

## Artículo Científico

# Simulación de sistemas de engorde de bovinos en pastoreo en el trópico húmedo de Costa Rica en función de carga animal, nivel de melaza suplementaria y época del año

*Simulation of grazing cattle fattening systems in the humid tropics of Costa Rica depending on stocking rate, level of supplemental molasses and time of the year*

JOSÉ DANIEL HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, ALBERTO RAMÍREZ<sup>2</sup>, DANILO PEZO<sup>1</sup>, CRISTÓBAL VILLANUEVA<sup>1</sup> Y ROBERTO QUIROZ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. [catie.ac.cr](http://catie.ac.cr)

<sup>2</sup>Productor, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

<sup>3</sup>Instituto de Innovación Agropecuaria (IDIAP) y Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Ciudad de Panamá, Panamá. [idiap.gob.pa](http://idiap.gob.pa)

## Resumen

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa sostenible para producir carne bovina en el trópico. En el presente estudio se obtuvieron ganancias diarias de peso (GDP) por animal de 0.64 kg en pasturas de *Urochloa brizantha* 'Toledo' + *Arachis pintoi* o *U. decumbens* sola, las que han persistido por más de 10 años, con cargas que van de 1.9 a 3.2 UA/ha (UA=400 kg PV) en ciclos de 10 meses. Los potreros tenían cercas vivas de *Gliricidia sepium* y árboles dispersos de *Erythrina poeppigiana* y *Cordia alliodora*. Se simuló el comportamiento observado con el modelo Life-Sim y se encontró que el promedio del error absoluto (MAE), para 25 comparaciones de GDP, fue de 0.056 kg. El suministro de melaza al 18.32% del consumo potencial de MS, aportó la energía requerida para un mejor aprovechamiento de la proteína contenida en el forraje consumido, alcanzando una GDP de 0.85 kg, pero su uso no resultó económicamente factible. Se evaluó, además, el efecto de la fluctuación de los precios de compra y venta de bovinos para la actividad de engorde a lo largo del año. El máximo margen bruto por animal correspondió al inicio del engorde en febrero (US\$ 621), el mínimo para marzo (US\$ 445) y la media anual fue US\$ 544. Cuando se utilizaron los precios de los últimos 10 años, no se encontró diferencia entre los meses de inicio del engorde. Otros parámetros evaluados fueron consumo de N (139.66±3.88 g/animal/día); retención de N (25.60±0.58%); cantidad de N urinario (49.74±0.63 g/animal/día), y fecal (54.12±1.50 g/animal/día); y emisiones de CH<sub>4</sub> (80.48±4.76 kg/año).

**Palabras clave:** Análisis económico, *Arachis pintoi*, modelo Life-Sim, simulaciones, sistemas silvopastoriles, *Urochloa*.

## Abstract

Silvopastoral systems (SSP) are a sustainable alternative to produce beef in the tropics. In the present study, the average daily weight gain (ADG) per animal was 0.64 kg in pastures of *Urochloa brizantha* 'Toledo', associated with *Arachis pintoi* and *U. decumbens* as a monoculture. These pastures have persisted for over ten years, with stocking rates ranging from 1.9 to 3.2 AU/ha (UA=400 kg) in 10-month rotation cycles. The paddocks had live fences of *Gliricidia sepium* and scattered trees of *Erythrina poeppigiana* and *Cordia alliodora*. The Life-Sim model was used to simulate the response using 25 comparisons of ADG with a mean absolute error (MAE) of 0.056 kg. Supplementing molasses at 18.32% of the potential DM intake provided the energy required to improve the utilization of the excess protein contained in the forage consumed, resulting in higher ADG (0.85 kg), but its inclusion was non-profitable.

Correspondencia: Roberto Quiroz, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Postal address, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: [Roberto.quiroz@catie.ac.cr](mailto:Roberto.quiroz@catie.ac.cr)

Another scenario evaluated was the effect of fluctuating prices on the purchase and sale of fattened cattle throughout the year. The maximum gross margin per animal was for February (US\$ 621), the minimum for March (US\$ 445), and the annual mean was US\$ 544. No difference among the starting months for fattening was detected when the prices for the last ten years were used. Other parameters evaluated were N consumption ( $139.66 \pm 3.88$  g/animal/day); N use efficiency ( $25.60 \pm 0.58\%$ ); urinary N excretion ( $49.74 \pm 0.63$  g/animal/day), fecal N ( $54.12 \pm 1.50$  g/animal/day); and CH<sub>4</sub> emissions ( $80.48 \pm 4.76$  kg/year).

**Keywords:** *Arachis pintoi*, economic analysis, Life-Sim model, silvopastoral systems, simulations, *Urochloa*.

## Introducción

La demanda de proteína de origen animal se ha incrementado significativamente en las últimas décadas en los países en desarrollo, no solo como consecuencia del crecimiento de la población, sino porque el consumo per cápita ha crecido en función del incremento en el ingreso promedio de la población ([Adesogan et al. 2020](#)) y del aumento en la proporción de población urbana ([Hawkes et al. 2017](#)). En el caso de la carne, este incremento ha sido más evidente en América Latina, donde los niveles de consumo se están aproximando a los de países desarrollados ([Parlasca y Qaim 2022](#)); mientras en estos últimos el consumo de carne tiende a estancarse ([Henchion y Zimmerman 2021](#)).

Este incremento en la demanda de carne ha traído como consecuencia un aumento en la población de animales, acompañado de impactos negativos en la cobertura boscosa, así como sobre varios de los servicios ecosistémicos provistos por tierras bajo manejo ganadero ([Gill et al. 2021](#); [Henchion et al. 2021](#)). Por ello, la intensificación sostenible de los sistemas de producción debe buscar mejorar la eficiencia a través de: cambios en las prácticas de alimentación haciendo un mejor uso de los recursos locales (forrajes y suplementos), el descarte de animales improductivos, la mejora de la fertilidad y salud del hato, y la utilización racional de genotipos animales adaptados ([Adesogan et al. 2020](#); [Greenwood 2021](#); [Parlasca y Qaim 2022](#)).

El desarrollo de opciones de intensificación de los sistemas ganaderos en el trópico puede partir del análisis de experiencias locales exitosas, y hacer uso de herramientas tecnológicas como son los modelos determinísticos-estocásticos de simulación, para evaluar el impacto de intervenciones potenciales bajo diferentes escenarios de producción. En el caso de los sistemas basados en pasturas, es importante considerar el efecto de las variaciones climáticas a lo largo del año sobre la disponibilidad y calidad nutritiva de los forrajes ([Rao et al. 2015](#)), las cuales se han visto exacerbadas como consecuencia del cambio climático ([Pezo 2017](#)).

En el caso de Costa Rica, el ganado de carne representa el 61.7% del hato nacional, con más del 92.5% manejado bajo pastoreo, con una distribución casi igual entre pasturas mejoradas y naturalizadas ([INEC 2023](#)), manteniendo una carga promedio de 1.29 animales/ha como media nacional, y 1.51 animales/ha en la región tropical húmeda ([MAG 2022](#)), donde se realizó el presente estudio. En términos generales, el sector todavía presenta baja productividad por unidad de espacio y tiempo, debido a la estacionalidad en producción y calidad de los forrajes, una edad de sacrificio superior a los 3 años y bajas tasas de natalidad, entre otros factores ([Pérez et al. 2006](#); [MAG 2022](#)), todo lo cual redundando en un bajo nivel de ingreso por hectárea, comparado con los altos costos del capital invertido en tierra, lo cual hace la actividad poco competitiva ([Holmann et al. 2008](#)). Sin embargo, existen oportunidades para mejorar la eficiencia productiva y económica de la actividad, dado el incremento en la adopción de especies forrajeras mejoradas ([Holmann et al. 2004](#)), acompañados de nuevas oportunidades de mercado local e internacional como producto del reconocimiento al país por sus esfuerzos para incrementar la eficiencia productiva, el fomento de la reforestación en fincas ganaderas, la adaptación al cambio climático y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero ([Lerma et al. 2022](#); [MAG 2015](#)).

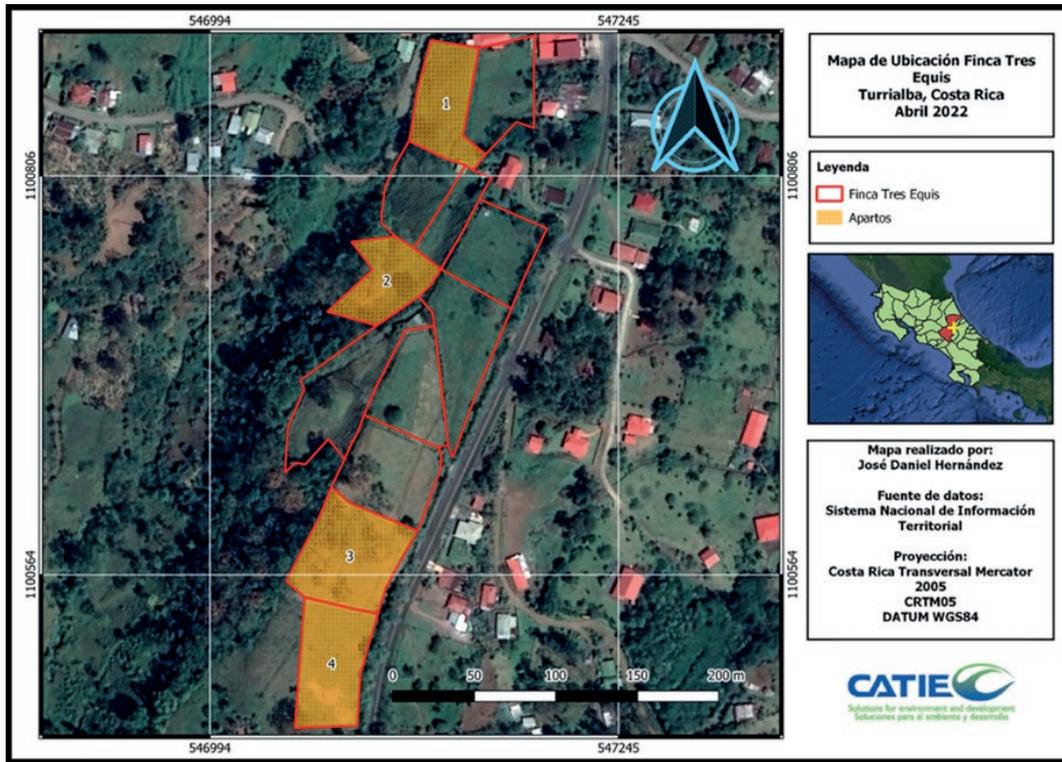
El presente estudio evaluó el comportamiento biológico y económico de un sistema de engorde de novillos en pastoreo en la región tropical húmeda. El modelo de finca analizado en el estudio es un esfuerzo para mostrar que es factible la intensificación sostenible de procesos de engorde en pastoreo, basados en pasturas mejoradas con manejo rotacional intensivo, dentro de sistemas silvopastoriles. El propósito del estudio fue evaluar cómo los cambios en la estrategia de suplementación, la carga animal y las fechas de compra y venta de animales pueden modificar la ganancia de peso por animal y por hectárea, así como el beneficio económico del sistema y su impacto sobre el ambiente.

