

## Modelización de una explotación ganadera extensiva criadora en basalto

Dieguez Cameroni Francisco<sup>1</sup>, Bommel Pierre<sup>2</sup>, Corral Jorge<sup>3</sup>, Bartaburu Danilo<sup>1</sup>, Pereira Marcelo<sup>1</sup>, Montes Esteban<sup>1</sup>, Duarte Emilio<sup>1</sup>, Morales Grosskopf Hermes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Plan Agropecuario, Bulevar Artigas 3802, 11700 Montevideo, Uruguay.

Correo electrónico: fdieguez@planagropecuario.org.uy

<sup>2</sup>CIRAD, UPR Green, Montpellier, France, & Universidade de Brasilia, Brasil.

<sup>3</sup>Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay.

Recibido: 22/3/12 Aceptado: 30/8/12

### Resumen

Los modelos de simulación pueden ser considerados como herramientas de aprendizaje –según la idea del «simulador de vuelo»– donde los usuarios se beneficiarían por experimentar con situaciones posibles, más aún si son construidos en forma participativa con los potenciales interesados. El Instituto Plan Agropecuario (IPA) desarrolló un modelo para representar a una explotación ganadera criadora extensiva sobre un suelo representativo de basalto: el MEGanE (Modelo de una Explotación Ganadera Extensiva). Los resultados de la simulación, tanto fitotécnicos como zootécnicos muestran gran coherencia con resultados de investigación nacional. Asimismo, el MEGanE pudo reproducir una situación de crisis forrajera conocida, con resultados coherentes a una realidad posible. El MEGanE fue diseñado para transmitir conceptos, con términos de fácil comprensión por los usuarios.

**Palabras clave:** modelo, simulación, ganadería extensiva, basalto

### Summary

## Modelling of an Extensive Cattle Breeding Farm on Basaltic Soils

Simulation models can be considered as learning tools, according to the idea of «flight simulator», where users would benefit by experimenting with possible realities, even more if they are built with the potential stakeholders in a participatory way. The IPA (Agricultural Planning Institute) developed a model to represent an extensive breeder cattle farm on a representative basaltic soil: the MEGanE (Model of an Extensive Stock Breeding Farm). The results of the simulation, both for forage production and zootechnics, show great consistency with national research information. Also, the MEGanE was able to reproduce a known drought crisis, with results consistent with a possible reality. The MEGanE has been designed to exchange concepts, with variables easily understood by potential users.

**Key words:** model, simulation, extensive beef production, basaltic soils

### Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar un modelo de una explotación ganadera extensiva, desarrollado como herramienta para mejorar la comunicación sobre los efectos de la sequía (IPA, 2011). Llamamos extensivas para nuestro propósito a aquellas explotaciones que no realizan mejoramientos forrajeros, con el Campo Natural (CN) como única fuente de alimento del rodeo. Comenzaremos con

algunas definiciones y conceptos fundamentales de los sistemas, los modelos y la simulación para pasar luego al desarrollo del modelo propiamente dicho, y a la presentación de algunos resultados de simulaciones realizadas con el mismo.

Para comenzar, definiremos entonces a un sistema como un conjunto de componentes relacionados entre sí de una manera regulada, para formar un todo organizado (Harrington y Tumay, 2000). Los sistemas pueden presentar entre

sus componentes sinergias, recursividades, propiedades emergentes y subsistemas (Johansen, 2004). Estas relaciones y regulaciones hacen que los sistemas puedan ser complejos (Von Bertalanffy, 1972), y la complejidad en el campo de la modelización puede ser un problema fundamental (Wainwright y Mulligan, 2004). Aristóteles planteaba que el todo es más que la suma de sus partes.

En la construcción de modelos –por ejemplo agronómicos– existe un orden jerárquico de niveles de aproximación. Por ejemplo un cultivo, planta, órganos, tejidos, células, organelos... planos que tienen escalas de tiempo y espacio diferentes. Cada sistema puede ser formulado como un «sistema de sistemas», en cualquier nivel de complejidad que se considere (Morin, 1977) donde el resultado del funcionamiento de un nivel puede ser el insumo para otro nivel superior (Thornley y France, 2007).

Por otra parte, un modelo es una representación fragmentada de la realidad, que intenta rescatar lo esencial de la misma. La modelización es el proceso de construcción de un modelo y la simulación es la experimentación con un modelo de una hipótesis de trabajo. Un modelo, al ser una simplificación de la realidad, permite ser abarcativo de toda la realidad de forma manejable, pues se rescata sólo aquello que es relevante, para el problema a modelar, para el modelador y para el nivel de abstracción que se esté modelando (Corral y Calegari, 2011).

### ¿Para qué sirven los modelos y la simulación?

«Ninguna aerolínea podría imaginarse enviar un piloto a manejar un avión si no tuvo un entrenamiento en un simulador... de hecho se espera que los gerentes de una empresa piloteen sus organizaciones en cielos desconocidos» (Harrington y Tumay, 2000). La simulación puede, ayudar al aprendizaje generando escenarios y sirve como medio de comunicación (Harrington y Tumay, 2000). De acuerdo con Thornley y France (2007) los modelos agronómicos en particular ayudan a interpretar resultados experimentales, y son herramientas para la investigación y para los productores. Según Boote *et al.* (1996) los modelos pueden ser valiosos para integrar el conocimiento de la investigación, evidenciando carencias de información, lo que puede orientar para una futura investigación. Otra ventaja es de índole ética, ya que «el esfuerzo se traslada al desarrollo del modelo y no a la unidad experimental» (Vargas, 2003).

Para resumir, los modelos pueden ayudarnos a comprender y a realizar «experimentos virtuales», especialmente en el contexto de los sistemas de apoyo a las decisiones (Wainwright y Mulligan, 2004).

### Modelización de procesos agronómicos

Clásicamente se distinguen dos ramas de aplicación de los modelos agronómicos: 1) la investigación básica, orientada a resolver problemas científicos, que tiende a desarrollar robustos modelos mecanísticos para aumentar el conocimiento de un proceso, y 2) la investigación aplicada, orientada a resolver problemas técnicos, la que desarrolla modelos empíricos (Thornley y France, 2007). Como ejemplos de modelos de simulación citaremos el modelo DSS-AT (Jones *et al.*, 2003), creado con fines de transferencia de tecnología para mejorar las decisiones de los productores en cultivos comerciales. En producción animal existe una miríada de modelos, que abarcan desde la simulación de la dinámica ruminal (NRC, 2000) la gestión de pastoreo de una explotación (GrazFeed de Freer *et al.*, 2004) e incluso la dinámica del sector ganadero nacional (Chiara y Ferreira, 2011).

