

Modelo de simulación dinámica desarrollado bajo criterios conceptuales asociados al control sostenible del pastoreo en sistemas ganaderos durante el levante y ceba

Dynamic simulation model developed under conceptual criteria associated with sustainable grazing control in livestock systems during rearing and fattening

Uzcátegui-Varela, Juan Pablo^{1,2}

¹Grupo de Investigación en Ciencia Animal y Plantas Tropicales. Universidad Nacional Experimental Sur del Lago “Jesús María Sempurn” (UNESUR) Núcleo La Victoria, Mérida estado Mérida, 5142, Venezuela. ²Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
uzcateguij@unesur.edu.ve

Resumen

Los sistemas con rumiantes a pastoreo son complejos y difíciles de gestionar, ante esta realidad, mejorar los indicadores de sostenibilidad requiere un enfoque sistémico basado en las interacciones animal-entorno que regulen el consumo y la oferta forrajera; al respecto, la simulación dinámica se considera una herramienta que permite comprender el intercambio de información entre los componentes del sistema y el producto. Debido al creciente interés por establecer sistemas ganaderos biológicamente eficientes, se propone un modelo de simulación desarrollado bajo criterios teóricos asociados al control sostenible del pastoreo en ganadería vacuna durante el levante y ceba en la zona sur del Lago de Maracaibo, Venezuela; para ello, se realizó una revisión sistematizada de literatura que permitió seleccionar las variables que definen la dinámica del pastoreo, cuyas interacciones fueron graficadas a través del software Vensim® DSS Professional versión 9.1.1. Para evaluar la viabilidad teórica del modelo, se plantearon seis posibles escenarios a nivel de predio para los cuales, se definió biomasa vegetal y biomasa animal como variables de nivel, las cuales correspondieron a los kilogramos de materia verde que genera la pastura y el peso del componente animal respectivamente, estos parámetros permitieron determinar el tiempo que los animales deben permanecer en el potrero antes de agotarse el pasto. El análisis de sensibilidad reveló que el área del potrero es el punto crítico para la planificación sostenible del pastoreo; asimismo, la dinámica simulada muestra que, cuando la carga animal es baja, las ganancias diarias de peso por animal son favorables, pero con baja productividad; por su parte, un incremento de la carga animal, condiciona la ganancia de peso y con ello, el potencial biológico del rebaño; en consecuencia, es necesario garantizar un equilibrio entre la oferta forrajera y la necesidad de consumo para alcanzar la mayor eficiencia, en este caso, kilogramos de carne/animal/hectárea/año.

Palabras clave: Agroecosistema, consumo de forraje, eficiencia biológica, ganadería sostenible, pasturas tropicales.

Abstract

Ruminant grazing systems are complex and difficult to manage, in view of this reality, improving sustainability indicators requires a systemic approach based on animal-environment interactions that regulate consumption and forage supply; in this regard, dynamic simulation is considered a tool that allows understanding the exchange of information between system components and the product. Due to the growing interest in establishing biologically efficient livestock systems, we propose a simulation model developed under theoretical criteria associated with the sustainable control of cattle grazing during rearing and fattening in the southern area of Lake Maracaibo, Venezuela; for this purpose, a systematized literature review was carried out to select the variables that define the grazing dynamics, whose interactions were plotted using Vensim® DSS Professional version 9.1.1 software. To evaluate the theoretical feasibility of the model, six possible scenarios were proposed at the farm level, for which plant biomass and animal biomass were defined as level variables, which corresponded to the kilograms of green matter generated by the pasture and the weight of the animal component, respectively; these parameters

made it possible to determine the time the animals should remain in the pasture before the grass was exhausted. The sensitivity analysis revealed that the paddock area is the critical point for sustainable grazing planning; likewise, the simulated dynamics show that, when the stocking rate is low, daily weight gains per animal are favorable, but with low productivity; on the other hand, an increase in stocking rate conditions weight gain and with it, the biological potential of the herd; consequently, it is necessary to guarantee a balance between forage supply and the need for consumption to achieve the highest efficiency, in this case, kilograms of meat/animal/hectare/year.

Keywords: Agroecosystem, forage consumption, biological efficiency, sustainable livestock, tropical pastures.

1. Introducción

Los sistemas de producción animal se consideran un importante componente económico para el desarrollo agroalimentario en América Latina, una región que, aunque históricamente ha sido víctima de profundas crisis financieras y el 46% del producto interno bruto depende de la ganadería, también posee el potencial natural para maximizar los indicadores de eficiencia biológica en sus rebaños, pero, alcanzar este objetivo no es fácil, se requiere implementar una profunda transformación en el patrón de manejo zootécnico tradicional, mediante planes control que contribuyan a una transición gradual del sistema hacia el enfoque agroecosistema sostenible (Durán y col. 2023).

Baltenweck y col. (2020) comentan que, si bien la ganadería contribuye a mejorar la calidad de vida en las comunidades más vulnerables, su impacto negativo a la salud pública y al ambiente, demanda la consolidación de sistemas ganaderos resilientes al cambio climático, una realidad determinante para granjas ganaderas que buscan consolidar los objetivos inmediatos de sostenibilidad. Según reportes técnicos expuestos por Kristiansen y col. (2021) y Cheng y col. (2022) la ganadería vacuna genera unas 7,1 Gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente ($GtCO_2eq$), que representan 14,5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el ganado (carne de res y leche) responsable de dos tercios del total, esto en gran parte debido a las emisiones de metano (CH_4), un gas generado por la fermentación ruminal; sin embargo, para Twine (2021) y Reavis y col. (2022) en la actualidad se discuten aportes científicos fundamentados en cifras oficiales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), pero hallazgos en campo revelan que las mismas, no están actualizadas, pues un análisis exhaustivo reciente desde la propia FAO sobre emisiones contaminantes de los sistemas ganaderos, concluyen que el valor porcentual debe ajustarse a 16,5%, mientras la actividad energética, manufacturera y transporte concentran el 70% del total de GEI, la agricultura 7,5% y los hogares 6%, lo cual sugiere un cambio del dinamismo económico mundial en pro de conservar los servicios ecosistémicos que garantizan la vida en el planeta.

La producción bovina en Latinoamérica es mayormente doble propósito (DP), es decir, unidades pecuarias que producen importantes volúmenes de leche y carne a bajo costo simultáneamente, empleando la práctica del pastoreo como

base del manejo nutricional para alimentar a los animales e incrementar su productividad (leche o carne por unidad de superficie y/o por animal), aunque la eficiencia se considera menor al compararse con fincas especializadas. Este sistema DP se caracteriza por ser sencillo, estable, flexible y de liquidez diaria, permitiéndole a los productores reportar interesantes índices de sostenibilidad aún frente a las constantes variaciones agroecológicas y socioeconómicas propias del trópico (González-Quintero y col. 2020).

El consumo y producción global de carne viene aumentando constantemente desde 1960. El reporte de producción cárnica proveniente de países subdesarrollados se triplicó entre 1980 y 2002 de 45,6 a 134 millones de toneladas y en 2018, la producción se ubicó en 340 millones de toneladas, por tanto, la demanda de proteína bovina (carne) continúa aumentando a nivel mundial (Smith y col. 2018).

En los últimos años, ha habido un cambio sostenido y sustancial en las dietas humanas hacia el consumo de alimentos derivados del ganado; por esta razón, algunos sistemas ganaderos han optado por mejorar la calidad de sus pasturas para secuestrar carbono y, por lo tanto, reducir las emisiones de los GEI que contribuyen al calentamiento global, pues la producción ganadera ofrece un importante escenario para minimizar el impacto negativo al ambiente mediante estrategias eficaces que pueden reducir estas emisiones hasta en un 30%, mientras se aporta proteína a una población en crecimiento (Varijakshapanicker y col. 2019).

Es importante destacar que la eficiencia de transformación de energía en los rumiantes es muy baja, por tanto, la seguridad alimentaria puede promoverse de manera efectiva solo si los principales alimentos que se les dan a los rumiantes (como las gramíneas forrajeras y las leguminosas) no compiten con los alimentos humanos, lo cual sugiere que la ganadería de carne, es un interesante rubro alimentario de investigación como punto de partida práctica en el análisis de sistemas ganaderos sostenibles (Moorby y Fraser, 2021).

En Latinoamérica, la ganadería bovina se desarrolla sobre la base del pastoreo de hierbas nativas e introducidas como principal y más económica fuente de alimentación para los rebaños, siendo las especies *Cynodon nlemfuensis*, *Urochloa arrechae*, *U. humidicola*, *U. brizantha*, *U. decumbens*, *Megathyrsus maximus* y *Echinochloa polystachya* las más empleadas entre los productores. Es a partir del consumo

de materia seca contenida en estas plantas, que los bovinos convierten fibras nutricionalmente pobres en productos alimentarios (eficiencia de pienso) que hoy aportan el 13% de energía a la dieta mundial (Jack y col. 2021; Flores-Coello y col. 2023).

La producción de carne en Venezuela se lleva a cabo sobre los principios del pastoreo extensivo (baja productividad) en los llanos y, doble propósito en la cuenca y sur del Lago de Maracaibo, con un componente animal de características raciales indefinidas (*Bos taurus* x *Bos indicus*) que aportan la mayor cantidad de leche y carne al país caribeño. Entre los caracteres productivos de la ganadería bovina de carne venezolana, destacan las tasas de crecimiento, reproducción y sobrevivencia, los cuales dependen de la influencia de factores genéticos y no genéticos que deben ser monitoreados para garantizar el éxito en el sistema de producción (Verde y col. 2007; Segovia-López y Jeréz-Timaure, 2008).

Galina y Geffroy (2023), recuerdan que la ganadería DP es la actividad agropecuaria más efectiva para comercializar leche y carne en proporciones satisfactorias frente al actual interés de muchos consumidores por acceder a alimentos sanos que no provengan de predios intensivos donde las prácticas de manejo resultan condicionan el bienestar animal y su entorno. La ganadería DP que se desarrolla bajo criterios de control para planificar el pastoreo, ha sido asociada con indicadores de sostenibilidad ecológica por reportar el incremento paulatino de la fertilidad del suelo, mejorando así, el rendimiento de materia verde (MV) y la productividad animal sin causar un impacto negativo e irreversible sobre el ecosistema ya intervenido, una premisa que fue confirmada por Baldini y col. (2020); sin embargo Torres Jara de García y col. (2023) aseguran que a pesar de las bondades descritas, el sistema registra baja productividad y poco uso de herramientas tecnológicas que limita su eficiencia.

En este sentido, el enfoque de sistemas en la ganadería brinda interesantes oportunidades para predecir y modular los rasgos dinámicos del rebaño, por ello, Queenan y col. (2020) explican que los sistemas biológicos están estructurados por subsistemas altamente complejos en sus diferentes niveles de abstracción (desde moléculas a ecosistemas), cada uno dependiente de los demás, cuyo objetivo principal es potencializar la productividad funcional del sistema total, aun así, se restringe la comprensión de su realidad, una razón que dificulta identificar los fundamentos conceptuales de sostenibilidad en la granja.

Los sistemas bovinos basados en la utilización de pasturas, se caracterizan por presentar variación en la calidad del forraje cosechado según la época del año y el manejo que recibe, lo cual restringe disponibilidad y calidad del material vegetal durante el pastoreo (Greenwood, 2021). A pesar de ello Terry y col. (2021) advierten que la vinculación de estrategias aplicadas al pastoreo con una producción más efi-

ciente de carne, son necesarias ante el ascenso del interés social por incrementar la sostenibilidad en el agroecosistema.

Los agroecosistemas son comunidades de microorganismos, plantas y animales que interactúan entre sí para producir una unidad estable, su origen y estructura son el resultado de la intervención (arado, deforestación) del entorno natural por parte del hombre para obtener principalmente alimentos (Liu y col. 2023). Se estima que los humedales ocupan solo entre el 6% y 9% del paisaje en todo el mundo, pero hacen un importante aporte de servicios a la sociedad humana, especialmente al integrarse con agroecosistemas, tal y como ocurre con las pasturas, proporcionando refugios vitales para muchas especies que dinamizan cada ecorregión. Por otra parte, los humedales participan en el secuestro de nutrientes como medio de regulación ecológica, ejercen protección contra inundaciones y purifican el agua y aire, de esta manera se favorece también, la capacidad para producir forraje de calidad para el ganado, en otras palabras, las pasturas, un agroecosistema muy común en el trópico americano, dominando por gramíneas y otras herbáceas destinadas a la producción de forraje para el consumo animal, puede acoger prácticas de gestión para la conservación como un sistema diversificado fundamental para alcanzar una intensificación ecológica de la producción animal (Sonnier y col. 2020; Macedo y col. 2021).