**Materiales y Métodos**

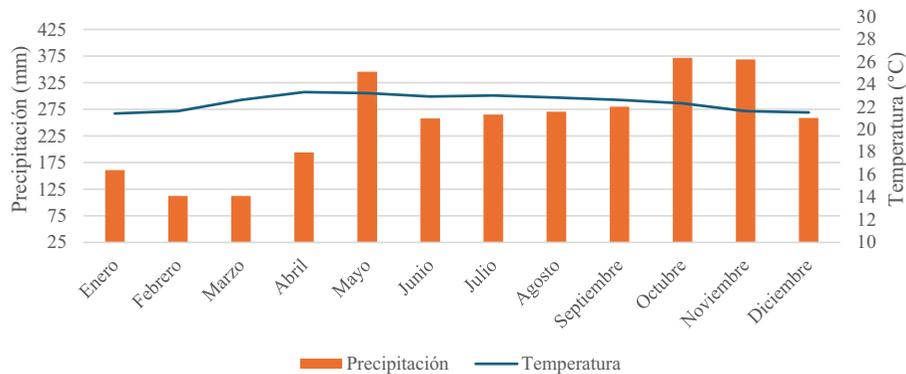
*Descripción del área de estudio*

El estudio se realizó en una finca ganadera de solo cuatro hectáreas (Figura 1), de las cuales, tres están en pasturas dedicadas al engorde de bovinos y una se encuentra cubierta por un bosque secundario, donde predomina la especie *Erythrina poeppigiana*. El área de pasturas está dividida en 12 potreros, de los cuales cuatro fueron seleccionados para la toma de muestras del estudio.

La finca se encuentra localizada en el Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica, a 9°57'18" N y 83°34'11" E, a 712 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), con precipitación promedio anual de 3,200 mm, distribuida mayormente entre marzo y noviembre, y temperatura media de 24 °C (Figura 2). La topografía es ondulada con pendientes entre 25% y 35%. Los suelos en la zona son del Orden Inceptisoles, con textura franco-arcillosa, caracterizados por la presencia de incrustaciones calcáreas y horizontes de cenizas volcánicas.



**Figura 1.** Localización del área de estudio Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Costa Rica. El contorno en rojo delimita las divisiones de los 12 potreros de la finca. En color naranja aparecen los potreros seleccionados para la toma de muestras de este estudio.



**Figura 2.** Precipitación y temperatura promedio en el Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica (1988-2017). Adaptado de Zepner et al. (2020).

### Manejo del sistema (pasturas y bovinos)

La finca cuenta con un área de tres hectáreas en pasturas, distribuidas en 12 potreros de 2,500 m<sup>2</sup> cada uno, con dominancia de *Urochloa brizantha* 'Toledo' en asocio con *Arachis pintoi* y otras de *U. decumbens* sola. El periodo de ocupación de cada potrero fue de tres días, proporcionando un descanso de al menos 30 días entre pastoreos. La carga animal promedio (CA), al inicio del ciclo anual de engorde (10 meses de pastoreo dos de descanso) fue de aproximadamente 1.9 UA/ha (1 UA=400 kg de PV), pero ésta se incrementó hasta 3.2 UA al final del ciclo de engorde de 10 meses. Los potreros se encuentran delimitados por cercas vivas, en su mayoría de especies multipropósito como *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, de la que se aprovecha el follaje y ramas tiernas para preparar ensilaje, el cual es utilizado para suplementación de los animales en el período más crítico. Otra especie que compone las cercas vivas es la *Erythrina poeppigiana*, que conforma el estrato más alto y aporta nutrientes al suelo a través de la hojarasca y ramas caídas. La *E. poeppigiana* y la especie maderable *Cordia alliodora* se encuentran también dispersas en los potreros como resultado de la regeneración natural y de algunos esfuerzos de reforestación hechos por el productor.

La finca cuenta con dos áreas pequeñas techadas donde, además de ser la zona de descanso para los animales, es donde se proporciona agua, sales minerales y otros alimentos a los animales. Todos los potreros tienen acceso a una de las áreas techadas y el desplazamiento de los animales hacia éstas se logra con la ayuda de portones y cercas eléctricas móviles.

### Análisis de suelos

En cada potrero se tomaron cinco muestras de suelo en el horizonte A (0 a 20 cm de profundidad), y con ellas se preparó una muestra combinada para los análisis en laboratorio. Para determinar la textura se utilizó el método de Bouyucos (granulometría), con lectura inicial de 40 s y una lectura final de 2 h. En cuanto a fertilidad, se utilizaron tres métodos. Las extracciones se realizaron usando el método de Olsen Modificado, pH 8.5, para determinar los valores de Cu, Zn, Mn, Fe, K y P y en KCl 1N para determinación de Ca, Mg, y acidez intercambiable. Por último, se utilizó el método

de combustión total en un auto analizador marca ThermoFinnigan, modelo Flash EA 1112 series Italia para el pH en agua, C y N. El detalle de los procedimientos utilizados se describe en Díaz-Romeu y Hunter (1978).

### Mediciones en las pasturas

Para validar los estudios que existen de la zona donde se condujo la investigación, la disponibilidad (Dis) de las pasturas, en kg de materia seca (MS), se determinó en el mes de junio (época de lluvia), utilizando la técnica BOTANAL® (Tohill et al. 1978). Se tomaron cinco muestras reales y entre 64 y 147 muestras visuales por potrero, en función de la variabilidad observada. Se utilizó un marco cuadrado de 0.25 m<sup>2</sup> (0.5 × 0.5 m). Las mediciones se realizaron un día antes de la entrada de los animales a pastoreo (oferta de pasto).

De cada potrero se extrajeron dos tipos de muestra para el análisis de digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS). Una muestra fue tomada simulando la cosecha por el animal, teniendo en cuenta la selectividad de éstos (Villalobos y Arce 2014). La otra, fue el resultado de la combinación del material vegetal obtenido en las muestras reales, las cuales fueron cortadas a 10 cm sobre la superficie del suelo, pesadas por separado y mezcladas para la obtención de la submuestra que fue analizada en el laboratorio de Análisis de Productos Animales y Vegetales de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional (UNA) de Costa Rica. Para la determinación de DIVMS se utilizó la metodología descrita por Van Soest y Robertson (1980), y el protocolo recomendado por el fabricante para el incubador Daisyll® (ANKOM Technology, Fairport, NY-USA).

El porcentaje de materia seca (% MS) se obtuvo al secar las muestras en horno de ventilación forzada a una temperatura de 65 °C hasta alcanzar un peso constante, para luego ser pesada y conocer la diferencia entre el peso seco y el peso fresco de la muestra. Para el nitrógeno total (NT) y carbono total (CT) las muestras se analizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejidos y Aguas del CATIE. El NT (%) se determinó usando el método de Kjeldahl, y la proteína cruda (PC, %) se estimó multiplicando el NT por 6.25; el CT (%) se determinó por el método de combustión, ambos citados por Díaz-Romeu y Hunter (1978). Todos estos datos fueron usados como insumos para las corridas en el modelo de simulación Life-Sim.

### Modelación de la respuesta animal con el modelo LIFE-SIM (carne)

El software “Livestock Feeding Strategies Simulation Models”, LIFE-SIM (León-Velarde et al. 2006), fue desarrollado con el objetivo de evaluar los efectos de diferentes estrategias de alimentación sobre la producción animal. Cada uno de los cuatro modelos de rumiantes (vacas lactantes, bovinos en crecimiento, caprinos y búfalos) incluye subrutinas específicas para el crecimiento o disponibilidad de las pasturas, la ingesta voluntaria, el uso de suplementos, los requerimientos de nutrientes, la regulación térmica, con los cuales se estiman la producción de leche o carne, la producción de estiércol, las emisiones de metano y además incluye un análisis económico. Los detalles del modelo de simulación están descritos en León-Velarde et al. (2006).

En el presente estudio se utilizó el modelo de bovinos en crecimiento, con el cual se estimó la ganancia de peso de animal en pastoreo, en función del consumo de energía y proteína. Para ese fin, el modelo requiere como insumos información apropiada sobre: las características del ganado, los pastos y forrajes, las condiciones climáticas, la suplementación y los precios de los alimentos y productos. La información requerida para el componente animal es: el potencial de producción (medido en función de curvas de crecimiento), la edad, la condición corporal y la composición química de la carne, la carga animal (número de unidades animales por hectárea), así como la ingesta potencial de alimento (como porcentaje del peso corporal) y la variación esperada (experimental) en la ingesta de alimento.

Además, se usaron dos rutinas adicionales que posee el modelo, una para estimar la emisión diaria de CH<sub>4</sub> con base en la ecuación propuesta por Blaxter y Clapperton (1965), y otra para calcular la proporción de la rentabilidad explicada por sus componentes, a saber: 1) el componente de precio, el cual es la proporción de la rentabilidad explicada por la variación del precio a lo largo del período de engorde, si el peso no ha cambiado; 2) el componente de peso es la proporción de la rentabilidad explicada por el cambio de peso, si el precio no ha cambiado y, 3) el componente interacción entre los cambios de precio y peso durante el período de engorde, el cual afecta la rentabilidad.

La parametrización del modelo se llevó a cabo utilizando insumos obtenidos de los registros de la finca y

declaraciones del productor, referente a los tres últimos ciclos productivos de la finca, así como de la literatura (Cuadrado et al. 2004). Los datos secundarios fueron complementados con muestreos de campo. Los valores ingresados fueron: Peso inicial (220 kg), edad al inicio (1 año), disponibilidad de forraje (950 y 3,192 kg MS/ha/año) y DIVMS (62.5 y 65.7%), para las épocas de menor (diciembre a marzo) y mayor precipitación (abril a noviembre), respectivamente. El pasto tuvo un contenido promedio de PC del 8.69% y se utilizó una carga animal promedio de 3 UA/ha.