En este trabajo se presenta un modelo de una explotación ganadera de basalto, y algunos resultados de simulaciones del mismo.

### Materiales y métodos

#### Desarrollo del modelo

El modelo aquí presentado, denominado MEGanE (Modelo de una Explotación Ganadera Extensiva) fue desarrollado por un equipo con integrantes con antecedentes en el área de la informática, la modelación y la simulación en conjunto con técnicos del Instituto Plan Agropecuario. En el proceso participaron técnicos y productores de la región del basalto (departamentos de Artigas, Salto y Paysandú), en un contexto de desarrollo participativo con el fin de rescatar el saber local. El MEGanE pretende entonces reflejar una situación productiva representativa de la cría extensiva en basalto, y fue elaborado en conjunto con sus potenciales usuarios.

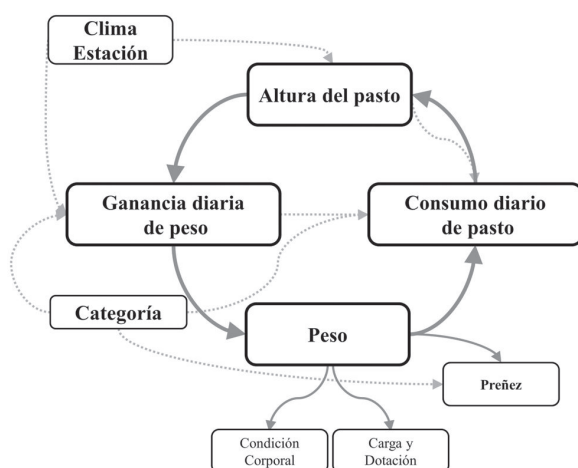
El MEGanE inicialmente fue desarrollado para ser aplicado en una plataforma de Sistemas Multi-Agentes (SMA), incluyendo además del sistema físico-biológico las decisiones de los productores. En esta publicación no se presentará la simulación del componente humano, limitándonos únicamente al modelo físico-biológico. Las simulaciones aquí presentadas fueron realizadas en planillas electrónicas. Bartaburu *et al.* (2009), Corral y Calegari (2011) e IPA (2011) brindan más información sobre el desarrollo del modelo participativo, sobre los modelos de decisiones y sobre los SMA. Una versión del modelo basada en la plataforma CORMAS está disponible en el sitio web del Cirad (<http://cormas.cirad.fr/fr/applica/sequia.htm>).

### Supuestos del modelo

El MEGanE está definido para simular los resultados productivos de una explotación extensiva, en CN sobre suelos representativos del basalto (1/3 de basalto superficial, 1/3 de basalto profundo y 1/3 de basalto medio). Se asume un rodeo de razas británicas, sano, sin presencia de predadores, con una mortalidad anual de 2%, y con la posibilidad de mortalidad excepcional por crisis forrajera, cuando un animal llega a su peso límite de supervivencia. Por otra parte, se definió –por parte de los involucrados en talleres participativos– que la ganancia de peso individual no debería superar 60 kg/cabeza en primavera o 40 kg/cabeza en el resto de las estaciones, ni 140 kg/cabeza/año, con una pérdida de peso diaria de 0,5% del peso vivo en situación de ayuno (adaptado de Orcasberro, 1989). La altura de pasto en que los animales mantienen peso es 5 cm.

### Características del modelo

El MEGanE es un modelo dinámico (el tiempo es una variable), empírico (reproduce las relaciones entre sus componentes a partir de observaciones experimentales y referencias anecdóticas, sin profundizar en los procesos) y determinístico (no se basa en probabilidades) (Thornley y France, 2007; Harrington y Tumay, 2000). También, el modelo fue concebido para ser interactivo, ya que permite que el usuario proponga situaciones de su interés. La Figura 1 presenta el modelo MEGanE, en forma de diagrama causal.



**Figura 1.** Diagrama del MEGanE, indicando los modelos que describen los distintos procesos, las relaciones entre ellos y algunas salidas típicas.

### Paso de tiempo

El modelo tiene dos pasos de tiempo. Uno diario que afecta el crecimiento de la pastura, el consumo y evolución de peso de los animales, y otro estacional que afecta los coeficientes utilizados en los cálculos de los anteriores (ecuaciones 1 a 3) y permite al usuario interactuar con la simulación realizando acciones.

### Componentes del MEGanE

#### Clima

La influencia del tiempo meteorológico está determinada por un coeficiente climático (*coefClima*), que es el desvío de la Tasa de crecimiento de materia seca (TCMS) de una estación determinada con respecto a su promedio histórico (PTCMS). En la utilización del MEGanE se utilizó la TCMS para un potrero representativo del basalto (30°38.8'S, 57°0.9'O), la que fue estimada por teledetección (Paruelo et al., 2000).

El *coefClima* se calcula como:

$$\text{coefClima}_i = \frac{\text{TCMS}_i}{\text{PTCMS}} \quad [1]$$

donde:

*i* es cualquier estación del año.

Cabe destacar que el *coefClima* puede calcularse utilizando otras formas de evaluación de la TCMS que no sean la teledetección, tales como la evaluación de recursos forrajeros a través de cortes de biomasa.

#### Pastura

La pastura se define por su altura (en cm), que está determinada por la resolución en tiempo continuo de una ecuación logística (Ecuación 1), restándosele el consumo animal:

$$\text{Altura pasto} = \frac{K}{1 + \left( \frac{K - \text{Altura pasto}(t_0)}{\text{Altura pasto}(t_0)} \times e^{-rt} \right)} - \text{ConsumoCM} \quad [2]$$

donde:

**Altura pasto** es la altura de la pastura ofrecida para consumo, en cm (altura inicial del día).

**K** es una constante estacional que determina la altura máxima de la pastura, multiplicada por el coeficiente climático (*coefClima*) explicado anteriormente. Los valores de *K* promedio se presentan en el Cuadro 1.