El trabajo documental llevado por Kleppel y Frank (2022), sugieren que la cría de vacunos a pastoreo, es la forma más económica para alimentar a estos grandes rumiantes y genera interacciones entre variables propias del agroecosistema, las cuales debidamente controladas podrían reducir el costo de los insumos y minimizar el tiempo para que retorne la inversión. En función de ello, Garzón y col. (2023) comentan que la gestión eficaz de las pasturas contribuye a mitigar el cambio climático, ya que la intensificación del sistema conduce a un equilibrio favorable entre las emisiones contaminantes y el secuestro de carbono.

El establecimiento de pasturas para la ganadería DP desde 1940 en las zonas rurales de Venezuela, ocasionó la intervención desmedida del ecosistema mediante disturbios antrópicos como deforestación y mecanización agrícola sin precaución, lo cual trajo como consecuencia la reducción de fertilidad en los suelos y el descenso en la calidad del pasto ofrecido en los potreros; por otro lado, el inadecuado manejo de la carga animal y la selección de especies forrajeras que se adapten a la zona, han limitado significativamente la productividad ganadera a través del tiempo (Faría-Mármol y González, 2008); tal y como ocurrió al sur del Lago de Maracaibo, una de las regiones que aportan más productos de origen animal al país, constituida originalmente por una imponente selva húmeda tropical (SHT) y humedales con distintas condiciones de fertilidad edáfica (Ureña y col. 1997).

La ruta productiva que lleva la ganadería de carne, inicia con una fase de crianza que va desde el nacimiento del becerro, hasta que éste alcanza un peso vivo (PV) entre 120 y 190 kg. en un periodo aproximado de siete meses cuando el ocurre el destete, reclasificándose el grupo etario de becerro lactante a maute; seguidamente, arranca la etapa conocida como “levante” con una duración de 12 meses aproximadamente, cuando el animal alcanza un peso entre 300 y 350 kg.; finalmente, la ceba o engorde abarca otro periodo de 12 meses, tiempo que requiere el animal para acumular 450 kg. de PV o más, considerándose apto para su comercialización (Es-lava-Zapata y Morillo-Moreno, 2005).

La interacción pastura-animal, forma un sistema de producción que por razón ecosistémica mantienen un equilibrio más o menos inestable debido a la intervención del factor humano a través del manejo, las especies forrajeras destinadas al pastoreo y en especial, el tipo de ganado que sobre ellas pastan. La administración del agroecosistema pasturas debe regularizar los indicadores de las dimensiones del desarrollo sostenible (económico, social, ecológico) para satisfacer las necesidades del mercado moderno, el cual demanda mayor productividad en medio del criterio práctico de sostenibilidad (Carreira y col. 2023).

Cardoso y col. (2020) explican que para alcanzar los estándares de sostenibilidad en ganadería bovina, se debe optimizar el uso de las pasturas y reducir la dependencia de alimento concentrado; sin embargo, Jayasinghe y col. (2022) afirman que las gramíneas del trópico utilizadas para pastoreo son fotosintéticamente más eficientes, es decir, poseen mayor tasa de crecimiento y producción de materia seca con respecto a las gramíneas de clima templado, por esta razón las zonas agroecológicas con mayor precipitación como la selva húmeda tropical, reportan alta biomasa forrajera para pastoreo, la cual, bien manejada, permite garantizar un adecuado rendimiento animal durante el año.

Para Londoño-Franco y Álvarez-Molina (2011) el pastoreo se refiere al consumo de biomasa vegetal realizado por el animal directamente sobre la superficie delimitada (potrero) para tal fin. A nivel práctico, el sistema de pastoreo es una importante herramienta de manejo para los sistemas DP, puesto que permite ejercer control sobre la utilización del recurso pastura; para ello se dispone de dos sistemas: *pastoreo continuo*, el cual consiste en mantener el rebaño de animales en el mismo potrero por largos periodos de tiempo, generándose algunos inconvenientes ecológicos como la constante defoliación, el crecimiento de arvenses, dificultad de la planta para renovarse y el excesivo pisoteo que acelera la degradación de las pasturas. Por su parte el *pastoreo rotacional*, consiste en utilizar varios potreros de área similar por tiempos iguales de ocupación, dejando un periodo de descanso para la recuperación de la zona pastoreada, permitiendo así, aprovechar la oferta de fitomasa por reducir el pisoteo y contaminación del pasto por las deyecciones de los animales.

La importancia de determinar la ingesta aproximada de forraje en un grupo de animales resulta clave para determinar su eficiencia biológica debido a que los herbívoros varían de tamaño y estado fisiológico con requerimientos nutricionales e ingesta diaria de forraje muy específicos, dejando claro que, la relación entre el tamaño del animal, así como su capacidad para consumir forraje, fijan el grado de sustentabilidad en las pasturas (Da Silva y col. 2013). Santos y col. (2017) compar-tieron un cálculo para determinar el número de animales que van a pastorear un área, le llamaron *presión de pastoreo* (PP), la cual se refiere a los kilogramos de PV por kilogramo de materia seca (MS) disponible por día.

Para Chacón-Rivas (2013), otro de los conceptos importantes para comprender la dinámica entre la oferta forrajera y el consumo de MV y MS es la *carga animal* (CA), un valor que establece la relación entre las unidades animales (UA) y la superficie de pastoreo (ha), es decir, $CA = UA/ha$; donde el valor de la UA se ubica (ganadería mestiza) en 400-450 kg de PV o una vaca; al respecto, Scarnecchia (1985) recomienda hacer los ajustes porcentuales a partir del valor asumido de la UA para los grupos etarios restantes, en otras palabras, si una UA equivale a 400 kg., un animal con PV igual a 200 kg. equivaldría al 50% del valor de la UA.

La relación entre CA y ganancia de peso/animal es lineal: $Y_a = a - bx$, donde: Y_a = ganancia de peso/animal, a = intercepto (constante), b = pendiente (constante), y x = CA. Como consecuencia, la relación entre ganancia/ha. y CA es cuadrática: $Y_h = ax - bx^2$; en tal sentido la CA que sugiere mayores ganancias de peso/ha puede definirse a partir de la ecuación: $x = a/2b$, mientras que cuando la ganancia/animal se hace cero, la carga animal alcanza el doble de aquella (CA no óptima), correspondiente a la máxima ganancia/ha (Chacón-Rivas, 2013), en concreto, mientras hayan menos animales o el valor de la CA esté ajustado al área de pastoreo y la especie vegetal utilizada, habrá mejor utilización del forraje sin afectar el estado metabólico, energético y proteico de los bovinos con el menor impacto ecológico sobre el agroecosistema (Ruiz-Albarrán y col. 2016).

En los últimos años, la mayoría de investigadores del área agronómica coinciden en resaltar las debilidades en el sub-sistema pasturas, específicamente todo lo referido al manejo de potreros y la utilización del recurso vegetal, lo cual afecta negativamente los indicadores productivos en las fincas, además, el manejo adecuado del pasto requiere la comprensión de eventos biológicos en la actividad ganadera entre los sub-sistemas, pues el pastoreo de ganado es el factor más importante que configura y estabiliza la biodiversidad del agroecosistema (Wróbel y col. 2023). Las comparaciones prácticas de posibles escenarios y su respuesta durante el pastoreo son difíciles de realizar debido a la variabilidad natural de las unidades experimentales; para ello, la simulación dinámica surge como una estrategia técnica que permite evaluar y controlar los efectos que ejercen los planes de pastoreo sobre la conservación de pasturas a futuro.

Bajo este enfoque sistémico, es posible describir la variación a través del tiempo de las entidades del sistema y sus interacciones, permitiendo una mejor comprensión del intercambio de información entre los componentes del sistema y una representación gráfica-funcional mediante paquetes informáticos que generan modelos dinámicos de simulación (Bahamonde y col. 2014).

Tomando en cuenta que una estrategia es definida por Cros y col. (2004) como un plan de ruta en la ejecución de tareas técnicas previstas durante un período de evaluación; el modelado permite evaluar el posible impacto de las decisiones sin ejecutarlo en el mundo real, siempre orientado hacia un objetivo que permita estructurar los entes que conforman el sistema. Para ello Rice y col. (1983) comentan que los principios para crear los componentes que estructuran un modelo de simulación capaz de recrear el pastoreo de ganado vacuno, se fundamentan principalmente sobre tres propósitos: a) predecir la productividad del sistema; b) evaluar los efectos del manejo experimentado; y c) transferir los resultados de la investigación a otros agroecosistemas de la zona.

Aunque no se acostumbra con regularidad el uso de modelos dinámicos en la ganadería, trabajos presentados por Cros y col. (2004); Castellaro y col. (2007); Cunha y col. (2010); Rotz y col. (2013); Negassa y col. (2015); Smith (2022) y Aherin y col. (2023) permiten concluir que todas las soluciones para la problemática de improductividad en la ganadería de carne vacuna, deben basarse en sólidos conocimientos científicos como el modelado y la simulación, una práctica moderna que permite representar las complejas interrelaciones entre el animal y el consumo de pasto, haciendo posible identificar los puntos de optimización para el mínimo costo y máximo beneficio en medio de un mundo globalizado que dirige sus intereses en el negocio pecuario para controlar las emisiones de gas metano, aumentar la productividad, sostenibilidad y bienestar animal en la cadena productiva.

El objetivo del trabajo fue proponer un modelo de simulación que explique la dinámica básica del pastoreo en condiciones del trópico venezolano y las características biológicas del componente animal, utilizando valores para el rendimiento de la fitomasa e ingesta sugeridos por la literatura, tomando como referencia la eco-región del sur del Lago de Maracaibo-Venezuela y el patrón ganadero (grupos etarios y peso vivo) de levante y ceba que tradicionalmente se emplea en la zona. De esta manera, el productor podrá predecir los días máximos que su rebaño puede permanecer en un área determinada sin agotar el recurso forrajero y garantizando la ganancia de peso en los animales.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del modelo

Isea (2008) afirma que las unidades de producción bovina en Venezuela, específicamente las dedicadas a surtir el mercado cárnico, poseen diferentes modalidades de operatividad; sin embargo, la mayoría de productores centran sus

prácticas zootécnicas bajo el patrón de manejo vaca-becerro, es decir, las vacas son ordeñadas en su mayoría y los becerros al culminar el periodo de lactancia son adquiridos por otros ganaderos, los cuales se concentran en la cría (levante) de estos animales a partir del destete (120 kg PV) hasta alcanzar 350 kg de PV con el propósito que otro productor culmine el ciclo productivo (>480 kg PV), aunque la mayoría de ganaderos cumplen con el levante y ceba de sus animales mediante la fijación de metas realistas para asegurar la productividad sostenible a través del tiempo en su unidad económica.

Estos sistemas de producción desarrollan sus actividades bajo escenarios complejos que requieren analizar los diferentes componentes que lo integran, sus relaciones y racionalidad con la que se manejan los recursos disponibles, a fin de lograr un conocimiento integral de la dinámica (Calvano y col. 2022). En la Fig. 1 se ilustra la estructura básica de un sistema aplicado a la producción de ganado vacuno durante el levante y ceba.

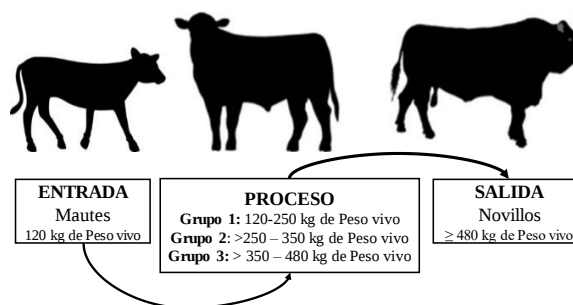


Fig. 1. Esquema del sistema de producción levante y ceba de ganado vacuno.