Para calcular el nivel de precisión de las estimaciones realizadas por el modelo, se utilizaron tres índices: el error medio absoluto (MAE), medida común del error de pronóstico; el error cuadrático medio (RMSE) y su coeficiente de variación (CVRMSE) (Willmott 1982; Castellaro et al. 2007; Fontoura Junior et al. 2007; Candelaria-Martínez et al. 2011; Quiroz et al. 2017). Las variables de respuesta utilizadas fueron la ganancia diaria de peso observada (GDPO) y la simulada (GDPS),

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}}$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{Media\ GDPO} \times 100$$

donde:

GDPO: Ganancia diaria de peso observada (kg),

GDPS: Ganancia diaria de peso simulada (kg),

CV: Coeficiente de variación (%),

$Y_i - X_i$ : GDPS-GDPO,

n: Número de observaciones

### Suplementación energética y carga animal

Para la determinación del nivel de suplementación energética requerido para las condiciones de la finca de estudio, se simuló el sistema de alimentación practicado con el modelo validado, y se encontró que la energía era el factor limitante. Por ello, se diseñó un experimento simulado para determinar la tasa de ganancia de peso en función del nivel de suplementación con melaza. Se

evaluaron los siguientes niveles de melaza, expresados como porcentaje del consumo potencial de MS (ó 3 % PV): 0 (T<sub>0</sub>), 10 (T<sub>10</sub>), 20 (T<sub>20</sub>), 30 (T<sub>30</sub>) y 40% (T<sub>40</sub>). Los datos de la melaza usados como insumos para el modelo fueron: 73.5% de MS, 5.74% de PC y 85% de DIVMS (Araiza et al. 2013). El consumo de melaza fue ajustado de acuerdo con el PV y varió a lo largo del ciclo de engorde entre 1.1 y 2.3; 2.2 y 4.6; 3.3 y 6.8; y 3.6 y 7.5 kg de MS/animal/día, para T<sub>10</sub>, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> y T<sub>40</sub>, respectivamente. El punto de paridad- donde no hay ni excedente ni déficit de energía o proteína en la dieta- se estimó igualando las ecuaciones lineales de regresión para las GDP limitadas por energía y proteína, en función del incremento en la suplementación energética y despejando el valor de X (nivel de melaza). Para el análisis financiero se utilizó el costo local de US\$ 0.35 por kilo de melaza.

Con el fin de analizar la interacción entre la suplementación energética y la carga animal, se diseñó un experimento simulado para determinar la combinación óptima de los tratamientos evaluados. Se usó un diseño de Superficie de Respuesta Rotable de Composición Central (Montgomery 1984). Los tratamientos se diseñaron y corrieron en Excel con el programa desarrollado por León-Velarde y Quiroz (1999). Se evaluaron 4 tratamientos factoriales (2<sup>k</sup>), 4 axiales (2k) y el tratamiento central (n<sub>0</sub>). El tratamiento central se repitió cinco veces. El total de tratamientos evaluados fue de nueve, producto de 2<sup>k</sup>+2k+n<sub>0</sub>, (donde k=2 factores). Para que el diseño fuera rotatable, se requirió de un valor (α) que dependía del número de puntos en la porción factorial del diseño. El valor de “α” se estimó

como α=P<sup>1/4</sup>, donde P=2<sup>k</sup> y k=2 (número de tratamientos) entonces α=1.414:

$$\begin{aligned} \alpha &= P^{1/4} \\ \alpha &= (2^2)^{1/4} \\ \alpha &= 1.414 \end{aligned}$$

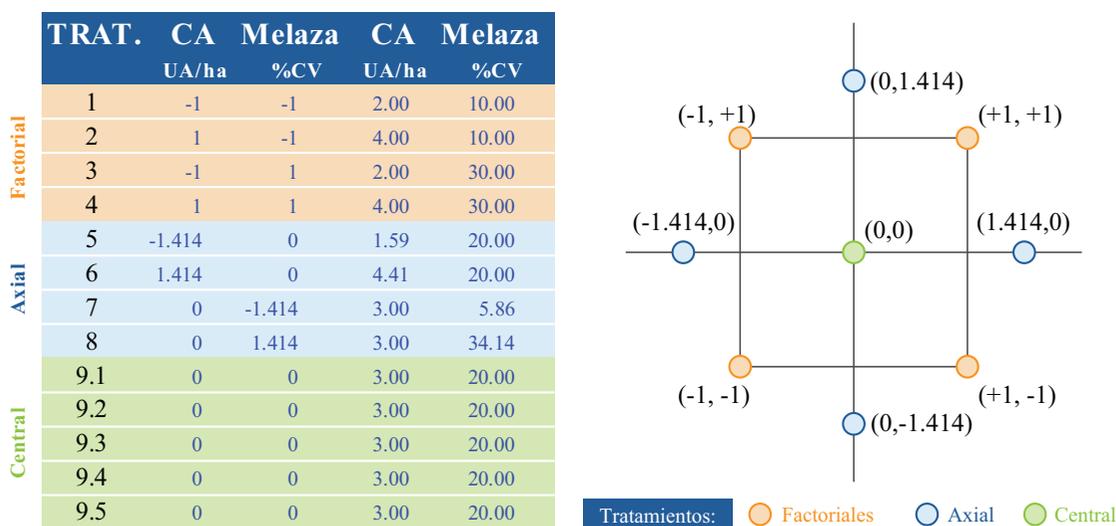
El diseño de los tratamientos evaluados, tanto en código como los valores estimados de niveles de carga animal y melaza, se muestran en la Figura 3. Las variables X<sub>1</sub>=carga animal (UA/ha) y X<sub>2</sub>=melaza (% consumo potencial de MS) variaron de 1 a 5 y de 0 a 40, respectivamente. Los tratamientos centrales, con código 0, correspondieron a 3 UA/ha y 20% de melaza.

*Mes de inicio del ciclo de ceba y su efecto sobre ganancia de peso*

Para determinar si hay un efecto de la fecha de inicio de la ceba, se corrieron simulaciones iniciando ésta en los diferentes meses del año, desde enero a diciembre.

*Análisis financiero*

Para el análisis financiero se realizó una proyección de la actividad a 12 años, considerando esa como la vida útil, tanto de la pastura como de las cercas. El costo de producción de 1 kg de forraje fresco se estimó usando el registro de los gastos en los que incurre el productor en el establecimiento de la pastura de *Urochloa*, el manejo y los costos de depreciación anual de una determinada



**Figura 3.** Descripción de tratamientos, carga animal y melaza para un experimento simulado con un diseño de Superficie de Respuesta Rotable de Composición Central.

área dedicada a la nueva pastura, considerando también las cercas vivas, dividido por el área total de la misma.

Los precios por kilo de peso vivo utilizados fueron los oficiales registrados por la Corporación de Fomento Ganadero de Costa Rica (Corfoga 2022). Se utilizaron los valores obtenidos para los últimos 10 años, para incluir la variabilidad de precio entre años. Se seleccionó el precio para animales con pesos entre 251 y 300 kg como rango de pesos de compra y, entre 401 y 500 kg como el rango de peso de venta. El análisis de simulación se realizó teniendo en cuenta el mes de inicio del ciclo de engorde. El análisis de beneficio-coste se realizó para el año 2021, período para el que se tenían datos medidos en la finca, y un período de engorde de 10 meses. Se repitió el análisis considerando los precios oficiales para los 10 años previos y así evaluar su repercusión en la distribución probabilística de la relación beneficio-coste. Además, se realizó un análisis financiero considerando el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) con una tasa de descuento de 9%, y la relación beneficio-coste (B/C).

## Resultados

### Condiciones de Suelo

El suelo presentó una textura franco-arcillosa en los primeros 20 cm del perfil del suelo, y pH ácido, en un rango de 5.1 a 5.7. La relación C:N osciló entre 8.4 y 9.8, donde los mayores niveles de estos

dos elementos se encontraron en la asociación *Urochloa brizantha* 'Toledo'-*Arachis pintoi*. (Cuadro 1). Los potreros con *Urochloa decumbens* sola (D) o con árboles dispersos de *Erythrina poeppigiana* (D+E) mostraron los mayores valores de Ca y Mg.

### Características de las pasturas (disponibilidad y calidad nutritiva)

La disponibilidad en los diferentes tipos de potreros varió de 2.4 a 3.9 t MS/ha, mientras que los contenidos de materia seca, proteína cruda y digestibilidad *in vitro* de la MS oscilaron entre 17.6 y 25.0; 4.5 y 13.4; y 56.8 y 70.0%, respectivamente (Cuadro 2). Los mayores valores de digestibilidad y proteína cruda se obtuvieron en los potreros que tenían árboles dispersos, mayormente de *E. poeppigiana*. Los potreros con pasto *Urochloa brizantha* 'Toledo' mostraron una mayor disponibilidad de biomasa forrajera que aquellos con *U. decumbens*.

### Validación del modelo LIFE-SIM con datos de campo

Los valores de ganancia diaria de peso mínima, máxima y la media general observados (GDPO) y simulados (GDPS), para los 25 animales engordados entre los años 2019 y 2021 se muestran en la Figura 4A. El valor promedio del error absoluto (MAE) fue de 0.056 kg, y el error cuadrático medio (RMSE) y su coeficiente de variación (CV) fueron de 0.07 kg y 10.56%, respectivamente.

**Cuadro 1.** Fertilidad y textura del suelo en las parcelas seleccionadas en los primeros 20 cm de profundidad.

Tipo de pastura	pH	Acidez	Ca	Mg	K	P	N	C	Arena	Limo	Arcilla	Textura
	H <sub>2</sub> O		cmol(+)/l			Mg/l			%			
T+A	5.4	0.20	5.64	3.53	0.23	3.1	0.44	4.03	47.0	27.8	25.2	Franco arcilloso arenosos
T+A+E	5.1	0.48	4.84	3.22	0.10	5.4	0.33	2.79	37.0	23.7	39.3	Franco arcilloso
D+E	5.3	0.33	8.21	4.80	0.20	4.2	0.30	2.61	41.1	27.6	31.3	Franco arcilloso
D	5.7	0.18	7.15	5.36	0.22	4.6	0.25	2.44	46.0	29.7	24.3	Franco

T=*Urochloa brizantha* 'Toledo'; A=*Arachis pintoi*; E=*Erythrina poeppigiana*; D=*Urochloa decumbens*.

**Cuadro 2.** Disponibilidad, contenido de materia seca, proteína y digestibilidad *in vitro* de la materia seca en función de las especies dominantes en los potreros: muestreo de validación de datos existentes para la zona de estudio.

Potrero	Muestras visuales	Tipo de pastura	Disponibilidad (kg MS/ha)	MS (%)	PC (%)	Dig (%)
1	85	T+A	3,793	24.9	4.5	56.8
2	64	T+A+E	3,901	25.0	9.9	63.7
3	147	D+E	2,991	21.2	13.4	70.0
4	113	D	2,399	17.6	8.6	59.7

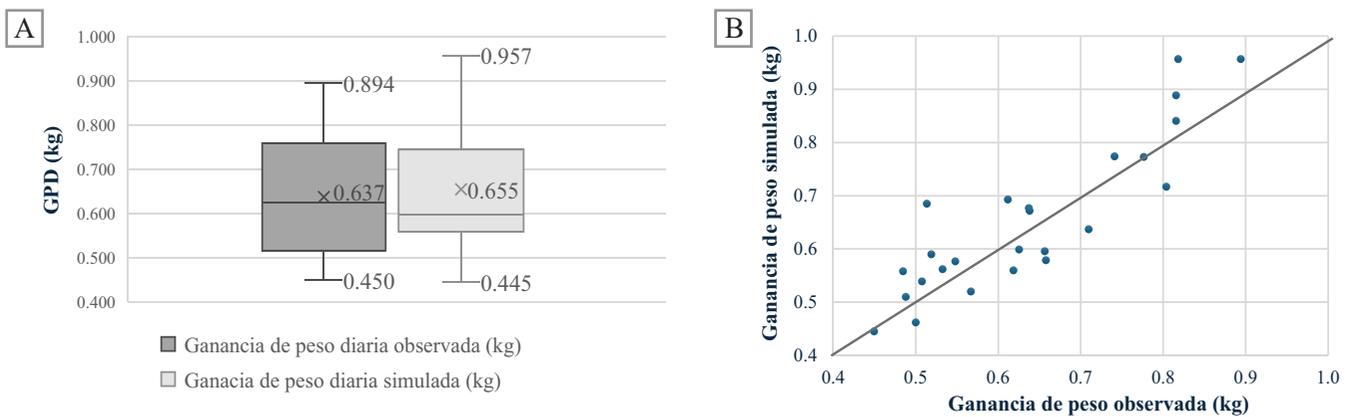
MS=materia seca; PC=proteína cruda; Dig=digestibilidad; T=*Urochloa brizantha* 'Toledo'; A=*Arachis pintoi*; E=*Erythrina poeppigiana*; D=*Urochloa decumbens*.