**r** es una constante que toma el valor 0,002.

**Cuadro 1.** Valores estacionales de la constante K.

	K
Otoño	11,1
Invierno	7,4
Primavera	22,2
Verano	15,6

En el modelo matemático se incluye el consumo de pastura expresado en centímetros (Consumo<sub>CM</sub>, que se explicará posteriormente).

En cada paso de tiempo diario, la altura de pastura ofrecida a los animales (altura pre consumo) será el resultado de la altura inicial diaria a la que se le suma el crecimiento diario. La altura post consumo (diferencia entre altura pre consumo y el consumo en cm de pastura) de un día será la altura inicial del día siguiente.

Cabe destacar que el MEGanE fue diseñado para favorecer la comunicación con los posibles usuarios por lo que se formuló para que la disponibilidad de pastura sea representada en función de su altura. Este concepto tiene —a nuestro entender— una mayor facilidad relativa de comprensión y comunicación con respecto a otras formas corrientes de expresarla (como por ejemplo la oferta en términos de kg MS/ha o la asignación de forraje, en términos de kg MS/kg peso vivo).

Ganancia diaria de peso: corresponde con la ganancia de peso diaria (GMD; en kg/cabeza/día). Está definida por la siguiente ecuación (Ecuación 2):

$$GMD = \frac{\mu - (\xi_t \times e^{-v \times \text{Altura pasto}})}{92 \times \frac{\text{coefEstación}}{\text{coefCategoría}}} \quad [3]$$

donde:

**Altura pasto** es la altura del pasto disponible para el consumo de los animales (altura pre consumo), en centímetros.

$\mu$  es una constante que toma el valor máximo de ganancia individual de peso en la estación.

$v$  y  $\xi$  son constantes que toman los valores 0,24 y 132 respectivamente.

**coefEstación** es un coeficiente estacional que afecta la ganancia de peso del animal en función de la calidad de la pastura, indicada por la digestibilidad de la Materia Seca (MS) de la misma. Toma los valores: 1,15 en primavera, 1,05 en verano y 1,0 en otoño e invierno (adaptado de Crempien, 1983).

**coefCategoría** es el coeficiente de la categoría animal, que toma diferentes valores según la categoría de animales que se trate (Cuadro 2).

El valor del coefCategoría para vacas con ternero al pie indica que esta categoría tendrá una ganancia de peso inferior respecto a las otras (Ecuación 3). Asimismo, este valor forzará a que el consumo de esta categoría sea superior, como se explicará en el siguiente punto (apartado «Consumo», Ecuación 4).

Cabe recordar que las constantes y valores se ajustaron para modelizar una explotación extensiva del basalto, de acuerdo con los criterios establecidos por los expertos locales.

Consumo: este componente refiere al consumo de MS individual por día (en kg MS/cabeza/día). Dicho consumo queda definido por la Ecuación 3:

$$\text{ConsumoMS} = \frac{[0,107 \times \text{PM} \times (-0,0132 \times \text{Altura pasto} + 1,1513) + (0,141 \times \text{PM} \times \text{GMD})]}{\text{energíaPasto}} \times \text{coefCategoría} \quad [4]$$

donde:

**PM** es el peso metabólico (peso vivo<sup>3/4</sup>), en kilogramos.

**Altura pasto:** corresponde con la altura del pasto disponible para el consumo de los animales (altura preconsumo), en centímetros.

**GMD** es la ganancia media diaria.

**energíaPasto** es el aporte de energía metabolizable por cada kg de MS de la pastura, definida en 1,8 Mcal EM/kg MS (Mieres *et al.*, 2004).

**Cuadro 2.** Valores del coeficiente coefCategoría y las constantes A y B utilizados en el MEGanE.

	coefCategoría	A	B
Vaca de cría	1	20000	0,0285
Vaca con ternero al pie	1,1	12000	0,0265
Vaquillona	1	4000	0,029
Novillos	1	-	-

La Ecuación 4 toma en cuenta los requerimientos de mantenimiento y de ganancia de peso (NRC, 2000).

Debido a que una de las mayores limitantes de la modelización de sistemas en pastoreo es la ausencia de mediciones directas del consumo de MS por el animal (Dove, 1996), en el presente modelo se estima el consumo de MS en función de la ganancia diaria de peso lograda, del peso metabólico del animal y del costo de cosecha en pastoreo.

A partir del consumo de MS se calcula el consumo de pastura en centímetros (consumo CM), teniendo en cuenta el coeficiente kgMS/cm, el que representa el peso por hectárea de 1 cm de pasto (180 kgMS/ha/cm).

Condición corporal: la condición corporal (CC; en puntos) –calculada para de vacas de cría– queda definida por la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$CC = \frac{\text{Peso}-220}{40} \quad [5]$$

De este modo, la CC resulta de la diferencia entre el peso del animal en cualquier momento y el peso mínimo de supervivencia, donde cada punto de CC representa una variación de peso de 40 kg.

Cálculo de preñez: el porcentaje de preñez queda determinado por una función logística del peso de los animales de modo de representar la relación entre el estado de los animales y su desempeño reproductivo (Kunkle et al., 1994), según la siguiente ecuación (Ecuación 6):

$$\text{Preñez} = \frac{1}{1 + A x e^{-B \times \text{Peso}}} \quad [6]$$

En la función, los coeficientes A y B varían según la categoría (Cuadro 2).

Dotación: la dotación corresponde a la relación entre las Unidades Ganaderas (UG) totales y la superficie. Para su cálculo se considera que el peso de una UG es de 380 kg/cabeza.

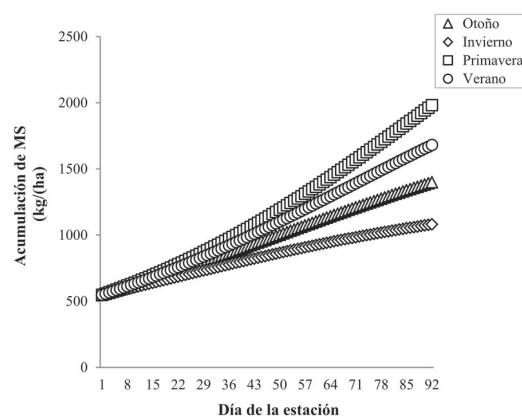
## Resultados y discusión

A continuación se presentan algunos resultados de simulación del MEGanE. En una primera instancia los resultados se presentan de modo *ceteris paribus* para analizar los impactos de las principales variables consideradas en el modelo, dejando otras variables incambiadas. Luego, se presentan algunos resultados de la simulación, de modo de mostrar posibles escenarios contrastantes.