El modelo conceptual describe la representación lógico-matemática de la realidad que se quiere modelizar, por tanto, reconocer el marco teórico del sistema productivo resulta fundamental para dar inicio a la planificación de actividades inherentes al manejo del predio; al respecto, Peña y Materán (2005), afirman que la planificación es un proceso organizador capaz de pronosticar los posibles eventos asociados a los recursos productivos que ofrecen o demandan las pasturas, el rebaño e incluso la infraestructura.

En este sentido, Insua y col. (2019) explican que el monitoreo sistemático de la cantidad y calidad de los pastos es importante para garantizar una oferta de forraje nutricionalmente adecuada; de manera que, controlar la dinámica del pastoreo es una forma práctica de programar rotaciones y asignar el potrero más adecuado para pastorear, según la necesidad de consumo que se necesita para maximizar la rentabilidad que hoy promueve la ganadería sostenible con el fin de mejorar los parámetros de bienestar animal, liquidez económica, biodiversidad y calidad del producto.

En la Fig. 2 se presenta un diagrama que expone la dinámica conceptual de animales en pastoreo. Este modelo compila los componentes hallados en la mayoría de modelos de simulación dinámica referidos al pastoreo publicados en la literatura especializada, aunque simplificado, evidencia la manera en que los herbívoros interactúan con el ambiente para obtener nutrientes y cómo estos son metabolizados.

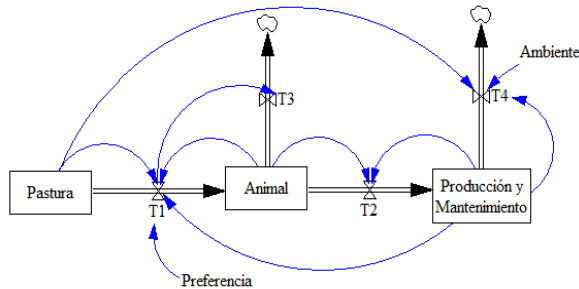


Fig. 2. Modelo de Forrester para simular el pastoreo según Walker, (1993).

En función de lo expuesto, se propone desarrollar un modelo de simulación dinámica cuyo propósito es facilitar la toma de decisiones con respecto al manejo básico de las pasturas en unidades de producción dedicadas al levante y ceba de vacunos mestizos (*Bos taurus* x *Bos indicus*) a pastoreo en el sur del Lago de Maracaibo, Venezuela para lo cual se identificaron las variables clave que definen la dinámica de este evento productivo. De igual forma se graficaron las principales interacciones entre los compartimientos que definen la actividad del pastoreo rotacional, donde la complejidad del sistema se resume en una función que involucra la interacción de los factores que controlan las tasas de transferencia entre compartimientos y fuentes o sumideros. Para llevar a cabo la simulación, se utilizó el software Vensim® DSS Professional versión 9.1.1, utilizando datos obtenidos por investigadores del área en experiencias previas.

2.2. Supuestos del modelo

El modelado matemático de las propiedades dinámicas de los sistemas biológicos se considera una forma muy eficaz de ilustrar la comprensión de los procesos biológicos y resaltar los aspectos más importantes de ellos, es decir, el uso cuidadoso de las suposiciones simplificadas resulta crucial para que los modelos biológicos sean comprensibles, ajustables y al mismo tiempo, representativos de la dinámica central del sistema. La presente propuesta no desarrolla la simulación de los componentes humano, ecofisiológico vegetal, fisiológico animal y edáfico, se limita al modelo físico-biológico del pastoreo.

El modelo dinámico desarrollado se centró en la utilización de pasturas como base alimentaria del ganado; se trata de un modelo que opera de manera determinista con un paso de tiempo diario (ajustable para mayor precisión) capaz de hacer frente a una variación cotidiana sobre la disponibilidad del pasto, superficie a pastorear, peso promedio de los ani-

males, oferta máxima de materia verde y época (lluvia o sequía); en cuanto a esto, Resat y col. (2011) señalan que el carácter multiescala de las dinámicas naturales y la estocasticidad de los procesos biológicos aún presentan desafíos operativos y conceptuales, es por ello que los investigadores del área, recomiendan su aplicabilidad *in situ*, solo así, en este caso, es posible conocer con mayor precisión el tiempo ideal de permanencia en el potrero que se seleccione. La construcción del modelo se basó en simular los resultados productivos de una explotación semi-intensiva bajo pastoreo rotativo, consumo teórico diario en potrero, porcentaje de pérdida por excretas y pisoteo, la tasa de crecimiento de la pastura y otras variables biológicas de interés para la dinámica pastoril. Se consideró un predio con ganado vacuno mestizo sano, sin amenaza de predadores ni mortalidad durante el ciclo productivo por ser una propuesta en evaluación.

Los productores adquieren mautes de 120 kg PV promedio, con una ganancia de peso diaria teórica estimada en 0,6 kg/animal/día y 480 kg de PV para el sacrificio tal y como consta en la revisión expuesta por Costa y col. (2021); por otra parte, la altura del pasto en que los animales mantienen peso varía según la oferta de MV, se tomó como patrón referencial una altura promedio de 20 centímetros (cm) para el ingreso de los animales a los potreros, siguiendo las recomendaciones prácticas de Gomes-Rodrigues y col. (2021) y Marín y col. (2022). Por su parte Jones y col. (2017) comentan que simular sistemas pecuarios resulta complejo al momento de representar las funciones biológicas y sus interacciones en el modelo (Fig. 3).

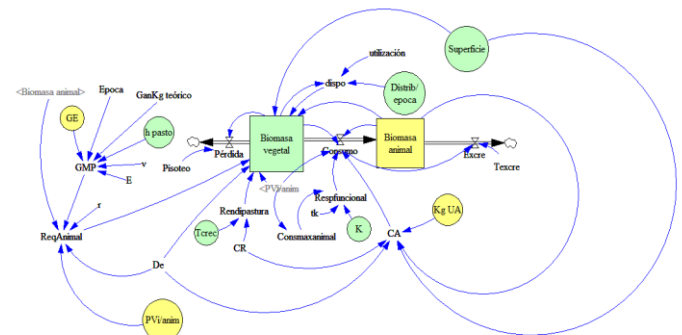


Fig. 3. Diagrama de Forrester propuesto para simular el pastoreo de ganado vacuno. Modelo desarrollado en Vensim® DSS Professional. Variables en cuadrado son modificadas con regularidad según sea el caso. En color verde se asignó a parámetros asociados al recurso forrajero y, de color amarillo se refieren al componente animal.

Koopmans y Youk, (2021) explican que el modelado de sistemas biológicos requiere la elección de una jerarquía de categorías predefinidas y relaciones entre ellas con el propósito de seguir una metodología clara que ayude a resaltar deficiencias no deseadas.

La complejidad de un sistema surge de tres factores: la cantidad, la variedad y la interconectividad de sus elementos constitutivos. Los sistemas vivos suelen ser de alta dimensión, no lineales y gobernados por componentes variables;

ésta complejidad funcional amerita el uso de ecuaciones diferenciales que se adapten a cada sistema, sin embargo, el uso de parámetros absolutos solo se limita a modelar unos pocos procesos intracelulares, resultando imposible incluir cada detalle, muchas veces desconocido, que dinamizan los procesos fisiológicos en cualquier sistema biológico, pero, con el ajuste de estas ecuaciones, es posible obtener resultados próximos a la realidad, en este caso, para simular el proceso de crecimiento animal durante el pastoreo, se emplearon factores de corrección y constantes biológicas derivadas de ajustes estadísticos sugeridos en la literatura especializada que se describen en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Parámetros asociados al manejo de pasturas tropicales*

Variable	Símbolo	Valores referenciales	Referencia
Altura del pasto pre-consumo	h pasto	Baja ≤ 10 cm Media= 20 cm Alta ≥ 20 cm	Dieguez y col. (2012) Montossi y col. (2013)
Grupo etario	GE	Mautes= 0,5 Novillos= 0,75 Novillos ≥ 400	Chacón-Rivas, (2013)
Época	Época	Lluvias=1,1 Sequía=1	Dieguez y col. (2012)
Unidad Animal Bovina	UAB	Mautes= 0,5 Novillos= 0,75	Díaz-Díaz, (2010)

*Para el momento de la simulación, el productor debe seleccionar el valor que asume cada variable según el caso.

Tabla 2. Constantes sugeridas para el agroecosistema pasturas tropicales

Variable	Símbolo	Valor	Referencia
Ciclo de rotación (días)	CR	28	Villalobos y Arce, (2013)
Constante de ajuste biológico	E	132	Dieguez y col. (2012)
	v	0,24	
	r	0,025	Andales y col. (2005)
Día estándar*	De	1	-
Distribución por época**	Distrib/época	0,45	-
Factor de corrección asociado a la respuesta funcional animal	tk	0,55	Martínez, (2006)
Kilogramos (kg)/Unidad Animal (UA)	kg UA	400	Scanecchia, (1985)
Tasa de pisoteo	Pisoteo	0,30	Díaz-Díaz, (2010)
Tasa de crecimiento de la pastura	Tcrec	0,018	Fernández y col. (2001)
Tasa de excreción	Texcre	0,46	Sossa y col. (2015)
Tasa de utilización de la pastura	Utilización	0,60	FHJC, (2004)
Máxima ganancia diaria de peso/animal (kg)	Gankg/d teórico	0,6	Montiel, (1994)

*Valor arbitrario que se utiliza para evaluar la demanda diaria de MV por parte de los animales.

**Valor empírico tomado a partir de experiencias en campo.

Tabla 3. Variables definidas por el productor al momento de la simulación

Variable	Símbolo	Observación
Biomasa animal (kg)	Biomasa animal	Se multiplica el número de animales por el PV promedio
Biomasa vegetal (kg)*	Biomasa vegetal	Valor calculado en campo que representa la MV ofertada
Peso vivo inicial (kg)	PVi	Promedio de PV en el grupo de animales
Producción máxima de MV por la pastura (kg) **	K	Valor máximo de oferta forrajera que posee la pastura

*Se asumió un valor de 14.635,2 kg de MV a partir de los resultados documentados por Jarma-Orozco y col. (2012).

**Se utilizó un porcentaje arbitrario de incremento máximo de MV del 5% de acuerdo a estimaciones de productores del sur del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Cada variable de nivel (Biomasa vegetal y biomasa animal) utiliza una función de transición que permite proyectar la dinámica del pastoreo a partir de las siguientes fórmulas:

Carga animal (Carles, 1981):

$$CA = \frac{\text{Biomasa animal (kg)} * De}{\text{kg UA} * \text{Superficie} * CR} \quad (1)$$

Consumo estimado por animal (Barrera y col. 2004):

$$\text{Consmaxanimal} = PVi * 0.1 \quad (2)$$

Ganancia meda de peso diaria (Dieguez y col. 2012):

$$GMP = \left(\frac{\text{GanKg teórico} (E * e^{-v * h \text{ pasto}})}{92 * \left(\frac{\text{Época}}{GE} \right)} \right) * (-1) / 100 \quad (3)$$

Rendimiento de materia verde (Carles, 1981):

$$\text{Rendipastura} = CR * Tcrec \quad (4)$$

Respuesta funcional animal (Martínez, 2006):

$$\text{Respfuncional} = (\text{Consmaxanimal}) * \left(1 - \exp \left(- \frac{K}{tk} \right) \right) \quad (6)$$

Para la variable consumo, se utilizó la función de Ven-sim® DSS IF THEN ELSE con el propósito de agrupar, segmentar y/o condicionar los resultados. La abreviatura “NA” indica el número de animales, este valor se calculó dividiendo la Biomasa Animal entre el PVi (kg.).