Los datos de GDPO y GDPS se dispersaron alrededor de la línea 1:1 (línea de 45° o X=Y), distribuyéndose aleatoriamente alrededor de la línea 1:1, con intercepto igual a cero y pendiente igual a 1 (Figura 4B).

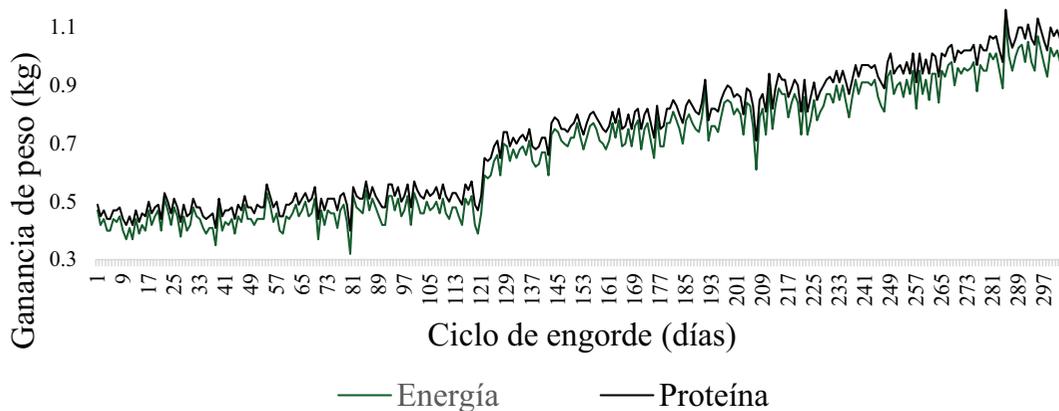
*Efecto de la suplementación con melaza sobre la ganancia de peso*

En los resultados de la simulación de la ganancia de peso en función de la energía y la proteína consumidas, usando como insumos los datos observados, se aprecia que a través de todo el ciclo de engorde (300 días), el consumo de energía fue el limitante principal (Figura 5).

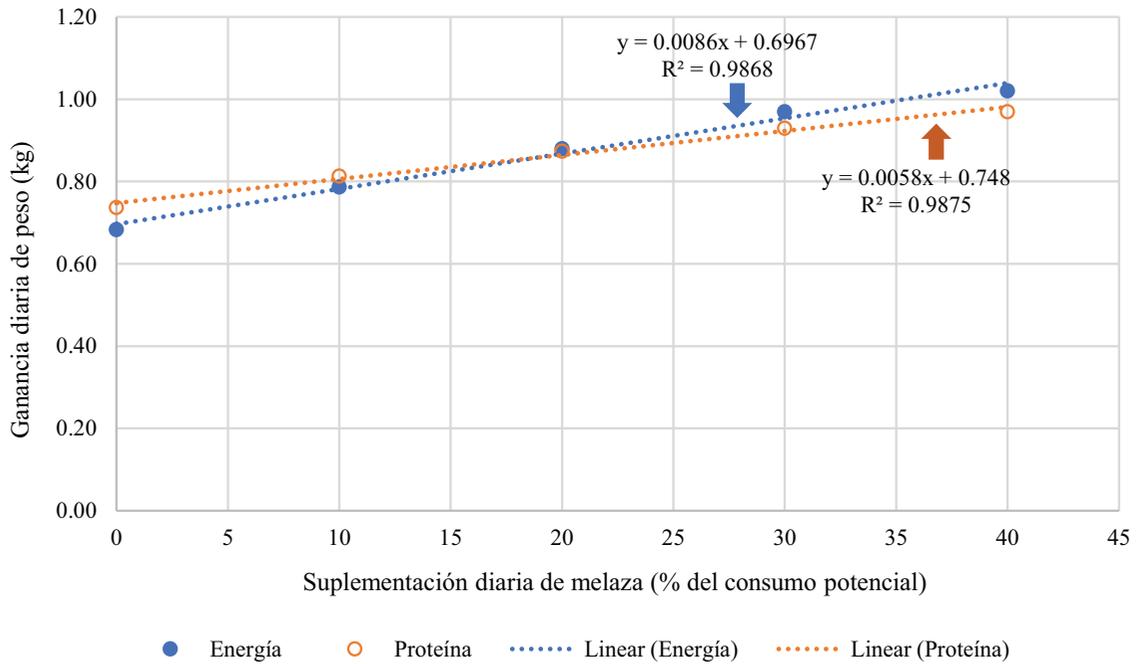
En la Figura 6 se presenta la ganancia de peso esperada, en función de la energía y la proteína consumidas, cuando se suplementa con niveles crecientes de melaza de 0 a 40% del consumo potencial. Al igualar las dos ecuaciones y despejar X se obtuvo que la ganancia de peso por energía y proteína se igualaba cuando el nivel de melaza era del 18.32%. Por debajo de ese nivel de suplementación había un déficit de energía y por encima un exceso de ese factor. La GDP para ese nivel de suplementación con melaza es de 0.854 kg/día; es decir, 256 kg/animal/ciclo de 300 días; en cambio, en ausencia de suplementación energética la ganancia de peso por todo el ciclo de engorde fue de apenas 205 kg/animal.



**Figura 4.** Evaluación del desempeño del modelo Life-Sim para estimar la ganancia diaria de peso: (A) intervalo de confianza de las GDP observada y simulada; (B) Distribución de los pares de puntos de las GDP observada y simulada alrededor de la línea X=Y; intercepto=0 y pendiente=1.



**Figura 5.** Simulación de la ganancia de peso (kg día<sup>-1</sup>) en función de la energía y la proteína consumidas, usando como insumos los datos observados (registros del productor) de la ganancia diaria de peso en los tres últimos ciclos de engorde.



**Figura 6.** Ganancia de peso (GDP, kg/día) esperada en función del consumo de energía y proteína, para diferentes niveles de suplementación con melaza, expresados como por ciento del consumo potencial de materia seca del animal.

*Efecto de la interacción suplementación con melaza × carga animal sobre la ganancia de peso*

El análisis de varianza y la evaluación de los coeficientes del polinomio de segundo grado para la combinación de diferentes niveles de suplementación con melaza y carga animal y su efecto sobre la ganancia diaria de peso (GDP) mostraron que tanto los componentes lineal y cuadrático, como la interacción de efectos simples de esas variables, fueron significativos ( $P < 0.01$ ) y todos los coeficientes de la regresión fueron diferentes de cero ( $P < 0.01$ ).

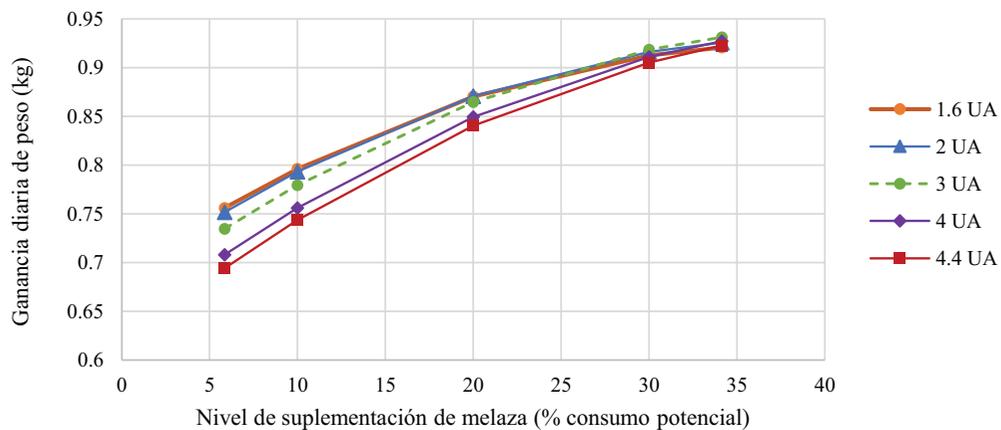
La superficie de respuesta de la GDP en función de la carga animal y nivel de melaza (Figura 7) se describe con la siguiente ecuación:

$$Y = 0.8648 - 0.01058 \times X_1 + 0.06955 \times X_2 - 0.00471 \times X_1^2 - 0.01597 \times X_2^2 + 0.008 \times X_1 \times X_2,$$

donde:

$X_1$  = carga animal (UA/ha),

$X_2$  = nivel de melaza suplementaria (% del consumo total potencial).



**Figura 7.** Ganancia diaria de peso (kg) en función de carga y nivel de suplementación con melaza.

El punto de inflexión para la respuesta animal en función de nivel de suplementación con melaza y carga animal se encontró para la combinación de  $X_1=3.922$  UA/ha y  $X_2=44.09\%$  de melaza, con una GDP de 0.944 kg/animal/día.

#### Efectos de los niveles de melaza y carga animal sobre la excreción de nitrógeno y emisión de $CH_4$

No se encontró diferencias ( $P>0.05$ ) entre los tratamientos para los estimados de excreción y retención del N dietético. En el Cuadro 3 se presentan los promedios de consumo de N y de excreción de N urinario, fecal, y total, por animal por día a lo largo del ciclo de engorde, para los diferentes niveles de inclusión de melaza en la dieta. También, se presentan los valores promedios de metano emitido por año, por kg de MS consumida y por kg de peso ganado en el periodo de engorde.

El análisis de varianza y la evaluación de los coeficientes del polinomio de segundo grado para la combinación de diferentes niveles de suplementación con melaza y carga animal sobre la emisión de  $CH_4$ , mostró que los componentes lineal y cuadrático fueron significativos ( $P<0.001$ ), y todos los coeficientes de regresión fueron diferentes de cero ( $P<0.01$ ).