## Dinámica de la pastura

Como fue definido anteriormente, el crecimiento de la pastura en el MEGanE depende de la altura inicial en un día, a la que se suma el crecimiento diario de la misma, y luego se le resta el consumo de los animales. Para mostrar el efecto de la estación en el crecimiento de forraje (las que hacen variar su coeficiente K; ver Cuadro 1) en la Figura 2 se presenta la oferta de MS de la pastura, sin consumo animal y en condiciones promedio de la TCMS, para la serie representada (coefClima=1).

Como se aprecia en la Figura 2, las pasturas parten –arbitrariamente– con una disponibilidad de 540 kg MS/ha (altura del pasto \* kgMS/cm), que equivale a una altura inicial estacional de 3 cm. La altura inicial de la pastura es una entrada (*input*) del modelo, debiéndose definir en primera instancia. En caso de simular varias estaciones consecutivas, la altura final de una pasa a ser la inicial de la siguiente.



**Figura 2.** Evolución de la oferta de MS de la pastura por estación, para una simulación sin consumo animal y en condiciones promedio de la TCMS, a partir de una altura inicial de 3 cm de pasto.

El Cuadro 3 presenta la MS acumulada en cada estación, la distribución estacional y la TCMS promedio (en kg MS/día) para la misma simulación, sin consumo animal.

Los resultados obtenidos de acumulación de MS son comparables a los publicados por Saldanha (2005) para una pastura de CN de basalto con una baja frecuencia de pastoreo (80 días), con la excepción de la producción de verano (Cuadro 3). Las diferencias en producción de MS/ha se puede deber a una diferente estacionalidad de la pastura real con respecto a la simulada. La distribución estacional del forraje indica que en el estudio de Saldanha (2005)

**Cuadro 3.** MS acumulada, distribución y TCMS promedio, para una simulación, sin consumo animal en condiciones promedio de TCMS, a partir de una altura inicial de 3 cm de pasto en cada estación, y resultados acumulación de MS de dos estudios nacionales (Berreta y Bemhaja, 1998; Saldanha 2005).

		Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Total
Simulación MEGanE:	MS acumulada (kg MS/ha)	851	535	1433	1133	3952
	Distribución (%)	22%	14%	36%	29%	100%
	TCMS (kg MS/ha/día)	9,3	5,9	15,7	12,4	
Berreta y Bemhaja (1998):	MS acumulada (kg MS/ha)	784	622	1156	1195	3757
	Distribución (%)	21%	17%	30%	32%	100%
Saldanha (2005):	MS acumulada (kg MS/ha)	860	592	1793	1565	4816
	Distribución (%)	16,9%	11,1%	34,1%	37,9%	100%
	TCMS (kg MS/ha/día)	9,3	6,4	17,6	19,3	

se trata de un campo con mayor producción estival que el modelado en el MEGanE. Los resultados de producción estacional de MS, distribución de la misma en el año, así como la TCMS también son comparables a los publicados por Berreta y Bemhaja (1998), utilizando la ponderación para un suelo representativo de basalto (Berreta *et al.*, 2009). Asimismo, los resultados también son coherentes con la modelización para suelos de basalto presentada por Bettolli *et al.* (2010).

### Efecto del clima y altura del pasto al inicio de la estación

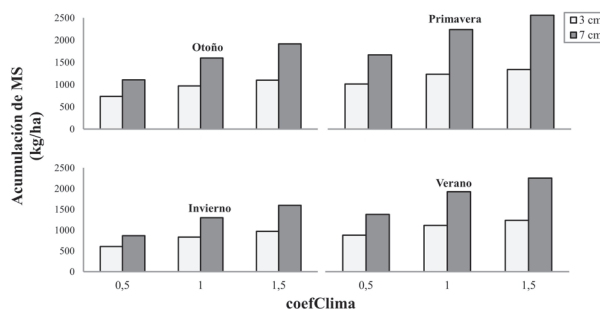
La altura inicial (día 0) de la simulación es una entrada (*input*) del modelo, por lo que la altura considerada en la simulación presentada en el punto anterior es arbitraria. Al considerar el efecto de la altura inicial por estación es de esperar que existan diferentes acumulaciones de forraje, debido a un área foliar remanente diferente que afecte el futuro crecimiento de la pastura (Saldanha, 2005).

La Figura 3 presenta el resultado de la simulación del MEGanE variando el coeficiente climático, en tres situaciones: «bajo crecimiento de pastura» (coefClima=0,5), «crecimiento promedio» (coefClima=1) y «alto crecimiento de pastura» (coefClima=1,5); y con dos situaciones de altura del pasto al inicio de la ecuación: «baja altura inicial» (3 cm) y «alta altura inicial» (7 cm), para cada estación.

Los resultados de la simulación del MEGanE por estación (Figura 3) muestran la relación directa entre el valor del coefClima y la disponibilidad de MS, en todas las situaciones simuladas. A mayor valor de coefClima, mayor es la producción de MS. La relación entre el clima y la fisiología vegetal ha sido ampliamente estudiada, pero más específicamente en el basalto. Bettolli *et al.* (2010) encontraron que

el conjunto de variables estimadoras de la tasa de crecimiento de la pastura (relacionadas a las precipitaciones y temperatura) dependen principalmente del tipo de suelo y de la época del año, donde la variabilidad meteorológica explica parte de los resultados de la variación en el rendimiento de la pastura.

Por otra parte, la altura de la pastura al inicio de la estación afecta también la producción de MS de la misma. Como se aprecia en la Figura 3, contrastando las situaciones de 3 cm vs. 7 cm de altura al inicio de la estación, la baja altura inicial afecta negativamente la acumulación de MS en cualquier estación. El MEGanE sugiere que con mayores alturas iniciales en estaciones con mayor potenciales de crecimiento de la pastura (primavera y verano), la acumulación de MS es mayor. El modelo actúa emulando el principio que una mayor cantidad de área foliar produce más MS (Saldanha, 2005), y ello hace que pueda ser usado para comparar distintos manejos de la pastura, y hace posible estudiar las consecuencias de distintas estrategias de manejo.