Consumo:

$$\text{Consumo} = \text{IF THEN ELSE} (\text{Biomasa vegetal} > (\text{Respfuncional} * NA * \frac{CA}{1000}), \text{Respfuncional} * (NA * \frac{CA}{1000}), \text{Biomasa vegetal}) \quad (7)$$

Pérdida de MV por pisoteo:

$$\text{Pérdida} = \text{Biomasa vegetal} * \text{Pisoteo} \quad (8)$$

Excreción animal:

$$\text{Excre} = \text{Consumo} * (1 - \text{Texcre}) \quad (9)$$

2.3. Prueba del modelo

Para la evaluación conceptual del modelo, se siguió la metodología de Castellaro y col. (2007) y el método de integración Runge-Kutta (respuesta precisa rápidamente), tomando en cuenta el componente animal y su efecto sobre la oferta de MV, teniendo en cuenta el incremento de peso desde el ingreso al potrero hasta su salida. Durante las pruebas de simulación, se consideró la apreciación de productores dedicados a la actividad ganadera para discutir en tiempo real, la compatibilidad de los datos obtenidos en experiencias previas; igualmente, los resultados fueron comparados con otros reportes disponibles en la literatura.

2.4. Análisis de sensibilidad

Para verificar la viabilidad práctica de la simulación, se realizó el análisis de sensibilidad (AS) con el objeto de procurar robustez y credibilidad al modelo propuesto (Plata-Rocha y col. 2013). Se evaluó la sensibilidad a los cambios producidos ante modificaciones de $\pm 10\%$ siguiendo la sugerencia de Bahamonde y col. (2014) en los parámetros superficie, peso vivo individual promedio (animal), porcentaje de utilización de la pastura y el valor de la unidad animal bovina en kg., descritos en el escenario 1 por ser las variables determinantes para la biomasa vegetal y animal (niveles), ambos elementos considerados como clave del pastoreo

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan datos utilizados como valores de prueba necesarios para la evaluación conceptual del modelo sugerido, los cuales corresponden a la dinámica pastoril en una unidad de producción (pequeño y mediano productor) dedicada al levante y ceba de vacunos en el sur del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Escenario teórico 1: Pastoreo intensivo

Se cree que la intensidad del pastoreo tiene un impacto sobre el almacenamiento de carbono edáfico, pues un sistema intensivo tiene el potencial de modificar la estructura, función y capacidad del suelo para almacenar carbono orgánico, pero al no regularizar el consumo a nivel de potrero, la pastura, más que un sumidero, se convertiría en fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (Abdala y col. 2018).

Tabla 4. Datos correspondientes al escenario 1

Nº de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
200	140	Mautes (50%)	400	28.000	14.635,2	2.800,00	0,5

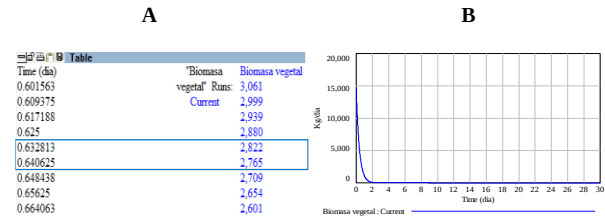


Fig. 4. Respuesta de la variable (nivel) Biomasa vegetal en un área de 0,5 ha pastoreada por 200 mautes de 140 kg de PV promedio cada uno. A. Imagen de la tabla generada con un time step (tiempo del paso) igual a 0,007812. B. Gráfica que indica el agotamiento del recurso forrajero a través del tiempo.

En la Fig. 4 se observa que el rebaño de mautes cuyas características generales expuestas en la Tabla 8, puede permanecer en el potrero hasta aproximadamente 0,633 días, equivalente a 15,19 horas de pastoreo efectivo o 1 día (se adicionan las horas invertidas en rumia, caminata y consumo de agua), de lo contrario, la cantidad de materia verde (MV) necesaria para cubrir la exigencia por parte del rebaño (2.800 kg MV) se agotaría, generando un sobre o excesivo pastoreo, que crearía un escenario de disminución en la capacidad de rebrote por parte de las plantas forrajeras e incremento de arvenses (malezas), coincidiendo con Enríquez-Quiroz y col. (2021) en su revisión sobre experiencias de pastoreo en Latinoamérica.

Rahmanian y col. (2020) recuerdan que predecir y comprender la respuesta de la vegetación a los cambios ambientales y uso de la tierra, se ha convertido en una preocupación importante en investigaciones ecológicas recientes. En la mayoría de sistemas ganaderos con pasturas, las precipitaciones y el pastoreo son los factores más importantes que precisa la diversidad de especies y el funcionamiento del ecosistema, pues la reducida cobertura vegetal con poca diversidad de plantas forrajeras aumenta la susceptibilidad del agroecosistema a los efectos del cambio climático.

De igual forma Centeri, (2022) se refiere al sobrepastoreo como una actividad severa de defoliación que dificulta considerablemente la recuperación de la pastura y facilita el establecimiento de componentes arbustivos indeseables que condicionan la sostenibilidad del agroecosistema. Wasim y col. (2023) afirman que el periodo de ocupación o días de pastoreo deben ajustarse a tiempos cortos, de manera que la ingesta de pasto ofertado pueda cubrir la necesidad del ganado sin comprometer por sobrepastoreo las reservas energéticas de la pastura.

Uno de los problemas que figuran como punto crítico de sostenibilidad en la ganadería vacuna DP, es el manejo del pastoreo debido a la participación de factores atribuibles a la pastura y al animal, debido a que en ambos elementos biológicos es difícil estimar o predecir su efecto sobre la productividad para enmarcarlos en un patrón constante; no obstante, Baldini y col. (2020) subrayan que es importante considerar

qué estrategias se pueden utilizar para reducir la huella ambiental que generan los rumiantes a pastoreo.

Para Pererira y col. (2022) plantear estrategias más sostenibles permite a los sistemas de producción ganadera evolucionar continuamente dentro de las pasturas, mejorando su salud y permitiendo la prestación continua de múltiples servicios ecosistémicos, también, se incluye otros factores determinantes de la sostenibilidad productiva y ambiental como la adecuada estimación del consumo de nutrientes durante el pastoreo. Por su parte Smith y col. (2021) aseguran que la ingesta, es un fenómeno multifactorial del cual hay pocos estudios sobre su estimación y es un elemento esencial para mejorar la gestión técnica de los rebaños, aunque algunos autores comentan que la cantidad máxima de alimento que puede ser comida por un animal es cuando a éste se le suministra *ad libitum* el pienso, tal y como sucede durante el pastoreo.

El conocimiento científico de los factores que afectan el consumo de los rumiantes es amplio y las herramientas de apoyo a la toma de decisiones para modelar variables específicas como el gasto de energía, pueden abundar en la literatura, pero aún falta la previsibilidad adecuada del consumo de pasto, que sigue siendo un desafío importante. Tedeschi y col. (2019) explican que los animales a pastoreo pueden alterar la composición de su dieta al seleccionar el material vegetal consumido, por lo tanto, es importante determinar el consumo de diferentes fracciones de pastos, actividad está que resulta difícil en la práctica debido a las complejas variables que regulan el apetito y la oferta de forraje. En la Fig. 5 se observa la respuesta simulada del consumo durante el pastoreo del rebaño descrito en la Tabla 8, el cual se mantiene constante mientras es ejercido con mínimas variaciones, hasta su reducción debido al agotamiento de la oferta forrajera.

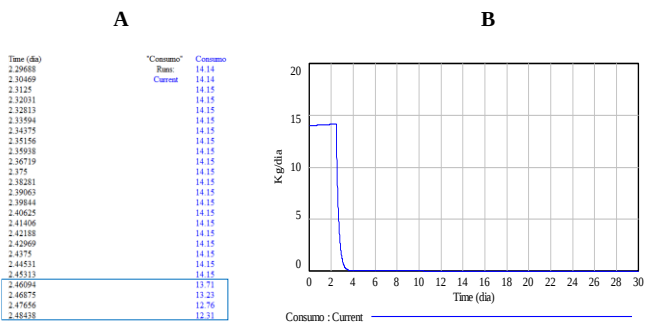


Fig. 5. Comportamiento de la variable consumo durante el pastoreo de 200 mautes de 140 kg de PV promedio cada animal en 0,5 ha. A. Tabla que indica la cantidad de forraje que consume cada animal a medida que avanza su permanencia en el potrero. B. Gráfica que expone el consumo fluctuante de materia verde (MV) hasta su descenso por falta de disponibilidad de MV.

La respuesta del consumo está sujeta al comportamiento del animal, calidad y disponibilidad del pasto, ambiente y sus interacciones, coincidiendo con lo expuesto por Stampa y col. (2020) cuando investigaron sobre metodologías para la estimación del consumo en bovinos a pastoreo. De igual

forma Wasim y col. (2023) concuerdan con la respuesta del consumo en la gráfica de la Fig. 5 (B) al afirmar que la actividad de pastoreo se concentra de forma constante mientras es efectuado, principalmente en horas de la mañana y al final de la tarde cuando la temperatura ambiente es la más baja durante el día (favorable), invirtiendo las horas de mayor radiación solar en rumia y ocio.

Otro reporte más antiguo que justifica el mismo comportamiento, es parte de las conclusiones reveladas por Cordova y col. (1978) luego de efectuar una exhaustiva revisión sobre el consumo de forraje durante el pastoreo de rumiantes, asegurando que, para mejorar la utilización del forraje, es necesario al menos estimar el pasto consumido durante el pastoreo, el cual se mantiene constante durante un período considerable hasta que las condiciones ambientales, la oferta de MV y el apetito lo permita. La respuesta productiva de los animales, traducida en ganancia de peso, está relacionada con el contenido de nutrientes hallados en los piensos disponibles y el hecho de cubrir o no los requerimientos del rebaño. En la Fig. 6 se observa el comportamiento de la biomasa animal durante el pastoreo.

La imagen muestra el incremento de peso por parte del rebaño a medida que consume la pastura disponible; cabe resaltar que en la Fig. 6(A) se muestran valores de biomasa animal crecientes hasta el día 3,54 de pastoreo, a pesar que el tiempo máximo estimado para pastorear la superficie del potrero y evitar sobrepastoreo es 0,633 días, el proceso de crecimiento no tendría ningún factor inhibitor determinante, puesto que la oferta de forraje continúa existiendo en menor proporción y el organismo animal mantiene su mecanismo de multiplicación celular constante; sin embargo, es posible que aparezcan factores inhibidores como el agotamiento total de la fitomasa consumible ocasionando la anulación del crecimiento, una teoría que fue documentada por Doyle y col. (2021).

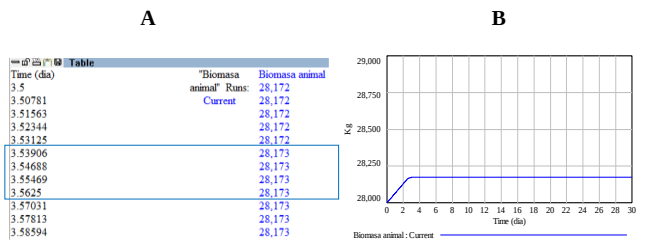


Fig. 6. Respuesta de la variable de nivel biomasa animal ante una oferta de 14.635,2 kg de MV en 0,5 ha pastoreada por 200 mautes de 140 kg de PV promedio por animal. A. Tabla que refleja el momento en el cual se hace constante el valor correspondiente al total de kilogramos que conforman el lote. B. Gráfica que explica el aumento progresivo de peso (kg) del rebaño hasta un punto (3,54 días) donde se hace constante el valor de peso final.

El caso presentado corresponde a un rebaño cuyo peso inicial total es 28.000 kg y culmina su periodo de pastoreo (1 día) con 28.064 kg, lo cual representa una ganancia diaria de peso aproximada de 0,32 g; un valor inferior al reportado por

Montiel, (1994) quien en su evaluación con mautes *Bos indicus* sometidos a pastoreo con suplementación estratégica, cada animal ganó diariamente 0,603 kg y el grupo tratado con agentes anabólicos 0,738 kg en una zona de bosque seco tropical; no obstante Ojeda, (2005) comenta que hembras bovinas púberes mestizas alimentadas exclusivamente con pasturas en el trópico, pueden ganar hasta 0,332 kg al día, valor muy semejante a lo reportado por Velásquez-Mosquera y col. (2015) al evaluar la ganancia diaria de peso en novillos cebú del piedemonte llanero que se ubicó en 0,357 kg por día. Si bien ambos trabajos confirman los valores proyectados por el modelo de simulación propuesto, es evidente que el productor debe incluir una práctica de suplementación, debido a que la oferta de forraje aunque es suficiente de acuerdo al manejo del potrero, la pastura no cubriría las necesidades nutricionales que le permita al animal maximizar su ganancia de peso, en este sentido, Monteiro y col. (2022) recomiendan la incorporación de suplementos tanto alimenticios como parenterales asegurando un correcto balance entre los niveles energéticos y proteicos; sin embargo, gráfica muestra un punto de inflexión donde el aumento de peso se detiene y merma el valor para biomasa animal con un comportamiento constante, difiriendo del informe presentado por Cao y col. (2019) quienes comprobaron mediante ajustes matemáticos que el crecimiento animal sigue una curva sigmoidea a través de la cual, la tasa de crecimiento cambia según la edad y llega a un punto en el que declina a cero; en este punto, se alcanza la asíntota y el animal obtiene el peso maduro; lo cual sugiere puntualizar con mayor especificidad las ecuaciones que nutren el modelo de simulación acá expuesto.

