obtiene casi toda la producción de leche del planeta, y aproximadamente un tercio de la producción de carne. Debido a esto no es sorprendente que una gran cantidad de investigaciones se enfoquen al estudio del sistema digestivo de los rumiantes, de manera especial en encontrar métodos cuantitativos que permitan la interpretación de los procesos de absorción y aprovechamiento de los alimentos (Bouwman *et al.*, 2005).

Uno de los métodos con mayor utilidad para estudiar el proceso de degradación y aprovechamiento de los alimentos por parte de los rumiantes es el estudio de las curvas de producción de gas (Rymer *et al.*, 2005).

Para estudiar estas curvas se han propuesto varios modelos que describen la dinámica del proceso en el tiempo, los cuales ajustan la producción de gas a una curva sigmoideal. En el presente capítulo se presenta el modelo de compartimentos descrito por Beuvink y Kogut (1993) aplicado al proceso de producción de gas y a partir de este la derivación de la ecuación de Gompertz. Se evalúa la bondad de ajuste del modelo a los datos experimentales por los criterios Guerra *et al.* (2003) y Fernández *et al.* (2004).

Considerando los criterios de bondad de ajuste del modelo se demostró que el modelo de Gompertz es un modelo eficaz para describir las curvas de producción de gas, en la diversidad de experimentos que se realizan con esta técnica.

Materiales y métodos.

Descripción del modelo.

El proceso de producción de gas puede representarse a través de un modelo de compartimentos, como puede verse en la Figura :

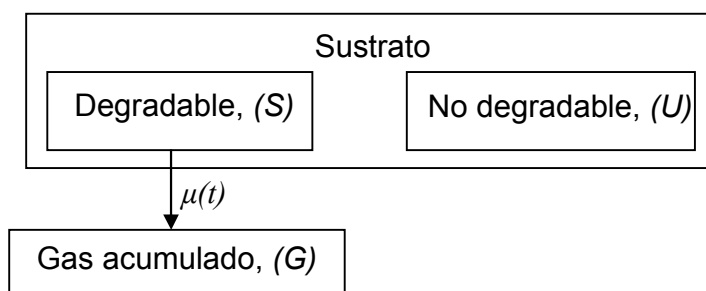


Figura 1. Representación gráfica del modelo compartimental.

El sustrato colocado en un recipiente va a estar compuesto por una fracción degradable (S) y una fracción no degradable (U). Luego de la saturación del sustrato con el líquido ruminal, se produce un volumen de gas (G) en el tiempo a una tasa $\mu(t)$. La dinámica del

comportamiento de esta producción va a depender de la cantidad de gas que se haya producido previamente:

$$\frac{dG}{dt} = \mu(t)G; \quad (1)$$

La tasa de degradabilidad $\mu(t)$ va a depender de la actividad microbiana, la cual comienza a disminuir después de la saturación a causa de la disminución del sustrato mostrando una caída exponencial:

$$\mu(t) = \mu_0 \exp(-ct); \quad (2)$$

donde:

μ_0 : tasa inicial,

c : índice de actividad microbiana.

Cuando el valor de c se considera constante, la solución a la ecuación diferencial obedece a la expresión:

$$G = G_{\infty} \exp\left[-\frac{\mu_0}{c} \exp(-ct)\right] \quad (3)$$

Que es la denominada ecuación de Gompertz y G_{∞} es la producción de gas asintótica. Por conveniencia, en todas las partes del presente trabajo la ecuación anterior se presentará en la forma:

$$PG = A \exp[-b \exp(-ct)] \quad (4)$$

Para la evaluación de la bondad de ajuste de este modelo se tomaron cuatro experimentos de producción de gases realizados en cuatro laboratorios distintos y con cuatro procedimientos diferentes:

Experimento 2.1

Experimento realizado en el Departamento de Veterinaria del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara, México.

Las mediciones de la producción de gas, en unidades de mililitros por gramos de materia seca (mL/g MS), se realizaron a través de jeringuillas insertadas a la botella contenedora del sustrato macerado mecánicamente y mezclado con la disolución búfer. Se realizaron las 6 lecturas durante 96 horas, directamente de la jeringuilla, considerando la producción de gas inicial nula. Se realizaron dos repeticiones para tener un total de 14 puntos experimentales.

Experimento 2.2

Experimento realizado en el Departamento de Fisiología del Instituto de Ciencia Animal.