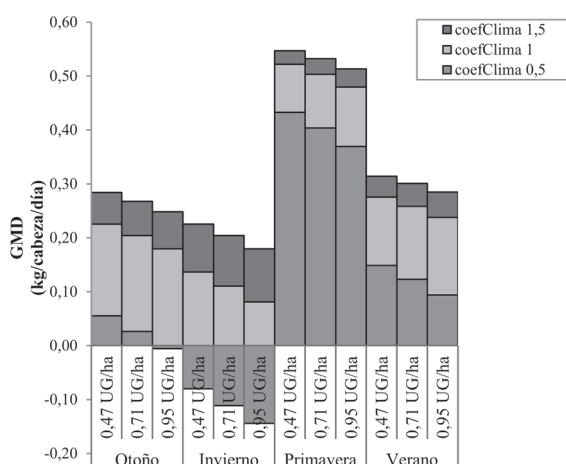


**Figura 3.** Oferta de MS estacional para una simulación, sin consumo animal, considerando tres situaciones meteorológicas y dos alturas al inicio de la estación.

### Ganancia de peso

Para presentar el análisis del MEGanE con respecto a la performance animal, en la Figura 4 se presentan los resultados de simulación de la GMD, para cada estación, considerando tres situaciones climáticas (idénticas a las simuladas anteriormente) y tres dotaciones iniciales, para un potrero de 50 has. Las dotaciones iniciales surgen de variar el número de animales –novillos– al inicio de la estación (30, 45 y 60 cabezas, para cada estación y cada coefClima considerados), con un peso inicial de 300 kg de peso/cabeza. La altura inicial de la pastura fue de 7 cm en cada estación.

Los resultados de la simulación del MEGanE (Figura 4) muestran que el aumento de la dotación inicial –para cualquier coefClima y en todas las estaciones– reduce la GMD. Asimismo, el aumento del coefClima tiene el efecto opuesto. La distribución anual de la GMD sigue los valores de la oferta forrajera, registrándose las mayores ganancias de peso en primavera (0,547 kg/cabeza/día, para una dotación inicial de 0,47 UG/ha y un coefClima de 1,5) y las mayores pérdidas de peso en invierno (-0,144 kg/cabeza/día, para una dotación inicial de 0,95 UG/ha y un coefClima de 0,5). Los resultados de GMD obtenidos en la simulación están comprendidos dentro del rango publicado por Gómez Miller (2004), quién plantea que pueden esperarse ganancias individuales de 0,250 a 0,350 kg/día en suelos de basalto. Asimismo, en una experiencia publicada por Brito *et al.* (2011) en novillos de sobreaño sobre CN de basalto, obtuvieron GMD de 0,140 kg/cabeza/día. Por otra parte, la variación estacional de la resultante de la simulación con el MEGanE (Figura 4), está de acuerdo con



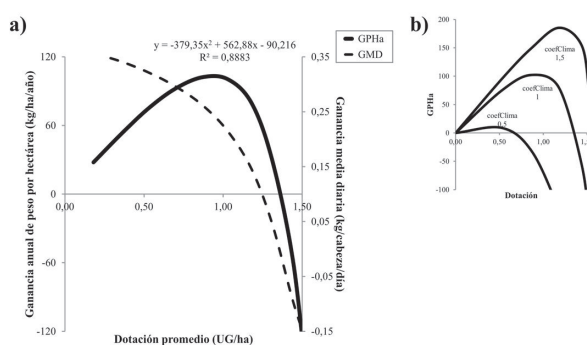
**Figura 4.** GMD promedio por estación, considerando tres escenarios de coefClima y tres dotaciones iniciales.

Pigurina *et al.* (1998). Estos autores reportaron ganancias de 0,196, 0,089, 0,915 y 0,351 kg/cabeza/día en otoño, invierno, primavera y verano respectivamente. Los autores concluyen que para obtener tasas de ganancia aceptables el engorde a campo debería manejarse con dotaciones inferiores a 0,8 UG/ha. Si bien el rango de GMD máximas que se pueden lograr en basalto resulta ser amplio, los resultados de la simulación caen dentro del mismo; sin embargo, el modelo en su estado actual parece subestimar la pérdida de peso invernal y la ganancia de peso primaveral. Cabe recordar que los criterios establecidos por el panel de expertos limita la ganancia de peso individual a 0,652 y 0,430 kg/cabeza/día (primavera y el resto de las estaciones, respectivamente).

Con el objetivo de evaluar la respuesta de la ganancia de peso anual por hectárea (GPHa) al aumento de la dotación inicial, y así contrastarla con el modelo de «carga óptima» (Mott, 1960), se realizó una simulación para cada estación, variando la cantidad inicial de novillos (de 0 a 100 animales) de 300 kg de peso en 50 ha, con una TCMS promedio para cada estación (coefClima=1).

En la simulación, la GPHa respuesta a la dotación inicial puede ser descrita por una curva cuadrática ( $p < 0,01$ ). Por su parte, la GMD disminuyó con el aumento de la dotación inicial (Figura 5a).

En años «normales» (coefClima=1; Figura 5a), los valores de las dotaciones en las que se obtiene la máxima GPHa (0,87 UG/ha), pueden ser comparables –aunque levemente superiores– con los resultados por Berreta y Bemhaja (1998), quienes consideran que la capacidad de carga promedio anual de un campo representativo de basalto es de 0,67 UG/ha. El efecto del coefClima se traduce



**Figura 5.** a) GMD y GPHa anual en función de la carga, para una TCMS promedio en todas las estaciones (coefClima=1); b) GPHa para diferentes simulaciones con diferentes coefClima

en una variación en la carga de máxima GPHa (Figura 5b) yendo de 0,53 a 1,18 UG/ha, para un «año malo» y uno «bueno» (coefClima=0,5 y 1,5, respectivamente). La variación del coefClima puede ayudar a establecer criterios de «carga segura» y «carga óptima» (Pereira, 2011), en función del desvío de la TCMS con respecto a un promedio histórico, calculado por teledetección.

Cabe destacar que la respuesta obtenida (Figura 5) es otro indicador de coherencia del MEGanE a un modelo teórico-conceptual de difícil evaluación práctica (Berreta, 2005). Este tipo de respuestas no fue introducido *a priori* en el modelo (*input*), sino que es un resultado emergente de la simulación (*output*).