A pesar de la dificultad gráfica Alary y col. (2022) justifican el comportamiento aquí reseñado cuando concluyen que la ausencia de materia verde disponible para el consumo o bajos porcentajes de digestibilidad en piensos consumidos durante el pastoreo, provoca como respuesta fisiológica del rebaño una nula ganancia de peso y, por tanto, resulta insostenible para el sistema de producción animal, arriesgando la rentabilidad del negocio.

Escenario teórico 2: Cambio del área a pastorear

Los datos presentados en la Tabla 5 exponen el escenario descrito en la modelización anterior, pero en este caso se cambió la variable área del potrero, la cual pasó de 0,5 a 2 ha, valor este ajustado al trabajo de Borges y col. (2013) quienes determinaron que el 30% de los sistemas de producción con vacunos en el estado Yaracuy, Venezuela poseen superficies entre 2-5 ha por potrero, lo cual representa una característica estructural que ejerce un importante impacto sobre la productividad forrajera y el control alimenticio del ganado.

Tabla 5. Datos correspondientes al escenario 2

Nº de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
200	140	Mautes (50%)	400	28.000	14.635,2	2.800,00	2,0

En la Fig. 7 se observa el efecto de la superficie del potrero sobre el tiempo requerido para agotar la fitomasa demandada por los 200 mautes experimentales, dicho periodo se extiende de 0,633 días que se señaló en el escenario teórico 1, a 2,55 días, lo cual goza de validez práctica, pues a mayor superficie para pastorear el tiempo de permanencia en los potreros debe aumentar y, por tanto las variables que le acompañan en la simulación igualmente se ven afectadas, reportando un comportamiento semejante al señalado en el caso de potreros cuya superficie era 0,5 ha pero con valores superiores; sin embargo, la variable consumo a pesar de observarse gráficamente similar al escenario 1, el valor que genera el programa para la ingesta de pasto cambia abruptamente y es explicado detalladamente en el escenario 3, que consiste en contrastar la respuesta del consumo frente a tres superficies de pastoreo.

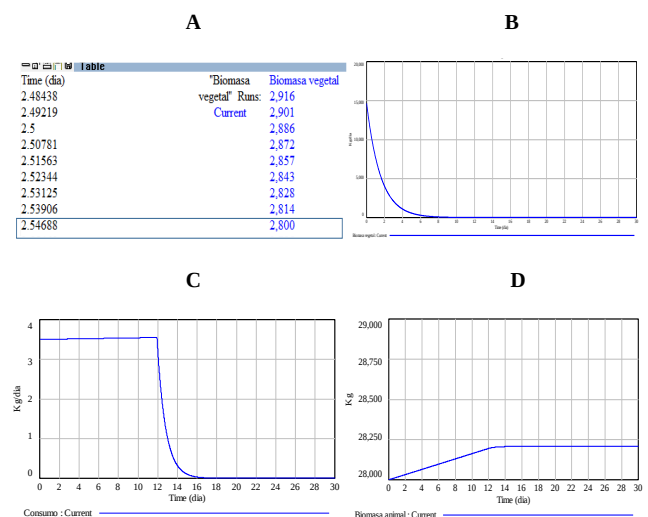


Fig. 7. Respuesta de las variables determinantes del pastoreo de 200 mautes con peso promedio de 140 kg. cada uno en 2 ha bajo un time step (tiempo del paso) igual a 0,007812. A. Tabla que señala como tiempo máximo de permanencia en el potrero de 2,5 días. B. Gráfica correspondiente a la oferta de biomasa vegetal. C. Gráfica que evidencia el consumo de MV por parte del rebaño. D. Comportamiento de la biomasa animal.

Escenario teórico 3: Diferentes dimensiones a pastorear

Rodríguez y col. (2011) comentan que, a pesar de existir varias estrategias para el manejo de las pasturas, el método de pastoreo rotacional que incluye la reducción de permanencia del ganado en el potrero y superficies más pequeñas de los mismos, influyen positivamente sobre la productividad integral de la granja. Para corroborar ésta premisa, en la Fig. 8 se exhiben tres escenarios donde se evalúa mediante modelización dinámica, la variable consumo en un rebaño de mautes pastoreando potreros de 0,5; 1 y 2 ha.

Los datos evidencian que el aumento de la superficie pastoreada condiciona la oferta de pasto disponible para el consumo, es decir, si un animal, en teoría, debe consumir el 10% de su peso vivo (PV), logrará este valor en potreros más pequeños con menor tiempo de permanencia. En la Fig. 8 (A) se demuestra que un maute de 140 kg de PV logra consumir

la cantidad de pasto que requiere diariamente (14 kg de MV) permaneciendo 2,43 días pastoreando en 0,5 ha, a partir de allí, el consumo se reduce y no satisface la necesidad nutricional, lo cual condiciona la ganancia de peso y otros parámetros de productividad.

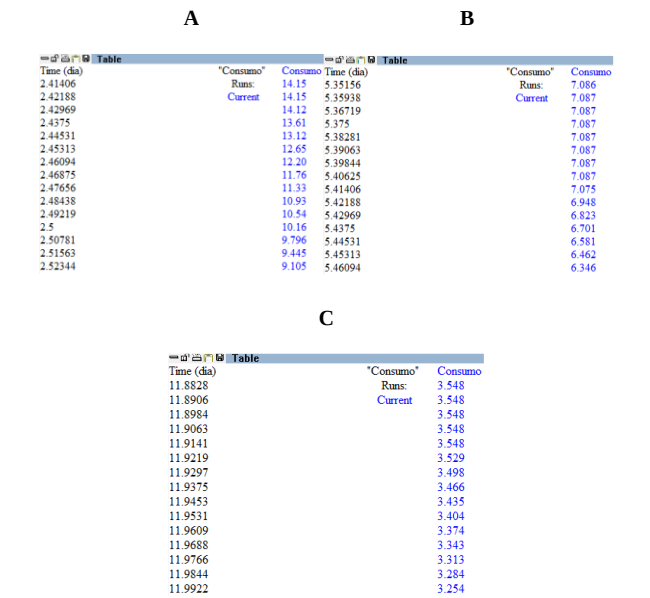


Fig. 8. Comportamiento del consumo durante el pastoreo de 200 mautes con peso promedio de 140 kg. cada uno bajo tres superficies de potrero utilizando un time step= 0,007812. A. 0,5 ha. B. 1 ha. C. 2 ha.

Para los eventos planteados en la Fig. 8 (B y C), al incrementarse la superficie destinada para pastorear y, a pesar que permite mayor tiempo de permanencia del rebaño en el potrero, los animales no ingieren la cantidad de pasto diaria que demanda su peso, esto ocurre porque ante áreas tan grandes, los animales pastan el forraje de manera más selectiva, lo cual obligaría al productor a incluir mayor volumen y efectividad del suplemento nutricional del tradicionalmente utilizado, generando un incremento considerable e insostenible en los costos de mantenimiento del ganado. Al respecto Khatri-Chhetri y col. (2022) confirmaron en su trabajo, que los potreros de gran tamaño requieren de prolongados tiempos de descanso para no afectar la comunidad microbiana del suelo, las funciones del ecosistema y las exigencias ecofisiológicas del pasto, ya que ocurriría la maduración en algunas áreas del potrero y en otras no, esto se traduce a través del tiempo en baja calidad nutricional, menor consumo y reducción significativa en la eficiencia de utilización del recurso forrajero.

Escenario teórico 4: Ausencia de animales pastoreando

Una práctica económica común en la zona sur del Lago de Maracaibo es la presencia de fundos dedicados a la compra-venta de animales, que consiste en la llegada de rebaños a la unidad de producción y su comercialización en corto tiempo (Anido y Mora, 2008). Aunque no ocurre con frecuencia, es posible que la finca en algún momento no cuente con la presencia de ganado porque todos los animales han

sido comercializados. En la Fig. 9 se exponen las variables estudiadas en la dinámica pastoril en ausencia de animales.

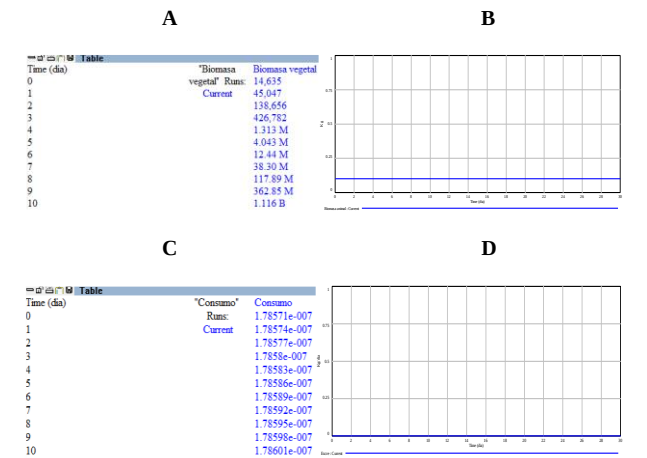


Fig. 9. Variables asociadas a la dinámica pastoril en ausencia de animales pastoreando. Time step=1. A. Aumento de la fitomasa (pastura y arvenses). B. Biomasa animal constante sin incremento. C. Consumo negativo. D. Excreción no reportada en la gráfica debido a la no permanencia de vacunos pastoreando.

El pastoreo puede influir directamente en el crecimiento de los tejidos vegetales más jóvenes. En el caso presentado, el valor de la biomasa vegetal se incrementa exponencialmente al no existir consumidores superiores, una respuesta ecosistémica validada por Ritchie y Penner, (2020) quienes consideraron que ante la herbivoría episódica ocurre una importante acumulación de biomasa forrajera, lo cual provoca cambios en la composición florística, abundancia de las diferentes formas de vida, así como la estratificación vertical de la fitomasa y su biovolumen. Por otra parte, se puede observar el descenso acelerado (valor negativo) del consumo, debido a que aumenta la oferta de biomasa vegetal pero no hay consumidores; mientras que la biomasa animal sencillamente está constante asumiendo un valor de cero por la ausencia de animales pastoreando y, evidentemente los productos de excreción (heces y orina) no son percibidos por el modelo de simulación.

Escenario teórico 5: Sub-pastoreo

Para Cruz y col. (2023) las unidades de producción bovina DP en países poco desarrollados con Venezuela, gradualmente han pasado de ser extensivos a dominar otros sistemas semi-intensivos, los cuales se caracterizan por su deficiente aprovechamiento del recurso forrajero natural, particularmente el cálculo de la carga animal ideal, sobre y sub-pastoreo que conllevan al dominio de malas hierbas que condiciona la persistencia del recurso forrajero con pérdida en la productividad general del sistema. En la Tabla 9 se presentan los datos correspondientes a un escenario de sub-pastoreo, en este caso, utilizando un novillo de 450 kg de PV al que se le han dispuesto 5 ha para pastorear, y en la Fig. 10 se ilustra a partir de dichos datos la respuesta de las variables mediante simulación.