Las mediciones se realizaron a través de jeringuillas insertadas a la botella contenedora del sustrato, inoculado con un cultivo de levadura y mezclado con la disolución búfer. Se realizaron las 21 lecturas durante 77 horas, directamente de la jeringuilla, considerando la producción de gas inicial nula. Se realizaron cuatro repeticiones para tener un total de 88 puntos experimentales.

Experimento 2.3

Experimento realizado en colaboración con el Departamento de Fisiología Animal de la Universidad de Minas Gerais de Brasil.

Las mediciones se realizaron a través de manómetro acoplado a los frascos de fermentación con pantalla digital. Los datos se tomaron a las 4, 8, 12, 16, 24, 36, 48, 60 y 72 horas; nueve lecturas sobre cuatro repeticiones, considerando nula la producción de gas inicial. En total en el experimento se contó con 40 puntos experimentales por repetición.

Experimento 2.4

Los datos se tomaron de un experimento realizado en colaboración entre el Instituto de Ciencia Animal de Cuba y los Laboratorios de Microbiología Molecular y de Química de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Las mediciones de la producción de gas, se realizaron con un manómetro acoplado a los frascos de fermentación mediante interfaz electrónica y las lecturas se realizaron automáticamente a través de una computadora en intervalos de 0.34 horas durante 23.5 horas. Se obtuvieron 70 mediciones sobre cuatro repeticiones lo que arroja un total de 280 puntos experimentales, se considera además que en el inicio de las mediciones la producción de gas es nula.

Evaluación del ajuste del modelo

Como criterios para evaluar la bondad de ajuste del modelo de regresión no lineal se tomaron a partir de la regresión: la significación del modelo, el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de la regresión. A partir de las estimaciones de los parámetros: la significación de los estimadores, el error estándar y el intervalo de confianza de las estimaciones. Con los valores de residuos se evaluó la incorrelación (estadístico de Durbin-Watson), la normalidad (estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks) y la homocedasticidad (estadístico de Levene).

El método de ajuste empleado fue el de Levenberg-Marquardt. Los programas empleados para el ajuste fueron SPSS (2006), Statgraphic Plus (2000), e Infostat (2009).

Resultados y Discusión.

Evaluación del ajuste del modelo

De acuerdo con Grings *et al.* (2005) y López *et al.* (2007), la función de Gompertz aplicada a los experimentos de producción de gas *in vitro* reporta por regla general buenos criterios de ajuste, por tratarse de experimentos que se realizan en condiciones controladas, en los cuales se minimiza a nivel de laboratorio la variabilidad de los datos. Esto se corroboró en los experimentos presentes, en los cuales todas las regresiones resultaron significativas a un nivel $p < 0.01$, indicando un buen ajuste de los modelos.

Los restantes criterios de evaluación tomados a partir de la regresión y de los residuos se muestran en la

Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de ajuste del modelo de Gompertz a los experimentos.

Criterios a considerar	Experimentos			
	2.1	2.2	2.3	2.4
Coefficiente de determinación	0.966	0.993	0.987	0.970
Error estándar de la estimación	10.480	5.326	15.208	0.844
Durbin-Watson	1.016	0.731	0.872	0.052
Kolmogorov-Smirnof	0.158	0.142†	0.095†	0.070†
Shapiro-Wilks	0.614	0.955†	0.985†	0.955†
Levene	>100††	4.395††	13.112††	3.149††

† Indica cumplimiento de la hipótesis de normalidad. †† Indica cumplimiento de la hipótesis de homocedasticidad.

Los coeficientes de determinación (R^2) fueron altos, siendo el menor valor el correspondiente al experimento 2.4 (0.970), mientras que el mayor correspondió al experimento 2.2 (0.993), el cual fue superior al 99%. Resultados similares reportaron Calabrò *et al.* (2005) y García-Rodríguez *et al.* (2005).

Los valores del error estándar de la estimación también mostraron resultados relativamente adecuados, siendo el experimento 2.4 el que menor valor mostró.

Este resultado tiene que ver con el empleo de la tecnología más avanzada y revela la importancia que adquiere en la adecuación de los datos a un modelo el hecho de que el investigador intervenga lo menos posible en el proceso biológico durante la adquisición de los datos.