La superficie de respuesta de la emisión de  $CH_4$  en función de la carga animal y nivel de melaza (Figura 8) se describe con la siguiente ecuación:

$$Y=63.57202-1.08838 \times X_1+7.15968 \times X_2+7.85579 \times X_1^2+7.88330 \times X_2^2+0.74 \times X_1 \times X_2,$$

donde:

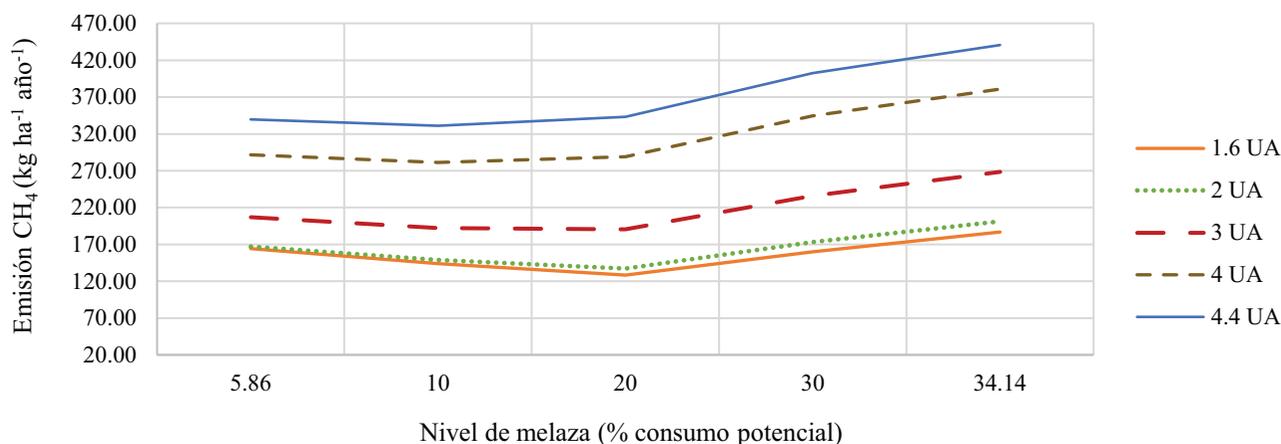
$X_1$ =carga animal (UA/ha),

$X_2$ =nivel de melaza suplementaria (% del consumo total potencial).

**Cuadro 3.** Valores promedio de todos los tratamientos de consumo de N y su partición en productos, en la orina y heces y emisión de  $CH_4$ .

Variable	T0	T10	T20	T30	T40	Promedio
Consumo de MS, g/kg PV	25.74	26.82	27.51	27.45	27.22	26.95 (0.33)
Consumo N, g/animal/día	126.08	136.03	143.52	145.97	146.69	139.66 (3.88)
N urinario, g/animal/día	47.72	48.98	50.02	50.74	51.26	49.74 (0.63)
N fecal, g/animal/día	48.86	52.71	55.62	56.56	56.84	54.12 (1.50)
N total excretado, g/animal/día	96.58	101.69	105.63	107.31	108.10	103.86 (2.13)
Retención de N, %	23.40	25.40	26.40	26.49	26.31	25.60 (0.58)
Emisión $CH_4$ , kg/año	64.71	77.53	80.55	86.57	93.04	80.48 (4.76)
Emisión $CH_4$ , g/kg MS consumida	24.33	25.27	26.60	28.11	30.06	26.87 (1.02)
Emisión $CH_4$ , kg/kg GP total	3.17	3.25	3.28	3.21	3.08	3.20 (0.03)

GP=Ganancia de peso durante el ciclo de 304 d. Todos los valores fueron estimados por el modelo Life-Sim. Valor en paréntesis corresponde al error estándar del promedio.



**Figura 8.** Emisión de  $CH_4$  en función de carga y nivel de suplementación con melaza.

El punto de inflexión (valor más bajo) para la emisión de CH<sub>4</sub> (kg/ha/año) ocurrió para la carga de 3.09 UA/ha y suplementación con melaza del 15.42% del consumo potencial de materia seca. Para esta combinación, la emisión de CH<sub>4</sub> fue de 61.88 kg/animal/año.

*Efecto de la fecha de compra y venta de animales para engorde*

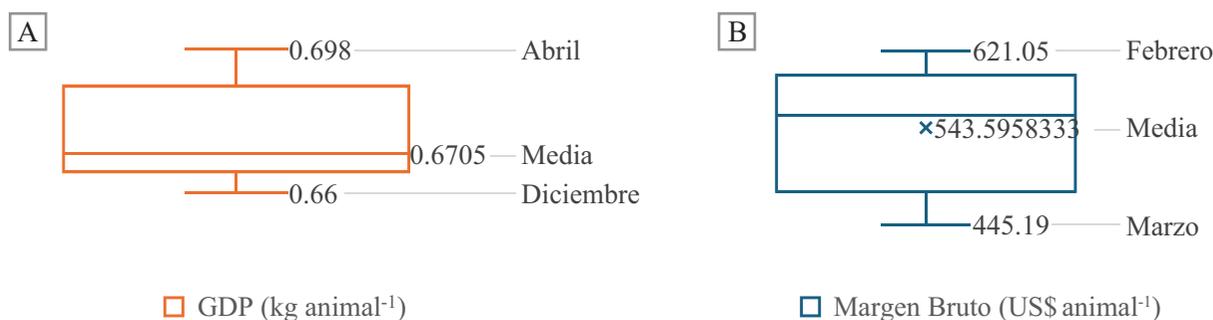
Cuando se consideró los costos y beneficios reportados para el año 2021, los mejores resultados en GDP se presentaron para el inicio del ciclo de engorde en abril (Figura 9A); sin embargo, las variaciones debidas al mes de inicio del engorde no fueron grandes, siendo la mayor diferencia entre diciembre y abril, pero esta alcanzó apenas un 5.4%. Pero, cuando se consideraron los precios de compra y venta de animales, el mejor margen bruto correspondió al inicio del engorde en febrero (Figura 9B), y los valores más bajos fueron para el mes de marzo. El análisis sobre los factores que inciden sobre el margen bruto mostró que, para los meses de noviembre a febrero, la variación positiva en los precios

explicó entre el 6 y el 20% de los beneficios; en cambio, para el resto de los meses, la variación de los precios osciló entre -2% y -8%.

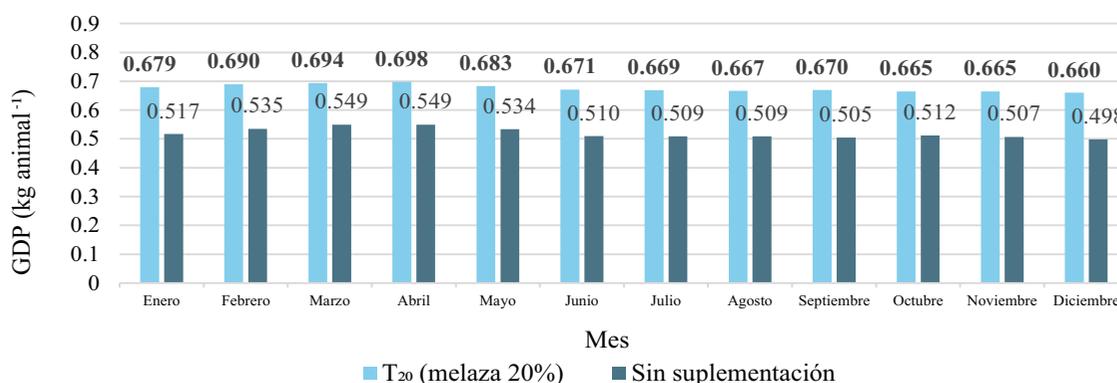
En lo que respecta a la GDP en función de mes de inicio de la fase de engorde en el 2021, con suplementación energética (Figura 10), se encontró que cuando se suplementó con melaza al 20% (T<sub>20</sub>) del consumo potencial se presentaron aumentos en la ganancia de peso del 27.1% en promedio, independientemente del mes de inicio.

Cuando se estimó el margen bruto para el manejo actual de la finca sin suplementación y con 20% de melaza (T<sub>20</sub>), se encontró que, independientemente de los meses de inicio y finalización del engorde, en todos los casos se redujo el margen bruto como consecuencia del uso de melaza como suplemento (Figura 11).

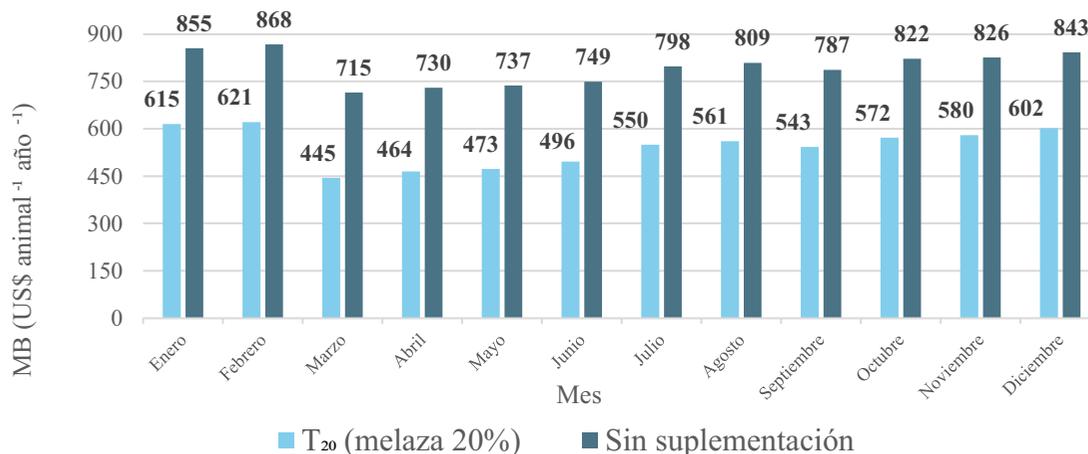
Los resultados del análisis beneficio-costos, considerando la variabilidad interanual de los precios de animales durante 10 años, mostraron que la relación beneficio-costos osciló entre 1.69-1.87, con una media general de 1.80 y un error estándar de ±0.07 (Figura 12), sin diferencias (P>0.05) debidas al mes en que se inició el proceso de engorde.