Tabla 9. Datos correspondientes al escenario teórico 5

N° de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	Kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
1	450	Novillo (75%)	450	450	14635,2	45	5

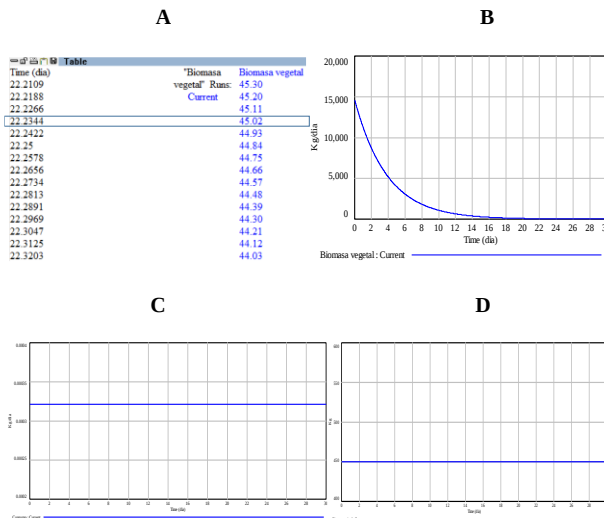


Fig. 10. Dinámica pastoril de un animal con 450 kg PV. en 5 ha. Time step=0,007812. A. Tiempo requerido por el animal para agotar la biomasa vegetal. B. Gráfica que corrobora el tiempo para consumir la fitomasa forrajera. C. Consumo constante. D. Comportamiento constante y, por tanto, insostenible de la biomasa animal.

Se observa mediante modelización que el animal requerirá de 22,24 días para defoliar la MV ofertada en función de su requerimiento diario, un consumo constante y nula ganancia de peso; este último dato no posee sustento biológico, puesto que independientemente del número de animales se debe incrementar el peso; sin embargo, en la gráfica se evidencia un comportamiento constante de la biomasa animal, un caso en el cual Sessim y col. (2020) sugieren que se trata de un estado con limitada eficiencia biológica y, por tanto, económicamente inviable e insostenible.

El sub-pastoreo conlleva al crecimiento excesivo de la biomasa vegetal, tanto las plantas no consumidas por el animal como especies forrajeras, las cuales se vuelven menos palatables y nutritivas debido a la lignificación prolongada, en otras palabras, es un agente causante de degradación debido a que genera cambios en el complejo ecosistémico suelo-planta-animal por la disminución de la calidad del forraje (Wang y col. 2019).

Escenario teórico 6: Sobrepastoreo

En la Fig. 11 se ilustra otra de las situaciones de insostenibilidad comúnmente halladas en fincas ganaderas: el sobrepastoreo. En este caso se utiliza igual cantidad de animales a lo expuesto en el escenario teórico 1 y 2, pero animales con mayor peso promedio (390 kg) y 75% del valor de la unidad animal bovina (novillos), observándose la intensa presión de pastoreo que conlleva al consumo de la fitomasa forrajera en muy corto tiempo (0,234 días), también, un breve consumo

constante de las estructuras vegetales palatables y en el caso de la biomasa animal, el valor deja de incrementarse a los 2,7 días, donde es inmodificable la dinámica del incremento de peso.

Las gráficas generadas durante la simulación, evidencian una baja acumulación de biomasa vegetal y, por tanto severa infiltración del agua complicada con la compactación en el suelo que favorecen los procesos erosivos, una respuesta confirmada por Khatri-Chhetri y col. (2022) quienes enfatizan que los procesos relacionados a la explotación ganadera, generan impactos ambientales adicionales a aquellos disturbios naturales que transforman el paisaje, donde la intensidad del pastoreo sin control con alta carga animal (sobrepastoreo) produce una profunda modificación en la estructura de la comunidad vegetal.

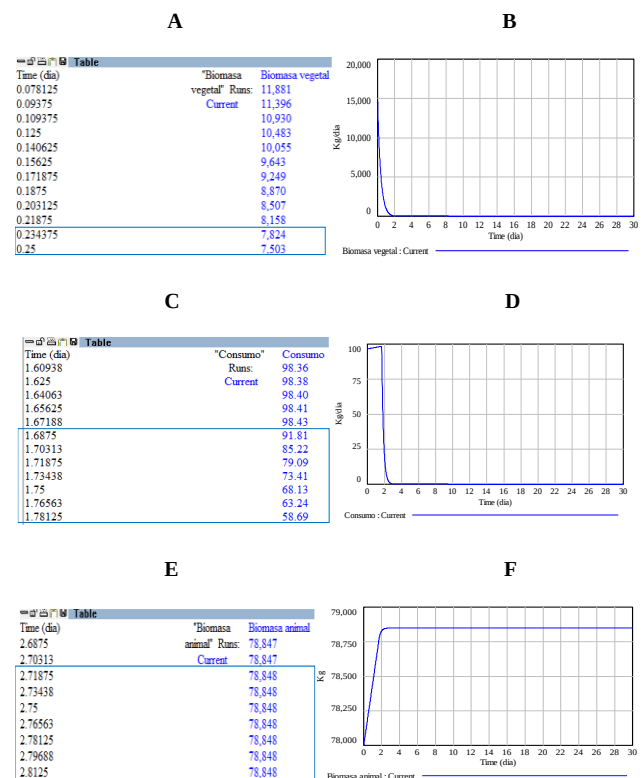


Fig. 11. Dinámica del pastoreo de 200 novillos de 390 kg PV promedio cada uno tomando en consideración un valor porcentual de la UAB=75% (0,75) y 450 kg. en 0,5 ha. Time step=0,015625. A. Tabla que expone el tiempo necesario para agotarse la oferta de biomasa vegetal requerida por el rebaño. B. Agotamiento de la oferta forrajera durante el pastoreo. C. Reducción del consumo de MV debido al sobrepastoreo. D. Gráfica que evidencia el consumo creciente de MV en el tiempo hasta el agotamiento de la fitomasa forrajera. E. Tabla que indica el momento en el cual se hace constante. F. Gráfica que explica el incremento de peso hasta que se limita el consumo por la inexistencia de fitomasa forrajera.

Análisis de sensibilidad (AS)

Cuando fueron modificadas las variables peso vivo inicial y porcentaje teórico de utilización del pasto, se observó que la respuesta del modelo permaneció sin alteración alguna, pero, al ejercer cambios en el valor UAB (kg), ésta sólo impactó sobre el nivel biomasa animal; sin afectar la biomasa vegetal;

aunque, al variar el valor de la superficie, ambos niveles del modelo respondieron al AS, lo cual permite afirmar que el área de pastoreo es el punto de partida para la planificación sustentable de la rotación del ganado en los potreros, es decir, la toma de decisión sobre el tipo, cantidad y peso vivo inicial de los animales que se pretendan adquirir para cualquier unidad de producción, debe ajustarse a la superficie destinada al pastoreo, tal y como lo recalcan Díaz-Díaz, (2010) y Borges y col. (2013); igualmente Monte y col. (2023) recuerdan que el pastoreo rotacional parte de uniformizar el tamaño de los potreros, ya que se considera una forma tecnificada para hacer más eficiente el uso de las pasturas; igualmente, es posible organizar la dinámica de consumo según los requerimientos nutricionales del rebaño. En función de lo expuesto, queda explícito que, para garantizar sostenibilidad y resiliencia, los ecosistemas pastoreados deben gestionarse mediante una planificación que evite la sobrepoblación y el pastoreo excesivo.

En las Fig. 12 y 13 se muestran las gráficas de sensibilidad que involucran las cuatro variables auxiliares consideradas, puesto que los cambios significativos en el comportamiento general del sistema no ocurren para todos parámetros, al respecto, se evidenció que, ante los ajustes realizados sobre dichas variables, el modelo lució estable, pues la trayectoria de la línea que explica el comportamiento del nivel (color azul) a través del renglón color amarillo, corresponde al 50% de incertidumbre. Los modelos de dinámica sistémica son en general insensibles a muchos parámetros, es la estructura del sistema y no el valor de sus parámetros, los que tienen mayor influencia sobre la respuesta integral del mismo; por tanto, el modelo propuesto en su evaluación preliminar (conceptual) refleja viabilidad progresiva frente al escenario real.

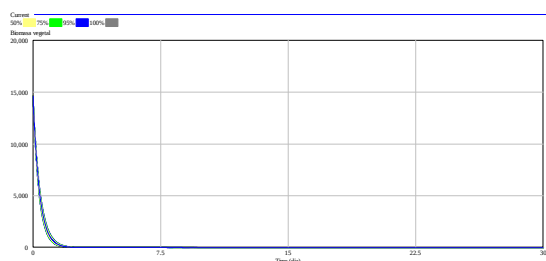


Fig. 12. Gráfico de sensibilidad correspondiente a la variable de nivel biomasa vegetal.

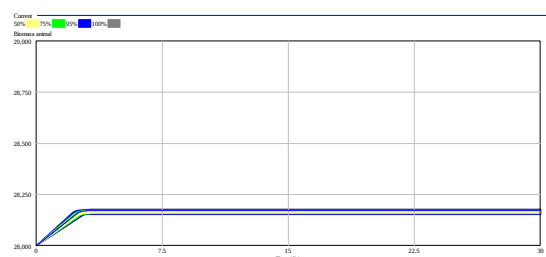


Fig. 13. Gráfico de sensibilidad aplicado a la variable de nivel biomasa animal.

4. Conclusiones

La cría, levante y ceba de ganado vacuno para la producción de carne ante una población en crecimiento que demanda proteína animal, es un sistema económico que depende del pastoreo para mantener los rebaños bovinos en el trópico americano, por tanto, se requieren investigaciones orientadas al mejoramiento del recurso forrajero, su conservación y manejo sustentable. Para ello, los modelos de simulación predictiva permiten evaluar escenarios productivos de manejo y alimentación, para estimar entre otras cosas los puntos críticos que condicionan las máximas ganancias a mínimo costo.

El éxito de la ganadería basada en pasturas depende de ejecutar los principios ecológicos mediante nuevos enfoques y técnicas que engloben la salud, nutrición animal, rotación de potreros y bienestar. La simulación permite el control necesario para el estudio de la interrelación suelo-planta-animal en los sistemas de producción basados en el aprovechamiento de pasturas como base alimentaria, lo cual sugiere mayor interpretación sobre el alcance y relevancia de las diferentes variables que estructuran los compartimientos ecosistémicos para garantizar productividad sostenible en las pasturas.

Debido al grado de complejidad que representa la selectividad y/o utilización del recurso forrajero por parte de los animales durante el pastoreo, aun utilizando del modelado, es difícil estimar con precisión el valor de la ingesta, incluso cuando se dispone de datos teóricos para oferta de materia verde debido al alto grado de heterogeneidad (composición florística) que reportan las pasturas tropicales, lo cual acentúa las dificultades para predecir el efecto real del pastoreo sobre el agroecosistema.

El análisis de sensibilidad constituye una herramienta importante para el manejo y estudio del pastoreo rotacional, en este caso, se determinó que el modelo responde con robustez a pesar de las limitantes de especificidad que posee debido a que está basado en datos reportados por la literatura en diferentes pisos altitudinales. De esta manera se evidenció que la problemática del manejo insostenible de las pasturas radica principalmente en no definir con certeza el área destinada al pastoreo (superficie) y su cobertura, por lo que la mayoría de productores sobreestiman la capacidad forrajera de los fundos y no seleccionan sus rebaños a las condiciones reales de pastoreo que ofrece, esto se traduce en sobre o subpastoreo, ambos escenarios degradadores del agroecosistema y exigiendo incorporación de costosos suplementos alimentarios, incluyendo fármacos, para mejorar la respuesta fisiológica.

La dinámica pastoril simulada, a pesar de las debilidades que puede exhibir la presente prueba preliminar, permite deducir que, si la carga animal es baja, las ganancias diarias de peso por animal son buenas pero la productividad es baja; mientras que, si la carga es elevada, la ganancia de peso es inferior a la esperada, por tanto, la productividad

inferior a la esperada, por tanto, la productividad animal estará por debajo de su potencial. En tal sentido es necesario garantizar un equilibrio entre la oferta forrajera y la necesidad de consumo del rebaño con el propósito de alcanzar el máximo producto, en este caso kg de carne/animal/ha/año.