El estadístico de Durbin-Watson revela la presencia de autocorrelación positiva en todos los experimentos. La presencia de esta correlación se debe a la repetición de las mediciones sobre las mismas unidades experimentales, lo que introduce dependencia entre los residuos de la estimación. Esta situación ha sido analizada por Bender (1996) y López *et al.* (2007), los cuales recomiendan un análisis crítico de la regresión y el análisis de la estabilidad de los estimadores. El hecho de que los residuos de la regresión no sean independientes será tratado más adelante en la evaluación de los métodos para la comparación de las curvas de regresión. El experimento que mayor autocorrelación presentó fue el 2.4, en primer lugar a causa de que las mediciones se realizaron en intervalos muy cortos de tiempo, y por otro lado es el experimento en el que se tomaron la mayor cantidad de datos experimentales.

Los estadísticos de normalidad, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks, reportaron normalidad de los residuos para los grados de libertad de cada uno de los experimentos. Para los experimentos 2.2 y 2.4 el valor del estadístico de Shapiro-Wilks fue mayor, debido a que en estos experimentos se encontraron la mayor cantidad de puntos experimentales, mientras que el experimento 2.1 con el menor número de puntos experimentales, presentó el estadístico más bajo.

La prueba de homocedasticidad de Levene indica el cumplimiento de la hipótesis de homocedasticidad para todos los experimentos. Este comportamiento se debe a que no existieron grandes alteraciones en el medio durante la toma de los datos experimentales y es una situación común a los experimentos de laboratorio (Bellouquid y Delitala, 2006).

Conclusiones.

El modelo Gompertz ha mostrado buen comportamiento de los criterios de bondad de ajuste para los experimentos de producción de gas. Siendo este comportamiento estable en diversidad de condiciones. La mejor descripción de fenómeno ocurre en los experimentos en los que se obtuvo un mayor número de puntos experimentales.

Bibliografía.

- Bellouquid, Abdelghani y Delitala, Marcello. (2006). Mathematical modelling of complex biological systems Birkhauser, Boston. 194.
- Bender, Ralf. (1996). Calculating confidence intervals for summary measures of individual curves via nonlinear regression models. International Journal of Bio-Medical Computing, 41: 13
- Beuvink, J. M. y Kogut, J. 1993. Modelling gas production kinetics of grass silages incubated with buffered ruminal fluid. Journal of Animal Science. 71: 1041
- Bouwman, A. F.;Hoek, K. W. Van der;Eickhout, B. y Soenario, I. 2005. Exploring changes in world ruminant production systems Agricultural Systems. 84: 121
- Calabro, S.;Lopez, S.;Piccolo, V.;J.Dijkstra;Dhanoa, M. S. y France, J. 2005. Comparative Analysis of gas production profiles obtained with buffalo and sheep ruminal fluid as the source of inoculum. Animal Feed Science and Technology. 123-124 51
- Fernández, Lucía;Buxadera, A. Menéndez y Guerra, Caridad W. 2004. Estudio comparativo de diferentes funciones para el análisis de la curva de lactancia en el genotipo Siboney de Cuba. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 38: 351
- García-Rodríguez, A.;Mandaluniz, N.;Flores, G. y Oregui, L. M. 2005. A gas production technique as a tool to predict organic matter digestibility of grass and maize silage. Animal Feed Science and Technology. 123-124: 267.

- Grings, E. E.;Blümmel, M. y Südekum, K. H. 2005. Methodological considerations in using gas production techniques for estimating ruminal microbial efficiencies for silage-based diets. *Animal Feed Science and Technology*. 123-124: 527
- Guerra, Caridad W. Cabrera, A. & Fernández, Lucía. 2003. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 37: 3
- López, S.;Dhanoa, M. S.;Dijkstra, J.;Bannink, A.;Kebreab, E. y France, J. 2007. Some methodological and analytical considerations regarding application of the gas production technique. *Animal Feed Science and Technology*. 135: 139
- Rienzo, Julio Di;Balzarini, Mónica;casanoves, Fernando;González, Laura;Tablada, Margot y Robledo, Carlos Walter. 2009. Infostat versión 2009. Córdoba.
- Rymer, C.;Huntington, J. A.;Williams, B. A. y Givens, D. I. 2005. In vitro cumulative gas production techniques: History, methodological considerations and challenges. *Animal Feed Science and Technology*. 123-124: 9
- SPSS_Inc. 2006. SPSS. 15.0.1. Berlín.
- Statistical_Graphics_Corp. 2000. STATGRAPHICS Plus para Windows 5.1.

Fecha de recibido: 6 jun. 2011
Fecha de aprobado: 8 ago. 2011