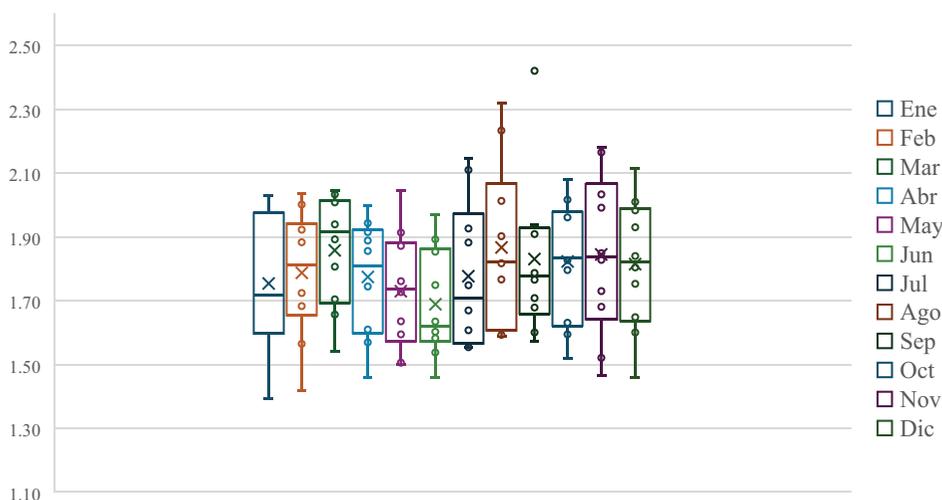
**Figura 9.** Efecto del mes en que se efectúa la compra y la venta de animales de engorde: (A) Ganancia diaria de peso (GDP, kg d<sup>-1</sup>) según el mes de inicio del ciclo de engorde para el 2021; (B) Margen Bruto (MB, US\$/animal/año) en función del mes de inicio del engorde.



**Figura 10.** Ganancia diaria de peso (GDP, kg animal<sup>-1</sup>) sin suplementación vs. melaza al 20% del consumo potencial (T<sub>20</sub>), en función del mes de inicio del ciclo de engorde.



**Figura 11.** Margen bruto (US\$/animal/año) en ausencia de suplementación (Línea base) vs. suplementación con melaza al 20% del consumo potencial ( $T_{20}$ ).



**Figura 12.** Análisis beneficio-costo para la actividad de engorde, iniciando en diferentes meses del año considerando los precios de animales al inicio y a la finalización del engorde, durante 10 años.

### Análisis financiero

En el Cuadro 4, se presentan los indicadores de análisis financiero para la situación real de la finca, con engorde que inicia en diciembre del 2021, y simulaciones para inicios del engorde en diciembre y febrero. Los resultados del análisis de la simulación iniciando el ciclo de engorde en diciembre no difieren de los obtenidos para la situación real (inicio en diciembre). En cambio, el inicio del engorde en febrero, resultó en la mejor eficiencia financiera respecto a cualquiera de los otros meses del año. El incremento relativo en los parámetros de eficiencia financiera cuando se comparó el inicio en febrero vs. diciembre fueron de \$10,727, 14% y 0.30 para el VAN, TIR y la relación B/C, respectivamente.

Aplicando el modelo de León-Velarde et al. (2006) para estimar el impacto de los precios, la GDP, así como sus interacciones, se obtuvo que el 20 y 17% de las diferencias entre marzo y febrero eran explicadas por los cambios en los precios de compra y venta de los animales, el 67 y 71% por la diferencia en GDP y el 14 y 12% restante por su interacción. En el resto de los meses, excepto noviembre y diciembre, el impacto de los precios de compra y venta y la interacción GDP x precio fueron negativos. Ello explicaría la disminución importante en el MB, aún en meses en que presentaron las mayores GDP. No obstante, cuando se incluye en el análisis la distribución de precios de 10 años, no se encontró diferencias ( $P > 0.05$ ) debidas al mes de inicio del engorde.

**Cuadro 6.** Resultados del análisis financiero en función del mes de inicio del engorde.

Análisis financiero	Situación real de finca (diciembre)	Simulado (diciembre)	Simulado (febrero)
Valor Actual Neto (VAN), US\$	19,324	19,787	30,050
Tasa Interna de Retorno (TIR), %	37	38	51
Relación beneficio/costo (B/C)	1.33	1.33	1.63

## Discusión

### *Ganancia diaria de peso (GDP)*

La ganancia diaria de peso (0.637 kg/animal/día) obtenida bajo las condiciones del estudio, superó a las observadas en diversos estudios que han evaluado sistemas silvopastoriles similares, las cuales variaron entre 0.369 y 0.500 kg/animal/día (Iglesias et al. 2006, 2017; Pérez et al. 2008). Estas diferencias se asocian con condiciones climáticas favorables (Figura 2) para el crecimiento del pasto que se presentan en el área de estudio durante todo el año, caracterizado por un déficit de presión de vapor mayor a 0.5 kilo Pascales, nivel que no limita la producción de biomasa (Ríos-Gutiérrez 2021). Además, la biomasa producida y la calidad de ésta a través del año, así como la persistencia de especies deseables en praderas que tiene más de 12 años de uso, son poco frecuentes en esta región. Estos resultados confirman que los SSP manejados adecuadamente, como es el caso de la finca donde se realizó este estudio, mejoran la productividad y rentabilidad con respecto a los sistemas típicos de engorde practicados en Costa Rica (Pezo et al. 2018).

A pesar de la complejidad de los factores que involucran los SSP (Fontoura Junior et al. 2007), estos han mostrado ventajas sobre los sistemas pastoriles tradicionales en términos de productividad de leche y carne (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez 2011; López et al. 2017; Russo 2015); así como un mayor potencial de sostenibilidad ambiental (Iglesias et al. 2017; Pezo 2017).

### *Capacidad predictiva de la ganancia de peso usando el Modelo Life-Sim*

Las predicciones de la ganancia de peso (GDPS) obtenidas usando el Modelo Life-Sim fueron similares a las observadas (GDPO) (Figura 4), con una diferencia en promedio de apenas 0.056 kg/día, lo cual representa un 9.3% de la ganancia diaria de peso. Además, el coeficiente de variación (CV) de la raíz del error cuadrático medio fue de 10.56%, el cual resultó menor al CV de los pesos

de los 25 animales engordados en la finca en el período 2019–2021, que fue del 20%. Todo esto evidencia la robustez del modelo Life-Sim para predecir ganancias de peso en animales de engorde manejados bajo pastoreo, como fue el caso de este estudio, pues no hubo evidencia que la simulación tendiera a sobre- o subestimar las GDP, ya que los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea  $x=y$ , con intercepto=0 y pendiente=1 (Figura 5).

Todas las métricas (MAE, RMSE, CVRMSE) estimadas corresponden a modelos con un alto nivel de predicción de los datos medidos. Los resultados obtenidos concuerdan con parámetros estándar utilizados en la literatura (Castellaro et al. 2007; Candelaria-Martínez et al. 2011; Fontoura Junior et al. 2007; Quiroz et al. 2017) y confirman que las métricas evaluadas (MAE y RMSE) son buenos descriptores para evaluar la robustez de los modelos de simulación (Willmott 1982).

En un estudio previo, Orden et al. (2004) aplicaron el mismo submodelo carne del modelo Life-Sim a tres diferentes sistemas de engorde de bovinos a base de forrajes practicados en Filipinas y encontraron un CV de 9.37%. Por otra parte, cuando Castellaro et al. (2007) utilizaron un modelo desarrollado en la versión 7.1 de Visual Basic Excel®, para simular la ganancia de peso de toretes Hereford en pastoreo, con pesos iniciales entre 169 y 192 kg/animal, obtuvieron valores ligeramente menores de CVRMSE (9.98 y 5.11%) al obtenido en este estudio. En contraste, Maquivar-Linfoot et al. (2006), en un estudio de simulación de ganancia de peso en bovinos manejados en el trópico húmedo de Costa Rica, utilizando el nivel 1 del modelo de simulación NRC, detectaron sub- y sobreestimación de las ganancias de peso, las cuales atribuyeron a la variabilidad en las condiciones presentes en el sistema estudiado por ellos.

### *Efecto de la suplementación energética*

Las simulaciones efectuadas con el modelo Life-Sim validado en este estudio, detectaron que bajo las condiciones de la finca donde se desarrolló el estudio, se presentaba un desbalance de energía vs. proteína a lo largo de todo el ciclo de engorde, pese a que las

pasturas estaban bien manejadas. Un comportamiento similar ha sido reportado por otros autores ([Sánchez 2007](#); [Lauric et al. 2021](#)).

Dada la disponibilidad y el costo de la melaza de caña en el área de estudio, se consideró que esta podría ser una buena opción como suplemento energético en este tipo de sistemas. Su inclusión a un nivel de 18.63% del consumo potencial fue capaz de proporcionar la energía necesaria para el mejor uso de la proteína aportada por el pasto; sin embargo, a pesar de las bondades biológicas detectadas, las condiciones de precio hicieron que el margen de utilidad con esta alternativa fuera menor que cuando no se ofreció suplemento (Figura 11). En cambio, cuando las condiciones de las pasturas fueron muy contrastantes debido a la época del año, Carrera et al. (1963) encontraron que en pasturas de pasto guinea (*Megathyrsus maximus*) con buena calidad durante la época de lluvias, no pagaba suplementar con 0.730 kg de melaza/animal/día; en cambio durante la época seca, se logró un aumento de hasta el 82% en la GDP en animales suplementados vs. no suplementados, y esa práctica fue económicamente rentable.

#### *Efecto de la carga animal y suplementación con melaza sobre ganancia de peso, emisiones de CH<sub>4</sub>, y eficiencia en el uso del nitrógeno*

La generación de superficies de respuesta producto del uso de un diseño Rotable de Composición Central, permite encontrar la mejor combinación de variables independientes (punto de inflexión) tanto en experimentos reales como de simulación ([Figueroa Preciado 2003](#); [León-Velarde y Quiroz 1999](#)). En este estudio, con el uso de ese diseño se encontró que el punto de inflexión para la GDP (0.769 kg/animal/día) se logró con una carga animal de 3.9 UA/ha y una suplementación de melaza equivalente al 44.09% del consumo potencial. En cambio, cuando se analizó la emisión de CH<sub>4</sub> a lo largo del ciclo de engorde de 304 días, el punto de inflexión (61.882 kg CH<sub>4</sub>/animal) se obtuvo con niveles más bajos de carga animal y de suplementación con melaza (3.1 UA/ha y 15.42%, respectivamente).

La GDP obtenida en el punto de inflexión entre las variables carga y suplementación con melaza fue muy superior a lo reportado en la literatura para varios ensayos de ganancia de peso en sistemas basados en el uso de pasturas tropicales ([Iglesias et al. 2006, 2017](#); [Pérez et al. 2008](#)) y un 20% superior a lo estimado para no suplementación y manejo con una carga animal de 3.0 UA/ha. La emisión promedio de metano para

un ciclo anual de engorde, en el punto de inflexión se redujo en solo un 2% respecto al valor obtenido (63.15±4.33 kg CH<sub>4</sub>/animal/año) bajo las condiciones del sistema practicado en la finca.

Los valores de metano entérico obtenidos en este estudio son mayores a los reportados por Meo Filho et al. (2022) 219 vs. 110 kg/ha/año, lo cual puede deberse a la mayor carga animal utilizada en la finca donde se efectuó este estudio (3.0 vs 1.8 UA/ha). La emisión anual de metano se encuentra dentro del rango de 32 y 83 kg/animal/año que ha sido reportado por DeRamus et al. (2003) para ganado de carne. La intensidad de emisión de 26.86±1.82 g CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida obtenida en este estudio (Cuadro 4), fue muy similar al valor reportado para bovinos de carne que no recibieron suplementación (26.04 g CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida) en el metaanálisis de datos de emisiones en sistemas de producción de carne a nivel global ([Cottle y Eckard 2018](#)) y a datos obtenidos en Costa Rica con ganado de carne alimentado con heno de *Digitaria decumbens* de buena calidad ([Montenegro et al. 2016](#)).