Referencias

- Abdalla, M., Hastings, A., Chadwick, D., Jones, D., Evans, C., Jones, M., Rees, R. & Smith, P. (2018). Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253, 62-81. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.023
- Aherin, D., Weaber, R., Pendell, D., Heier, J. & Larson, R. (2023). Stochastic, individual animal systems simulation model of beef cow-calf production: development and validation. *Translational Animal Science*, 7, 1-20. doi:10.1093/tas/txac155.
- Alary, V., Lasseur, J., Frijia, A. & Gautier, D. (2022). Assessing the sustainability of livestock socio-ecosystems in the drylands through a set of indicators. *Agricultural Systems*, 198, 103389. doi: 10.1016/j.agry.2022.103389.
- Andales, A., Derner, J., Bartling, P., Ahuja, L. & Dunn, G., Hart, R. y Hanson, J. (2005). Evaluation of GPFARM for simulation of forage production and cow-calf weights. *Rangeland Ecology & Management*, 58, 247-255. doi: 10.2111/1551-5028(2005)58[247:EOG-FSO]2.0.CO;2.
- Anido, J. & Mora, J. (2008). Cadena de valor y circuito cárnico bovino en el municipio Colón del estado Zulia (Venezuela). *Actualidad Contable FACES*, 11(17), 11-30.
- Bahamonde, H., Peri, P. & Mayo, JP. (2014). Modelo de simulación de producción de materia seca y concentración de proteína bruta de gramíneas creciendo en bosques de *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst. bajo uso silvopastoril. *Ecología Austral*, 24, 111-117.
- Baldini, M., Da Borso, F., Rossi, A., Taverna, M., Bovolenta, S., Piasentier, E. & Corazzin, M. (2020). Environmental sustainability assessment of dairy farms rearing the Italian Simmental dual-purpose breed. *Animals*, 10(2), 296. doi: 10.3390/ani10020296.
- Baltenweck, I., Enahoro, D., Frijia, A. & Tarawali, S. (2020). Why is production of animal source foods important for economic development in Africa and Asia? *Animal Frontiers*, 10(4), 22-29. doi: 10.1093/af/vfaa036.
- Barrera, V., León-Velarde, C., Grijalva, J. & Chamorro, F. (2004). El componente forrajero: pasto. En: *Manejo del sistema de producción "Papa-Leche" en la Sierra ecuatoriana*. INIAP-CIP-PROMSA. Editorial ABYA-YALA. Quito-Ecuador. p. 73.
- Borges, J., Bastardo, Y., Carrillo, H., Barrios, M., Sandoval, E., Sánchez, D. & Márquez, O. (2013). Caracterización del subsistema pastizal en fincas doble propósito del Valle de Aroa, estado Yaracuy, Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 31(2), 129-139.
- Calvano, K., Simões, M., Ferraz, R., Arvor, D., De Almeida Machado, P., Rosa, M., Gaetano, R. & Bégué, A. (2022). Monitoring complex integrated crop-livestock systems at regional scale in Brazil: a big earth observation data approach. *Remote Sensing*, 14, 1648. doi: 10.3390/rs14071648.
- Cao, L., Shi, P., Li, L. & Chen, G. (2019). A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry*, 11, 204. doi: 10.3390/sym11020204
- Cardoso, A., Pavezzi, R., Prates, E., Weich, R., Ongaratto, F., Machado, M., Ruggieri, A. & Andrade, R. (2020). Intensification: a key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in *Brachiaria* grasslands. *Sustainability*, 12(16), 6656. doi: 10.3390/su12166656
- Carles, A. (1981). Sheep production in the tropics. Oxford Tropical Handbooks. Oxford University Press. New York, United States. pp 1-23, 112-125.
- Carreira, E., Serrano, J., Lopes de Castro, J., Shahidian, S. & Pereira, A. (2023). Montado mediterranean ecosystem (soil-pasture-tree and animals): a review of monitoring technologies and grazing systems. *Applied Sciences* 13, 6242. doi: 10.3390/app13106242
- Castellaro, G., Klee, G. & Chavarria R. (2007). Un modelo de simulación de sistemas de engorda de bovinos a pastoreo. *Agricultura Técnica*, 67(2), 163-172. doi: 10.4067/S0365-28072007000200006
- Centeri, C. (2022). Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. *Hydrology*, 9(2), 34. doi: 10.3390/hydrology9020034
- Chacón-Rivas, E. (2013). Principios de manejo y utilización de pasturas tropicales para la producción de leche y carne a pastoreo. En: *Manejo de pastos y forrajes tropicales*. Perozo-Bravo, A. (Ed.) Cuadernos Científicos GIRARZ N° 13. LXIII Reunión del GIRARZ. p. 21-31.
- Cheng, M., McCarl, B. & Fei, C. (2022). Climate change and livestock production: a literature review. *Atmosphere*, 13(1), 140. doi: 10.3390/atmos13010140
- Cordova, F., Wallace, J. & Pieper, R. (1978). Forage intake by grazing livestock: A review. *Journal of Range Management*, 31(6), 430-438.
- Costa, C., Difante, G., Costa, A., Gurgel, A., Ferreira, M. & Santos, G. (2021). Grazing intensity as a management strategy in tropical grasses for beef cattle production: a meta-analysis. *Animal*, 15, 100192. doi: 10.1016/j.animal.2021.100192
- Cros, M., Duru, M., García, F. & Martín-Clouaire, R. (2004). Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems*, 80, 23-42. doi: 10.1016/j.agry.2003.06.001

- Cruz, F., Horcada, A., Castel, J. & Mena, Y. (2023). Characterization of the cattle production systems in the Department of Cundinamarca (Colombia), proposals for sustainability. *Sustainability*, 15, 1603. doi: 10.3390/su152216093
- Cunha, D., Pereira, J., Fajardo, O., Braga, J., Fonseca, F. & Azevedo, J. (2010). Evaluation of a dynamic simulation model for milk production systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(4), 903-912. doi: 10.1590/S1516-35982010000400027
- Da Silva, S., Gimenes, F., Sarmiento, D., Sbrissia, A., Oliveira, D., Hernandez-Garay, A. & Pires, A. (2013). Grazing behaviour, herbage intake and animal performance of beef cattle heifers on marandu palisade grass subjected to intensities of continuous stocking management. *Journal of Agricultural Science*, 151, 727-739. doi: 10.1017/S0021859612000858
- Díaz-Díaz, F. (2010). Ganadería de doble propósito: formulación y evaluación de proyectos de inversión. Fondo Editorial UNET. San Cristóbal-Venezuela. 126 pp.
- Dieguez, F., Bommel, P., Corral, J., Bartaburu, D., Pereira, M., Montes, E., Duarte, E. & Morales, H. (2012). Modelización de una explotación ganadera extensiva criadora en basalto. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 120-130.
- Doyle, P., McGee, M., Moloney, A., Kelly, A. & O'Riordan, E. (2021). Effect of post-grazing sward height, sire genotype and indoor finishing diet on steer intake, growth and production in grass-based suckler weanling-to-beef systems. *Animals*, 11, 2623. doi: 10.3390/ani11092623
- Durán, Y., Gómez-Valenzuela, V. & Ramírez, K. (2023). Socio-technical transitions and sustainable agriculture in Latin America and the Caribbean: a systematic review of the literature 2010-2021. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1145263. doi: 10.3389/fsufs.2023.1145263
- Enríquez-Quiroz, J., Esqueda, V. & Martínez, D. (2021). Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(Supl. 3), 243-260. doi: 10.22319/rmcp.v12s3.5876
- Eslava-Zapata, R. & Morillo-Moreno, M. (2005). Diseño de un sistema de acumulación de costos para el sector ganadero bovino del municipio Alberto Adriani del estado Mérida. *Visión Gerencial*, 4(1), 23-41.
- Faría-Mármol, J. & González, B. (2008). Nuevas especies de gramíneas forrajeras para el desarrollo sostenible de los sistemas ganaderos de doble propósito. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. XXX: 365-371.
- Fernández, J., Benítez, D., Gómez, I., Cordoví, E. & Leonard, I. (2001). Dinámica de crecimiento del pasto *Brachiaria radicans* vc Tanner en las condiciones edafoclimáticas del valle del Cauto en la provincia Granma. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 35(4), 399-405.
- FHJC. Fundación Hogares Juveniles Campesinos. (2004). Manual de la granja integral autosuficiente. Editorial San Pablo. Bogotá-Colombia. p. 87.
- Flores-Coello, G., Hernández, J., Ku, J., Diaz, D., Solorio, F., Sarabia, L. & Galindo, F. (2023). Intensive silvopastoral systems mitigate enteric methane emissions from cattle. *Atmosphere*, 14, 863. doi: 10.3390/atmos14050863
- Galina, C. & Geffroy, M. (2023). Dual-purpose cattle raised in tropical conditions: what are their shortcomings in sound productive and reproductive function? *Animals*, 13, 2224. doi: 10.3390/ani13132224
- Garzón, P., Pinto, C., Lopes, C., Tomazelli, D., Werner, S., Garagorry, F., Baldissera, T., Schirmann, J. & Sbrissia, A. (2023). Intensification of pasture-based animal production system has little short-term effect on soil carbon stock in the Southern Brazilian highland. *Agroonomy*, 13, 850. doi: 10.3390/agronomy13030850
- Gomes-Rodrigues, J., Difante, G., Chaves, A., De Lima-Veras, E., Graciano, A., De Gusmão, M., Emerenciano, J. & Marques, C. (2021). Establishment of *Brachiaria* cultivars in the soil-climatic conditions of the Brazilian semi-arid region. *Acta Scientiarum*, 43, e51802. doi: 10.4025/actascianimsci.v43i1.51802
- González-Quintero, R., Barahona-Rosales, R., Bolívar-Vergara, D., Chirinda, N., Arango, J., Pantévez, H., Correa-Londoño, G. & Sánchez-Pinzón, M. (2020). Technical and environmental characterization of dual-purpose cattle farms and ways of improving production: a case study in Colombia. *Pastoralism: Research, Policy and Practice*, 10, 19. doi: 10.1186/s13570-020-00170-5.
- Greenwood, P. (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, Supplement 1, 100295. doi: 10.1016/j.animal.2021.100295
- Insua, J., Utsumi, S. & Basso, B. (2019). Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLoS ONE*, 14(3), e0212773. doi: 10.1371/journal.pone.0212773
- Isea, W. (2008). Aspectos productivos y genéticos en ganadería doble propósito orientadas a la producción de carne. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. XI: 127-140.
- Jack, H., Burke, J., Cranston, L., Morel, P. & Knights, M. (2021). The mineral content of some tropical forages commonly used in small ruminant production systems in the Caribbean – Part 2. *Tropical Agriculture*, 97(1), 46-56.