### Eficiencia de cosecha

El MEGanE genera otros *output* que pueden servir como indicadores de coherencia, tales como la eficiencia de cosecha (EC: MS consumida/MS ofrecida). La Figura 6 presenta la relación entre la EC y la dotación (con los mismos criterios de simulación anterior, para un coefClima=1).

La EC en función de la dotación muestra la relación lineal ( $p < 0,01$ ; Figura 6) entre el aumento de la presión de pastoreo por los animales y la misma (Rhades, 2012). Los resultados concuerdan con Rodríguez *et al.* (2004), quienes observaron una relación lineal entre ambos parámetros. Por otra parte, Saldanha (2005) publicó una utilización del forraje en base a la disponibilidad de pastura en torno a 40% para campos naturales de basalto.

### Preñez y condición corporal

El porcentaje de preñez (PP) es uno de los principales indicadores de eficiencia reproductiva del rodeo de cría.

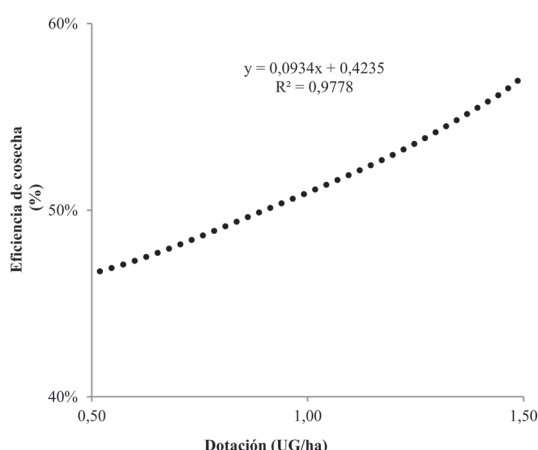


Figura 6. EC en función de la dotación.

Este indicador está a su vez relacionado con la CC (Quintans, 2005).

Para evidenciar la relación entre la CC y el PP, se realizó una simulación para un año «normal» (coefClima=1 en todas las estaciones) y un año «desfavorable» (coefClima=1 en otoño-invierno, y 0,5 en primavera-verano), con el fin de generar un escenario con crisis forrajera primaveral-estival. La simulación fue realizada para un rodeo de vacas de cría (50 cabezas en 50 hectáreas), con un peso inicial de 340 kg. Los resultados de la CC y PP resultante se presentan en la Figura 7.

Como se observa en la Figura 7, en la simulación la CC y el PP están directamente relacionados. La diferencia de PP entre las dos situaciones contrastantes, muestra una caída en la preñez de 17% con la disminución de 1 punto de CC. Los resultados de la preñez en relación con la CC son similares a los obtenidos por Quintans (2005), quien publicó resultados de PP para vacas con CC=4,5 del orden de 80% y para vacas con CC=3,5, en torno a 60%.

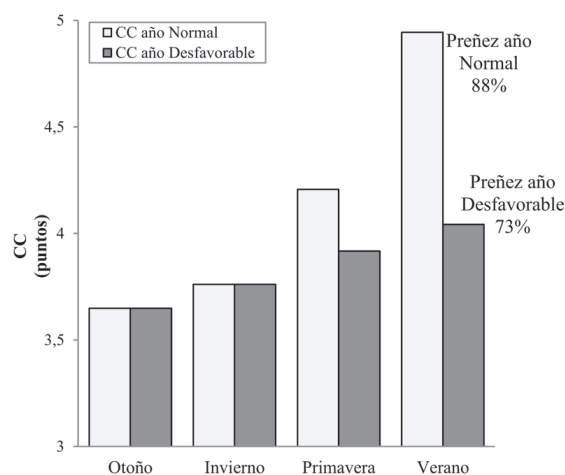


Figura 7. CC y PP para una simulación de un año «normal» y un año «desfavorable».

### Simulación de resultados de una explotación criadora en crisis forrajera

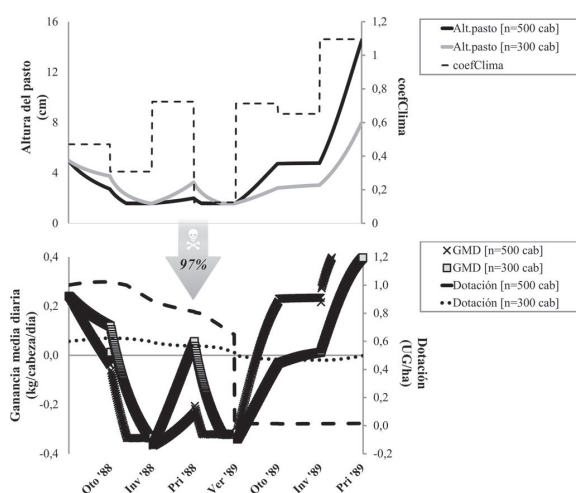
Para probar el funcionamiento del MEGanE en situación de crisis forrajera, se realizó una simulación con los coefClima calculados en función de la publicación de Berreta y Bemhaja (1998), quienes trabajaron con las TCMS del período 1980-1994, en el que ocurrió una crisis forrajera histórica (1988-1989). La situación inicial simulada fue para una superficie de 500 ha (verano de 1988), para dos tamaños de rodeo (500 y 300 vacas de



cría). Para lograr establecer una diferencia en la dotación total del sistema, la simulación se realizó de modo de no tomar ninguna medida en momentos de crisis forrajera, como pudo haber sido la reducción de dotación.

Los resultados de la altura del pasto, GMD y dotación para los dos tamaños de rodeo simulados se presentan en la Figura 8.

Como se aprecia en la Figura 8, la altura del pasto comienza siendo levemente inferior para la simulación de la explotación con rodeo más grande (500 cabezas), hasta el momento crítico de crisis forrajera (indicada con una flecha en la Figura 8). En la crisis forrajera del verano de 1989 el resultado de la simulación arrojó una mortalidad de 97% del rodeo. A partir de este momento crítico, y debido al reducido número de animales, la altura promedio de la pastura fue mayor en la explotación que comenzó con mayor dotación, hasta el final de la simulación. La GMD evoluciona acorde a la altura de la pastura, y ésta responde al coefClima y a la cantidad de animales. La baja dotación inicial (0,6 UG/ha) de la explotación simulada permitió evitar la mortalidad excepcional del verano del 1989 (que diezmó las existencias de vacunos en el país en 15,6%) (OPP *et al.*, 1992).