La intensidad de emisiones expresada como porciento del consumo de energía digestible y consumo de energía bruta fueron 12.1 y 7.8%, respectivamente (datos no mostrados). Estos resultados son similares a los reportados por Kennedy y Charmley (2012) y cercano al rango recomendado por Eggleston et al. (2006) para rumiantes consumiendo forrajes de bajo valor nutricional (5.5 a 7.5% del consumo de energía bruta). Berndt y Tomkins (2013) destacan la importancia de aumentar la eficiencia de la producción ganadera por medio de una mejor genética del ganado y calidad de los forrajes para reducir la proporción de energía perdida en forma de metano y, consecuentemente, disminuir la intensidad de emisiones. Además, al mismo tiempo se debe mejorar la productividad y rentabilidad del sistema de engorde.

El uso de diseños de superficie de respuesta en estudios de modelación, como parte del planeamiento de ensayos de campo, permite ahorrar tiempo, espacio y dinero en el proceso de investigación, al reducirse el número de tratamientos, sin perder la ortogonalidad de estos ([Carrera et al. 1963](#); [Soca et al. 2007](#)). Para propósitos de modelación, este diseño permite definir *ex ante* qué tratamientos evaluar en ensayos con animales, los cuales son costosos y de mayor complejidad en cuanto a su implementación ([León-Velarde et al. 2006](#); [Candelaria-Martínez et al. 2011](#)). Sin embargo, para lograr resultados más robustos de las modelaciones se requiere de información secundaria de calidad, lo cual fue evidenciado en el presente estudio.

Cuando se comparó el consumo diario de N, así como su excreción a través de orina y heces, con los resultados reportados por Beltrán et al. (2022) para ganado de carne en crecimiento criado en zonas templadas, se encontró que los valores de consumo obtenidos en este estudio fueron inferiores, pero los de retención de N fue similar a los valores obtenidos por ellos. En dicho estudio el consumo de N varió entre 173 y 328 g/día y la retención de N en ganado de carne fue de 23.84%. Esas diferencias en el consumo de N son esperadas, dado que las pasturas de zona templada utilizadas en dicho estudio regularmente presentan un mayor contenido de N que las tropicales (Van Soest 1994; Fulkerson et al. 2007), y además ellos suplementaron los animales con concentrados.

### *Cambios de precio en la compra y venta y su efecto en la rentabilidad*

El mes de inicio del engorde no afectó ( $P > 0.05$ ) el margen bruto cuando se consideraron las variaciones de precios en un periodo de 10 años. Este hallazgo no aplicaría para zonas tropicales donde hay una época seca marcada, pues bajo esas condiciones, hay mayor oferta de animales a inicios de la estación seca, cuando hay escasez de alimento, como una estrategia para reducir la carga animal en las fincas, lo que genera una baja en los precios (Grajales-Cedeño et al. 2021).

Por tanto, la respuesta a la pregunta ¿cuándo iniciar un ciclo de engorde? va a depender de las condiciones locales y la ciclicidad intra anual de los precios, pues va a ser muy diferente entre años y entre zonas, con o sin época seca definida. Además, esas variaciones se están haciendo cada vez más marcadas como consecuencia del cambio climático (Reyer et al. 2017). Esto significa que el uso de las estadísticas de precios de compra y venta de varios años constituyen un insumo clave para los procesos de simulación y así identificar los mejores meses de compra de ganado para optimizar las utilidades de la operación.

### **Conclusiones**

Life-Sim mostró ser una herramienta valiosa para la simulación de escenarios de alimentación debido a que posee una robusta capacidad de predicción de la respuesta animal en hatos manejados bajo pastoreo en un sistema silvopastoril, pues el error de estimación fue de apenas 10.56%, y el valor promedio del error absoluto (MAE) de todas las observaciones de 0.056 kg.

El uso de melaza como suplemento para compensar el exceso de proteína cruda respecto al valor energético en el forraje se traduce en incrementos en la ganancia de peso, pero no siempre esta práctica es económicamente rentable.

Los valores de intensidad de emisión de  $\text{CH}_4$  y de retención de N en el sistema estudiado son similares a los reportados en la literatura para otros sistemas basados en el uso de pasturas.

La relación beneficio-costos estimada a partir de los registros del productor y la simulada por el modelo Life-Sim para el 2021 fue favorable, con un valor de 1.33, donde el 71% era explicado por los cambios en ganancia de peso y el resto por los cambios de precio y por la interacción de este último con los cambios en el peso.

El uso de estadísticas de precios y venta de ganado con herramientas de simulación como Life-Sim son claves para identificar el periodo de engorde que optimiza los ingresos.

### **Referencias**

(Nota de los editores: Enlaces verificados el 15 de septiembre de 2024).

- Adesogan AT; Havelaar AH; McKune SL; Eilittä M; Dahl GE. 2020. Animal source foods: Sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? *Perspective Matters*. *Global Food Security* 25:100325. doi: [10.1016/j.gfs.2019.100325](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100325)
- Araiza E; Delgado E; Carrete FO; Medrano H; Solís A; Murillo M; Haubi Y. 2013. Degradabilidad ruminal in situ y digestibilidad in vitro de diferentes formulaciones de ensilados de maíz-manzana adicionados con melaza. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(2):79–96. [bit.ly/4eLAWGG](https://doi.org/10.1016/j.iaa.2013.05.001)
- Bacab-Pérez HM; Solorio-Sánchez FJ. 2011. Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13(3):271–278. [bit.ly/3TyVNF1](https://doi.org/10.1016/j.tsa.2011.05.001)
- Beltrán IE; Calvache I; Cofre R; Salazar F; Keim JP; Morales A; Pulido RG; Alfaro M. 2022. Nitrogen intake and its partition on urine, dung and products of dairy and beef cattle in Chile. *Agronomy* 12(1):15. doi: [10.3390/agronomy12010015](https://doi.org/10.3390/agronomy12010015)
- Berndt A; Tomkins N. 2013. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: a perspective from Australia and Brazil. *Animal* 7(2):363–372. doi: [10.1017/S1751731113000670](https://doi.org/10.1017/S1751731113000670)
- Blaxter KL, Clapperton JL. 1965. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition* 19(1):511–522. doi: [10.1079/BJN19650046](https://doi.org/10.1079/BJN19650046)

- Candelaria-Martínez B; Ruiz-Rosado O; Gallardo-López F; Pérez-Hernández P; Martínez-Becerra Á; Vargas-Villamil L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(3):999–1010. [bit.ly/3zafZ9y](https://doi.org/10.1016/j.3zafZ9y)
- Carrera C; Muñoz H; Solares L. 1963. Melaza de caña como suplemento en el engorde de bovinos en zacate guinea (*Panicum máximum*). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1(1):34–38. [bit.ly/4e7HeAB](https://doi.org/10.1016/j.4e7HeAB)
- Castellaro G; Klee G; Chavarría J. 2007. Un modelo de simulación de sistemas de engorda de bovinos a pastoreo. *Agricultura Técnica* 67(2):163–172. doi: [10.4067/s0365-28072007000200006](https://doi.org/10.4067/s0365-28072007000200006)
- Corfo (Corporación de Fomento Ganadero). 2022. Precio promedio de ventas de bovinos comercializados en las subastas ganaderas pertenecientes a la Federación de Subastas Ganaderas, 2007–2022. [bit.ly/3XsD8vU](https://doi.org/10.1016/j.3XsD8vU)
- Cottle DJ; Eckard RJ. 2018. Global beef cattle methane emissions: yield prediction by cluster and meta-analyses. *Animal Production Science* 58(12):2167–2177. doi: [10.1071/AN17832](https://doi.org/10.1071/AN17832)
- Cuadrado H; Torregroza L; Jiménez N. 2004. Comparación bajo pastoreo con bovinos machos de ceba de cuatro especies de gramíneas del género *Brachiaria*. *Revista MVZ Córdoba* 9(2):438–443. doi: [10.21897/rmvz.485](https://doi.org/10.21897/rmvz.485)
- DeRamus HA; Clement TC; Giampola DD; Dickison PC. 2003. Methane emissions of beef cattle on forages: efficiency of grazing management systems. *Journal of Environmental Quality* 32(1):269–77. doi: [10.2134/jeq2003.2690](https://doi.org/10.2134/jeq2003.2690)
- Díaz-Romeu R; Hunter A. 1978. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. [handle/11554/3115](https://hdl.handle.net/11554/3115)
- Eggleston HS; Buendía L; Miwa K; Ngara T; Tanabe K, eds. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol 4: Agriculture, forestry and other land use. Institute for Global Energy Strategies (IGES), Hayama, Japan. [bit.ly/3zuU0dh](https://doi.org/10.1016/j.3zuU0dh)
- Figuerola Preciado G. 2003. Optimización de una superficie de respuesta utilizando JMP IN. *Mosaicos Matemáticos* 11:17–23. [bit.ly/3zkMhP8](https://doi.org/10.1016/j.3zkMhP8)
- Fontoura Junior JAS da; Menezes LM; Corrêa MN; Dionello NJL. 2007. Utilização de modelos de simulação em sistemas de produção de bovinos de corte. *Veterinária e Zootecnia* 14(1):19–30. ISSN 0102-5716.
- Fulkerson WJ; Neal JS; Clark CF; Horadagoda A; Nandra KS; Barchia I. 2007. Nutritive value of forage species grown in the warm temperate climate of Australia for dairy cows: Grasses and legumes. *Livestock Science* 107(2–3):253–264. doi: [10.1016/j.livsci.2006.09.029](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.09.029)
- Gill M; Garnsworthy PC; Wilkinson JM. 2021. Review: More effective linkages between science and policy are needed to minimize the negative environmental impacts of livestock production. *Animal* 15(1):100291. doi: [10.1016/j.animal.2021.100291](https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100291)
- Grajales-Cedeño JK; Bethancourt-García JA; Corrales G; Sánchez-Galán EA; Vargas R; Quintero-Chanis ER; Gallardo J; Geider JC. 2021. Factores que intervienen en la variación del precio de comercialización de bovinos en subastas ganaderas de Panamá (2016–2020). *Zootecnia Tropical* 39:e5545844. doi: [10.5281/zenodo.5545844](https://doi.org/10.5281/zenodo.5545844)
- Greenwood PL. 2021. Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. *Animal* 15(1):100295. doi: [10.1016/j.animal.2021.100295](https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100295)
- Hawkes C; Harris J; Gillespie S. 2017. Chapter 4. Changing diets: Urbanization and the nutrition transition. En: 2017 Global Food Policy Report. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC, USA. p. 34–41. [hdl.handle.net/10568/146456](https://hdl.handle.net/10568/146456)
- Henchion M; Moloney AP; Hyland J; Zimmermann J; McCarthy S. 2021. Review: Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. *Animal* 15(1):100287. doi: [10.1016/j.animal.2021.100287](https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100287)
- Henchion M; Zimmermann J. 2021. Animal food products: Policy, market and social issues and their influence on demand and supply of meat. *Proceedings of the Nutrition Society* 80(2):252–263. doi: [10.1017/S0029665120007971](https://doi.org/10.1017/S0029665120007971)
- Holmann F; Rivas L; Argel P; Pérez E. 2004. Impact from the adoption of *Brachiaria* grasses: Central America and Mexico. *Livestock Research for Rural Development* 16(12):98. [bit.ly/3zkMHoG](https://doi.org/10.1016/j.3zkMHoG)
- Holmann F; Rivas L; Pérez E; Castro C; Schuetz P; Rodríguez J. 2008. The beef chain in Costa Rica: Identifying critical issues for promoting its modernization, efficiency and competitiveness. *Livestock Research for Rural Development* 20(4):51. [bit.ly/3BaKAEr](https://doi.org/10.1016/j.3BaKAEr)
- Iglesias JM; Simón L; Lamela L; Hernández D; Hernández I; Milera M; Castillo E; Sánchez T. 2006. Sistemas agroforestales en Cuba: algunos aspectos de la producción animal. *Pastos y Forrajes* 29(3):217–235. [bit.ly/3B5KVZa](https://doi.org/10.1016/j.3B5KVZa)

- Iglesias JM; Simón L; Martín GJ. 2017. Sistemas silvopastoriles en el contexto cubano. *Agroecología* 12(1):75–82. [bit.ly/3ZraeyG](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2017.07.001)
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). 2023. Encuesta Nacional Agropecuaria 2022. Resultados generales de la actividad ganadera vacuna y porcina. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), San José, Costa Rica. 49 p. [bit.ly/47wOeok](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2023.07.001)
- Kennedy PM; Charmley E. 2012. Methane yields from Brahman cattle fed tropical grasses and legumes. *Animal Production Science* 52(4):225–239. doi: [10.1071/AN11103](https://doi.org/10.1071/AN11103)
- Lauric A; Torres Carbonell C; De Leo G. 2021. Utilización de suplementación líquida (melaza) para el ganado bovino en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Relevamiento de casos reales. Informe Técnico. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina. [hdl.handle.net/20.500.12123/9780](https://hdl.handle.net/20.500.12123/9780)
- León-Velarde C; Quiroz RA. 1999. Selecting optimum ranges of technological alternatives by using response surface designs in systems analysis. En: *Impact on a changing world Program Report 1997–98*. International Potato Center (CIP), Lima, Perú. p. 387–393. [hdl.handle.net/10568/109460](https://hdl.handle.net/10568/109460)
- León-Velarde C; Quiroz RA; Cañas R; Osorio J; Guerrero J; Pezo D. 2006. LIFE - SIM: Livestock Feeding Strategies Simulation Models. Natural Resources Division Working Paper 2006-1. International Potato Center (CIP), Lima, Perú. 38 p.
- Lerma LM; Díaz Baca MF; Burkart S. 2022. Public policies for the development of a sustainable cattle sector in Colombia, Argentina, and Costa Rica: A comparative analysis (2010–2020). *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6:722522. doi: [10.3389/fsufs.2022.722522](https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.722522)
- López O; Sánchez T; Iglesias JM; Lamela L; Soca M; Arece J; Milera MC. 2017. Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes* 40(2):83–95. [bit.ly/3BgrPzg](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2017.07.001)
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2015. Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono en Costa Rica. San José, CR. SIDE, MINAE, DCC, UNEP DTU, FIRM. 120 p. [bit.ly/3BdQQLL](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2015.07.001)
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2022. Política de Ganadería Sostenible de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Programa Nacional de Ganadería. San José, Costa Rica. 94 p. [bit.ly/3XU4tYf](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2022.07.001)
- Maquivar-Linfoot MG; Galina-Hidalgo CS; Mendoza-Martínez GD; Verduzco-Gómez AR; Galindo-Badilla JR; Molina-Sanchez R; Estrada-Konig S. 2006. Predicción de la ganancia diaria de peso mediante el uso del modelo NRC en novillas suplementadas en el trópico húmedo de Costa Rica. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia* 16(6):634–641. [bit.ly/3ZsdASj](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2006.07.001)
- Meo Filho P; Berndt A; Pezzopane JRM; Pedroso AF; Bernardi ACC; Rodrigues PHM; Bueno ICS; Corte RR; Oliveira PPA. 2022. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest Biome?. *Agronomy* 12(11):2738. doi: [10.3390/agronomy12112738](https://doi.org/10.3390/agronomy12112738)
- Montenegro J; Barrantes E; DiLorenzo N. 2016. Methane emissions by beef cattle consuming hay of varying quality in the dry forest ecosystem of Costa Rica. *Livestock Science* 193:45–50. doi: [10.1016/j.livsci.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.09.008)
- Montgomery DC. 1984. Design and analysis of experiments. 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York, USA. 538 p.
- Orden EA; Pezo DA; Leon Velarde CU; Domingo SN; Villar EC. 2004. Predicting body weight changes of beef cattle in the lowland rain-fed areas of Umingan, Pangasinan: A simulation model. *Philippine Journal of Veterinary and Animal Sciences* 30(1):185–197. [bit.ly/47vzqps](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2004.09.001)
- Parlasca MC; Qaim M. 2022. Meat Consumption and Sustainability. *Annual Review of Resource Economics* 14:17–41. doi: [10.1146/annurev-resource-111820-032340](https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111820-032340)
- Pérez E; Holmann F; Schuetz P; Fajardo E. 2006. Evolución de la ganadería bovina en países de América Central: Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua. Documento de Trabajo No. 205. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) and International Livestock Research Institute (ILRI). Cali, Colombia. 46 p. [hdl.handle.net/10568/70051](https://hdl.handle.net/10568/70051)
- Pérez E; Soca M; Díaz L; Corzo M. 2008. Comportamiento etológico de bovinos en sistemas silvopastoriles en Chiapas, México. *Pastos y Forrajes* 31(2):171. [bit.ly/3XMUI8M](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2008.07.001)
- Pezo D. 2017. Tecnologías forrajeras para la intensificación sostenible de la ganadería en el contexto del cambio climático. *Revista UTN Informa* 78:18–25. [bit.ly/3XKcKyV](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2017.07.001)
- Pezo D; Ríos N; Ibrahim M; Gómez M. 2018. Silvopastoral Systems for intensifying cattle production and enhancing forest cover: The case of Costa Rica. Program on Forest. The World Bank, Washington, USA. 77 p. [bit.ly/3zycLwt](https://doi.org/10.1016/j.agsci.2018.07.001)
- Quiroz R; Loayza H; Barreda C; Gavilán C; Posadas A; Ramírez DA. 2017. Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy?. *European Journal of Agronomy* 82(A):104–112. doi: [10.1016/j.eja.2016.10.008](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.008)
- Rao I; Peters M; Castro A; Schultze-Kraft R; White D; Fisher M; Miles J; Lascano C; Blümmel M; Bungenstab D; Tapasco J; Hyman G; Bolliger A; Paul B; van der Hoek R; Maass B; Tiemann T; Cuchillo M; Douchamps S; Villanueva C; Rincón Á; Ayarza M; Rosenstock T; Subbarao G; Arango J; Cardoso JA; Worthington M; Chirinda N; Notenbaert A; Jenet A; Schmidt A; Vivas N; Lefroy R; Fahrney K; Guimaraes E; Tohme J; Cook S; Herrero M; Chacón M; Searchinger T; Rudel T. 2015. LivestockPlus—The sustainable intensification of forage-based agricultural systems to improve livelihoods and ecosystem services in the tropics. CIAT Publication No. 407. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 40 p. [hdl.handle.net/10568/68840](https://hdl.handle.net/10568/68840)

- Reyer CPO; Adams S; Albrecht T; Baarsch F; Boit A; Canales Trujillo N; Carlsburg M; Coumou D; Eden A; Fernandes E; Langerwisch F; Fanny Langerwisch; Marcus R; Mengel M; Mira-Salama D; Perette M; Pereznieta P; Rammig A; Reinhardt J; Robinson A; Rocha M; Sakschewski B; Schaeffer M; Schleussner CF; Serdeczny O; Thonicke K. 2017. Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change* 17:1601–1621. doi: [10.1007/s10113-015-0854-6](https://doi.org/10.1007/s10113-015-0854-6)
- Ríos-Gutiérrez LA. 2021. Evaluación del rendimiento y calidad de pastos mejorados en asocio con árboles dispersos de *Guazuma ulmifolia* en sistemas doble propósito, Los Santos, Panamá. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. [handle/11554/11544](https://hdl.handle.net/11554/11544)
- Russo RO. 2015. Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles. *Pastos y Forrajes* 38(2):157–161. [bit.ly/47t9TNU](https://bit.ly/47t9TNU)
- Sánchez J. 2007. Utilización eficiente de las pasturas tropicales en la alimentación de ganado lechero. En: Memorias del XI Seminario de Pastos y Forrajes en sistemas de producción animal, Barquisimeto, Venezuela, 12–14 de abril de 2007. p. 14–30. [bit.ly/4d9QdQB](https://bit.ly/4d9QdQB)
- Soca PM; Cabrera MR; Bruni MA. 2007. Nivel de suplementación, ganancia de peso vivo y conducta de vacunos en crecimiento bajo pastoreo de campo natural. *Agrociencia Uruguay* 11(1):1–10. doi: [10.31285/AGRO.11.763](https://doi.org/10.31285/AGRO.11.763)
- Tothill JC; Hargreaves JNG; Jones RM. 1978. Botanal- A comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. *Tropical Agronomy Technical Memorandum* 8:26.
- Van Soest PJ. 1994. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd Ed. Cornell University Press, Ithaca, NY. USA.
- Van Soest PJ; Robertson JB. 1980. Systems of analysis for evaluating fibrous feeds. En: Pigden WJ; Balch CC; Graham M, eds. Standardization of analytical methodology for feeds. Proceedings of a workshop held in Ottawa, Canada, 12–14 March 1979. International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, Canada. p. 49–60. [bit.ly/47rufY1](https://bit.ly/47rufY1)
- Villalobos L; Arce J. 2014. Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. Valor nutricional. *Agronomía Costarricense* 38(1):133–145. [bit.ly/4eo1Owk](https://bit.ly/4eo1Owk)
- Willmott CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63(11):1309–1313. doi: [10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Zepner L; Karrasch P; Wiemann F; Bernard L. 2020. ClimateCharts.net—an interactive climate analysis web platform. *International Journal of Digital Earth* 14(3):338–356. doi: [10.1080/17538947.2020.1829112](https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1829112)

(Recibido para publicación 9 noviembre 2023; aceptado 30 agosto 2024; publicado 30 de septiembre 2024)

© 2024



*Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* una revista de acceso abierto publicada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Este trabajo está bajo la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).