**Figura 8.** Simulación del evento de sequía del verano 1988-1989, a partir de coefClima calculados a partir de datos de Berreta y Bemhaja (1998).

Por otro lado, el resultado del porcentaje de preñez del verano del 1989 para las dos situaciones fue de 88% y 0%, con una CC promedio en ese período de 3,2 y 2,0, para las explotaciones de baja y alta dotación, respectivamente. Los resultados obtenidos están de acuerdo con la constatación de Pigurina *et al.* (1998), quienes afirman que para el basalto, una dotación de 1 UG/ha resulta excesiva

para mantener coeficientes reproductivos aceptables en el largo plazo. Los resultados obtenidos concuerdan también con algunas prácticas de manejo, donde los productores que trabajan con carga ajustada (0,6-0,7 UG/ha), pueden reducirla a 0,5 en caso de crisis forrajera (Bartaburu *et al.*, 2009).

## Conclusiones

El MEGanE en su estado actual simula en forma adecuada el funcionamiento físico-biológico de una explotación criadora extensiva sobre el basalto, dentro de un espectro muy amplio de situaciones. Los resultados de las simulaciones realizadas están comprendidos dentro de los valores generados por la investigación nacional y se encuentran dentro del nivel de confiabilidad de los mismos.

El modelo, al ser definido solamente por tres ecuaciones: crecimiento del pasto (Ecuación 1), ganancia de peso (Ecuación 2) y el porcentaje preñez (Ecuación 6) —que se revisan en este artículo— lo hacen un modelo sencillo, inspeccionable y robusto. No es necesario confiar en los modelizadores. Los usuarios pueden revisar las ecuaciones y la lógica general que determina la simulación. Los resultados productivos surgen de la interacción del conjunto de variables (por ejemplo la preñez esperada y la eficiencia de cosecha, entre otros), y no dependen de la opinión de los expertos. Por otro lado, la modificación de sus coeficientes (ecuaciones 1 a 5) permite simular otras situaciones productivas, fuera de basalto u otras razas.

Asimismo, el MEGanE responde al indicador de la condición meteorológica (coefClima), de modo que permite simular escenarios con diferentes tasas de crecimiento de la pastura.

El modelo, tal cual fue concebido, tiene el potencial de ser una herramienta de comunicación con los productores ganaderos. El MEGanE será usado en la construcción participativa de herramientas de manejo de rodeo, con una simultánea calibración del mismo en el campo.

Además, se está usando en la realización de juegos interactivos en línea, en la lógica de «simulador de vuelo» y «experiencias virtuales» (Bousquet *et al.*, 1999).

## Agradecimientos

Agradecemos al INIA (FPTA 286) y al proyecto al MOUVE (ANR 2010 STRA 005, Francia) por la ayuda financiera para el desarrollo del modelo. Asimismo, agradecemos a los compañeros del IPA por su apoyo, y a todos los colegas y productores que colaboraron en el desarrollo de esta herramienta.

## Bibliografía

- Bartaburu D, Duarte E, Montes E, Morales Grosskopf H, Pereira M.** 2009. Las sequías : un evento que afecta la trayectoria de las empresas y su gente. En: Morales Grosskopf H, Dieguez Cameróni F. [Eds.]. Familias y campo : Rescatando estrategias de adaptación. Montevideo : Instituto Plan Agropecuario. pp. 155 - 168.
- Berretta E.** 2005. Producción y manejo de la defoliación en campos naturales de basalto. En: Gómez Miller R, Albicette MM. [Eds.]. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. Montevideo : INIA. (Serie técnica; 151). pp. 61 - 74.
- Berretta E, Olmos F, Bemhaja M, Jaurena M.** 2009. Recuperación del campo natural luego de períodos de estrés hídrico. *Revista INIA*, 17: 53-58.
- Berretta E, Bemhaja M.** 1998. Producción estacional de comunidades naturales de basalto de la unidad Queguay Chico En: Berretta EJ. [Ed.]. Seminario de actualización en tecnologías para basalto. Montevideo: INIA. (Serie técnica ; 102). pp. 16 - 28.
- Bettolli ML, Altamirano M, Cruz Brasesco G, Rudorff F, Martínez Ortiz A, Arroyo J, Armoa J.** 2010. Pastura natural de Salto (Uruguay) : relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25: 248 - 259.
- Boote KJ, Jones JW, Pickering NB.** 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88: 704 - 716.
- Bousquet F, D'Aquino P, Rouchier J, Requier-Desjardins M, Bah A, Canal R, Le Page C.** 1999. Rangeland herd and herder mobility in dry inter tropical ones: multi-agent systems and adaptation. En: Eldridge D, Freudenberger D. [Eds.]. People of the Rangelands : Building the future. Proceedings of the VI International Rangeland Congress; Townsville, Australia. Queensland : VI International Rangeland Congress, Inc. pp. 819 - 824.
- Brito G, Luzardo S, Lagomarsino X, Montossi F, La Manna A, Frugoni J, Levratto J, Hernández S, Bottero D, Zamit W, Bentancur M, Costales J, Mederos A, Carracelas B.** 2011. Frecuencia de suplementación invernal en campo natural: Su aplicación en la recria de novillos sobreño. En: Propuestas tecnológicas para el incremento de la productividad, la valorización y el ingreso económico para sistemas ganaderos de basalto. Montevideo: INIA. (Actividades de difusión; 657). pp. 39 - 40.
- Chiara G, Ferreira G.** 2011. Dinámica de la ganadería vacuna en Uruguay : un modelo de simulación. *Revista INIA*, 26: 24 - 30.
- Corral J, Calegari D.** 2011. Towards and agent-based methodology for developing agro-ecosystem simulations. En: Barthe G, Pardo A, Schneider G. [Eds.]. Software engineering and formal methods: 9th International Conference, SEFM 2011; 14 - 18 noviembre 2011; Montevideo, Uruguay. Montevideo: Springer. pp. 431 - 446.
- Crempien C.** 1983. Antecedentes técnicos y metodología básica para utilizar en presupuestación en establecimientos ganaderos. Montevideo: Hemisferio Sur. 72p.
- Dove H.** 1996. Constraints to the modelling of diet selection and intake in the grazing ruminant. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47: 257 - 275.
- Freer M, Moore AD, Donnelly JR.** 2004. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool [En línea]. CSIRO Plant Industry Technical Paper. Consultado 18 abril 2012. Disponible en: [http://www.csiro.au/proprietaryDocuments/TechPaper\\_Aug04.pdf](http://www.csiro.au/proprietaryDocuments/TechPaper_Aug04.pdf).
- Gómez Miller R.** 2004. La invernada como sistema de producción de carne [En línea]. Consultado 18 abril 2012. Disponible en: <http://www.inia.org.uy/prado/2004/invernada.htm>
- Harrington HJ, Tumay K.** 2000. Introduction to process simulation. En: Harrington HJ, Tumay K. [Eds.]. Simulation modeling methods. New York : McGraw-Hill. pp. 1 - 31.
- IPA.** 2011. Evaluación de una metodología de modelación y simulación participativa para contribuir a la comprensión y comunicación del fenómeno de la sequía y mejorar la capacidad de adaptación de productores ganaderos del basalto. Montevideo : Instituto Plan Agropecuario. 44p.
- Johansen O.** 2004. Sinergia y recursividad. En: Johansen O. [Ed.]. Introducción a la teoría general de sistemas. México: Limusa. pp. 35 - 52.
- Jones JW, Hoogenboom G, Portera CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT.** 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235 - 265.
- Kunkle WE, Sand RS, Rae D.** 1994. Effect of body condition on productivity in beef cattle. En: Fields MJ, Sand RS. [Eds.]. Factors affecting calf crop. Boca Raton : CRC Press. pp. 167-178.
- Mieres J, Assandri L, Cúneo M.** 2004. Tablas de valor nutritivo de alimentos. En: Mieres JM. [Ed.]. Guía para la alimentación de rumiantes. Montevideo : INIA. Uruguay. (Serie técnica ; 142). pp. 13 - 68.
- Morin E.** 1977. L'Unité complexe organisée : Le Tout et les parties : Les émergences et les contraintes. En: Morin E. [Ed.]. La méthode : La nature de la nature. Paris: Éditions du Seuil. pp. 105 - 138.
- Mott GO.** 1960. Grazing pressure and the measurement of pasture production. En: Skidmore CL, Boyle PJ, Raymond LW. [Eds.]. Proceedings 8th International Grassland Congress. Reading: Alden Press. pp. 606 - 611.
- NRC.** 2000. Nutrient Requirements of Beef Cattle. 7th rev. ed. Washington: National Academy Press. 234p.
- OPP, OEA, BID.** 1992. Uruguay: Estudio Ambiental Nacional [En línea]. Washington. Consultado 18 abril 2012. Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea10s/begin.htm#Contents>.
- Orcasberro R.** 1989. Estrategias de alimentación de vacunos y ovinos para la actual crisis forrajera. Montevideo: MGAP. 32p.
- Paruelo JM, Oesterheld M, Di Bella CM, Arzadum M, Lafontaine J, Cahuepe M, Rebella CM.** 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remotely sensing data. *Applied Vegetation Science*, 3: 189 - 195.
- Pereira M.** 2011. ¿Cuánto pasto producen los campos de basalto? En: Pereira M. [Ed.]. Manejo y conservación de las pasturas naturales del basalto. Montevideo: MGAP. pp. 12 - 18.
- Pigurina G, Soares de Lima JM, Berretta E, Montossi F, Pittaluga O, Ferreira G, Silva J.** 1998. Características del engorde a campo natural. En: Berretta EJ. [Ed.]. Seminario de actualización en tecnologías para basalto. Montevideo: INIA. (Serie técnica ; 102). pp. 150 - 160.
- Quintans G.** 2005. Control del amamantamiento. *Revista INIA*, 128: 9 - 11.
- Rhades L.** 2012. Pautas técnicas para la instalación y manejo de alambrados eléctrico [En línea]. Colonia Benítez : INTA. 9p. (Hoja de Divulgación Técnica ; 14). Consultado 18 abril 2011. Disponible en: [http://inta.gob.ar/documentos/pautas-tecnicas-para-la-instalacion-y-manejo-del-2011-calambrados-electrico2011d-1er-parte/at\\_multi\\_download/file?name=INTA-Alambrado%20El%C3%A9ctrico%201%20parte%20.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/pautas-tecnicas-para-la-instalacion-y-manejo-del-2011-calambrados-electrico2011d-1er-parte/at_multi_download/file?name=INTA-Alambrado%20El%C3%A9ctrico%201%20parte%20.pdf).
- Rodríguez AM, Jacobo EJ, Beliera D, Pacín F.** 2004. Selectividad y eficiencia de cosecha en pasturas polifíticas del sudoeste de Buenos Aires [En línea]. 27° Congreso Argentino de Producción Animal. Asociación Argentina de Producción Animal. Consultado 5 octubre 2012. Disponible en: <http://www.aapa.org.ar/congresos/2004/PpPdf/PP98.pdf>.

**Saldanha S.** 2005. Manejo del pastoreo en campos naturales sobre suelos medios de basalto y suelos arenosos de Cretácico. En: Gómez Miller R, Albicette MM. [Eds.]. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. Montevideo : INIA. (Serie técnica; 151). pp. 75 - 84.

**Thornley JHM, France J.** 2007. Role of mathematical models. En: *Mathematical models in agriculture*. England: Cabi Publishing. pp. 1 - 17.

**Vargas LM.** 2003. Desarrollo de un modelo dinámico mecanístico para la estimación de parámetros de crecimiento bacteriano ruminal mediante una técnica de doble ajuste [Tesis de Doctorado. En línea]. Mérida: Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Yucatán. México. Consultado 18 abril 2012. Disponible en: [http://www.avanzavet.com/bioeficiencia/media/TD\\_LVargas.pdf](http://www.avanzavet.com/bioeficiencia/media/TD_LVargas.pdf)

**Von Bertalanffy L.** 1972. The history and status of general systems theory. *The Academy of Management Journal*, 15: 407 - 426.

**Wainwright J, Mulligan M.** 2004. Introduction. En: Wainwright J, Mulligan M. [Eds.]. *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. England: John Wiley & Sons. pp. 1 - 4.