- Jarma-Orozco, A., Maza, L., Pineda, A. & Hernández, J. (2012). Physiological and bromatological aspects of *Brachiaria humidicola*. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 7(1), 87-98. doi: 10.21615/cesmvz
- Jayasinghe, P., Donaghy, D., Barber, D., Pembleton, K. & Ramilan, T. (2022). Suitability evaluation of three tropical pasture species (Mulato II, Gatton Panic, and Rhodes Grass) for cultivation under a subtropical climate of Australia. *Agronomy*, 12, 2032. doi: 10.3390/agronomy12092032
- Jones, J., Antle, J., Basso, B., Boote, K., Conant, R., Foster, I., Charles, H., Godfray, J., Herrero, M., Howitt, R., Janssen, S., Keating, B., Munoz-Carpena, R., Porter, C., Rosenzweig, C. & Wheeler, T. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269-288. doi: 10.1016/j.agsy.2016.09.021
- Khatri-Chhetri, U., Thompson, K., Quideau, S., Boyce, M., Chang, S., Kaliaskar, D., Bork, E. & Carlyle, C. (2022). Adaptive multi-paddock grazing increases soil nutrient availability and bacteria to fungi ratio in grassland soils. *Applied Soil Ecology*, 179, 104590. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104590
- Kleppel, G. & Frank, D. (2022). Structure and functioning of wild and agricultural grazing ecosystems: a comparative review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 945514. doi: 10.3389/fsufs.2022.945514
- Koopmans, L. & Youk, H. (2021). Predictive landscapes hidden beneath biological cellular automata. *Journal of Biological Physics*, 47, 355-369. doi: 10.1007/s10867-021-09592-7
- Kristiansen, S., Painter, J. & Shea, M. (2021). Animal agriculture and climate change in the US and UK elite media: volume, responsibilities, causes and solutions. *Environmental Communication*, 15(2), 153-172. doi: 10.1080/17524032.2020
- Liu, X., Floate, K., Gorzelak, M., Holman, D., Hrycauk, S., Kubota, H., Lupwayi, N., Neilson, J., Ortega, R., Petri, R., Tran, L., Wang, H., Wilches, D., Yang, X., Zorz, J. & Guarna, M. (2023). Prairie agroecosystems: interconnected microbiomes of livestock, soil and insects. *Agriculture*, 13, 326. doi: 10.3390/agriculture13020326
- Londoño-Franco, L. & Álvarez-Molina, J. (2011). Evaluación de dos sistemas de pastoreo (rotacional y continuo) sobre variables técnicas, productivas y económicas en novillos cebú comercial en el trópico bajo. *Revista Politécnica*, 7(12), 120-135.
- Macedo, I., Terra, J., Siri-Prieto, G., Velazco, J. & Carrasco-Letelier, L. (2021). Rice-pastures agroecosystem intensification affects Energy use efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123771. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123771
- Marin, A., Laca, E., Baldissera, T., Pinto, C., Garagorry, F., Zubietta, A., Bremm, C., Bindelle, J. & Carvalho, P. (2022). Determining the pre-grazing sward height of Kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus* - Hochst. ex Chiov.) for optimizing nutrient intake rate of dairy heifers. *PLoS ONE*, 17(7), e0269716. doi: 10.1371/journal.pone.0269716
- Martínez, J. (2006). Estudio de la desertificación por sobrepastoreo mediante un modelo de simulación dinámica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. Tesis de Grado. 166 pp.
- Monte, F., Sollenberger, L. & Vendramini, J. (2023). Grazing management and stocking strategy decisions for pasture-based beef systems: experimental confirmation vs. testimonials and perceptions. *Translational Animal Science*, 7, txad069. doi: 10.1093/tas/txad069
- Monteiro, A., Avelino, C., Avelino, C., Vieira, L., França, D., Rosa, A., Ribeiro, G. & Souza, M. (2022). Energy supplementation as strategy of pasture management. *Acta Scientiarum*, 44, e55761. doi: 10.4025/actascianimsci.v44i1.55761
- Montiel, N. (1994). Comparación de dos agentes anabólicos sobre la ganancia de peso en bovinos *Bos indicus* a pastoreo y dos niveles de suplementación. *Revista Científica FCV-LUZ*, IV(2), 113-118.
- Montossi, F., Pravia, M., Dighiero, A., Porcile, V., Gutiérrez, D. & De Barbieri, I. (2013). Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. *Revista INIA*, 34, 25-29.
- Moorby, J. & Fraser, M. (2021). Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*, 15, 100297. doi: 10.1016/j.animal.2021.100297
- Negassa, A., Gebremedhin, B., Gebru, G., Desta, S., Nigussie, K., Shapiro, B., Dutilly-Diane, C. & Tegegne, A. (2015). Integrated bio-economic simulation model for traditional cattle production systems in Ethiopia: ex-ante evaluation of policies and investments. LIVES Working Paper 6. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute (ILRI). 36 pp.
- Ojeda, A. (2005). Aprovechemos el crecimiento compensatorio en novillos a pastoreo. En: *Manual de ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C.; Soto-Belloso, E. (Eds.). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Sección IV-Cap. 10: 267-270.
- Peña, M. & Materán, M. (2005). El hombre factor clave de los sistemas de producción ganadera. En: *Manual de ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., y Soto-Belloso, E. (Eds.). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Sección I-Cap. 10: 55-60.
- Pereira, F., Smith, C., Charters, S. & Gregorini, P. (2022). Creating a design framework to diagnose and enhance grassland health under pastoral livestock production systems. *Animals*, 12(23), 3306. doi: 10.3390/ani12233306

- Plata-Rocha, P., Gómez, M., Bosque, J. & Aguilar, J. (2013). Análisis de sensibilidad para un modelo de simulación de crecimiento urbano: propuesta metodológica explícitamente espacial. *GeoFocus*, 13(2), 158-178.
- Queenan, K., Sobratee, N., Davids, R., Mabhaudhi, T., Chimonyo, M., Slotow, R., Shankar, B. & Häslar, B. (2020). A systems analysis and conceptual system dynamics model of the livestock-derived food system in South Africa: A tool for policy guidance. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community*, 9,4. doi: 10.5304/jafscd.2020.094.021
- Rahmanian, S., Hejda, M., Ejtehadi, H., Farzam, M., Pyšek, P. & Memariani, F. (2020). Effects of livestock grazing on plant species diversity vary along a climatic gradient in northeastern Iran. *Applied Vegetation Science*, 23, 551–561. doi: 10.1111/avsc.12512
- Reavis, M., Ahlen, J., Rudek J. & Naithani, K. (2022). Evaluating greenhouse gas emissions and climate mitigation goals of the global food and beverage sector. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 789499. doi: 10.3389/fsufs.2021.789499
- Resat, H., Costa, M. & Shankaran, H. (2011). Spatial aspects in biological system simulations. *Methods in Enzymology*, 487, 485–511. doi:10.1016/B978-0-12-381270-4.00017-2
- Rice, R., MacNeil, M., Jenkins, T. & Koong, L. (1983). Simulation of the herbage/animal interface of grazing lands. En: *Analysis of ecological systems: state of the art in ecological modelling*. Lauenroth, W., Skogerboe, G., y Flug, M. (Ed.) Elsevier Sci. Publishing Company INC. USA. p. 475-488.
- Ritchie, M. & Penner, J. (2020). Episodic herbivory, plant density dependence, and stimulation of aboveground plant production. *Ecology and Evolution*, 10, 5302-5314. doi: 10.1002/ece3.6274
- Rodríguez, G., Patiño, R., Altahona, L. & Gil, J. (2011). Dinámica de crecimiento de pasturas con manejo rotacional en diferente topografía en un sistema de producción de carne vacuna en Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 3(1), 47-61. doi: 10.24188/recia.v3.n1.2011.249
- Rotz, C., Isenberg, B., Stackhouse-Lawson, K. & Pollak, E. (2013). A simulation-based approach for evaluating and comparing the environmental footprints of beef production systems. *Journal Animal Science*, 91,5427-5437. doi: 10.2527/jas.2013-6506
- Ruiz-Albarrán, M., Balocchi, O., Wittwer, F. & Pulido, R. (2016). Milk production, grazing behavior and nutritional status of dairy cows grazing two herbage allowances during winter. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(1), 34-39. doi: 10.4067/S0718-58392016000100005
- Santos, V., McManus, C., Peripolli, V., Tanure, C., Lima, P., Corrêa, P., Brito, D., Torres, S. & Louvandini, H. (2017). Dry matter intake, performance and carcass characteristics of hair sheep reared under different grazing systems. *Scientia Agricola*, 74(6), 436-442. doi: 10.1590/1678-992X-2016-0290
- Scarnecchia, D. (1985). The animal-unit and animal-unit-equivalent concepts in range science. *Journal of Range Management*, 38(4), 346-349.
- Scarnecchia, D. (1985). The animal-unit and animal-unit-equivalent concepts in range science. *Journal of Range Management*, 38(4), 346-349. doi: 10.2307/3899419
- Segovia-López, E. & Jeréz-Timaure, N. (2008). Nudos críticos en la cadena cárnica bovina. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. LXVIII: 805-817.
- Sessim, A., Esteves, T., López-González, F., Santos de Freitas, D. & Jardim, J. (2020). Efficiency in cow-calf systems with different ages of cow culling. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 476. doi: 10.3389/fvets.2020.00476.
- Smith, A. (2022). Biophysical simulation of sheep grazing systems using the SGS pasture model. *Agriculture*, 12, 2032. doi: 10.3390/agriculture12122032.
- Smith, S., Gotoh, T. & Greenwood, P. (2018). Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. *Asian-Australas Journal Animal Science*, 31(7), 927-932. doi: 10.5713/ajas.18.0405
- Smith, W., Galyean, M., Kallenbach, R., Greenwood, P. & Scholljegerdes, E. (2021). Understanding intake on pastures: how, why, and a way forward. *Journal Animal Science*, 99(6), 1-17. doi: 10.1093/jas/skab062
- Sonnier, G., Quintana-Ascencio, P., Bohlen, P., Fauth, J., Jenkins, D. & Boughton, E. (2020). Pasture management, grazing, and fire interact to determine wetland provisioning in a subtropical agroecosystem. *Ecosphere*, 11(8), e03209. doi: 10.1002/ecs2.3209
- Sossa, C., Correa, G., & Barahona, R. (2015). Consumo y excreción de nutrientes en novillos de carne pastoreando en trópico de altura con y sin suplementación energética. *Zootecnia Tropical*, 33(2), 117-128.
- Stampa, E., Schipmann, C. & Hamm, U. (2020). Consumer perceptions, preferences, and behavior regarding pasture-raised livestock products: A review. *Food Quality and Preference*, 82, 103872. doi: 10.1016/j.foodqual.2020.103872
- Tedeschi, L., Molle, G., Menendez, H., Cannas, A. & Fonseca, M. (2019). The assessment of supplementation requirements of grazing ruminants using nutrition models. *Translational Animal Science*, 3(2), 811-828. doi: 10.1093/tas/txy140
- Terry, S., Basarab, J., Guan, L. & McAllister, A. (2021). Strategies to improve the efficiency of beef cattle production. *Canadian Journal Animal Science*, 101(1), 1-19. doi: 10.1139/cjas-2020-0022

- Torres Jara de García, G., Durand-Chávez, L., Quispe-Ccasa, H., Linares-Rivera, J., Segura, G., Calderón, R., Vásquez, H., Maicedo, J., Ampuero-Trigoso, G., Robles, R. & Saucedo-Urriarte, J. (2023). Sustainability of livestock farms: the case of the district of Moyobamba, Perú. *Heiyon*, 9(2), e13153. doi: 10.1016/j.heiyon.2023.e13153
- Twine, R. (2021). Emissions from animal agriculture-16.5% is the new minimum figure. *Sustainability*, 13, 6276. doi: 10.3390/su13116276
- Ureña, J., Capriles, M. & Flores, B. (1997). Análisis del sistema de producción de leche y carne con vacunos en El Vigía, estado Mérida. Zona Sur del Lago de Maracaibo. II. Análisis funcional. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 5(Supl. 1), 631-633.
- Varijakshapanicker, P., Mckune, S., Miller, L., Hendrickx, S., Balehegn, M., Dahl, G. & Adesogan, T. (2019). Sustainable livestock systems to improve human health, nutrition, and economic status. *Animal Frontiers*, 9(4), 39-49. doi: 10.1093/af/vfz041
- Velásquez-Mosquera, J., Chacón, L. & Ardila, A. (2015). Evaluación de estrategias de manejo y pastoreo sobre el crecimiento en novillos comerciales cebú en un hato del piedemonte llanero. *Revista Ciencia Animal*, 9(1), 57-68.
- Verde, O., Medina, J. y Borges, M. (2007). Sistema de producción con bovinos de carne en la Estación Experimental "La Cumaca" I.- Peso al nacer. *Revista de la Facultad de Ciencias Veterinarias-Universidad Central de Venezuela*, 48(2), 97-104.
- Villalobos, L. & Arce, J. (2013). Evaluación agronómica y nutricional del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. Disponibilidad de biomasa y fenología. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 91-101.
- Walker, J. (1993). Nutritional models for grazing animals. *Icelandic Agricultural Sciences*, 7, 45-57.
- Wang, S., Fan, J., Li, Y. & Huang, L. (2019). Effects of grazing exclusion on biomass growth and species diversity among various grassland types of the Tibetan Plateau. *Sustainability*, 11(6), 1705. doi: 10.3390/su11061705
- Wasim, M., Draganova, I., Charles, P., Morel, H. & Todd, S. (2023). Variations in the 24 h temporal patterns and time budgets of grazing, rumination, and idling behaviors in grazing dairy cows in a New Zealand system. *Journal of Animal Science*, 101, 1-11. doi: 10.1093/jas/skad038
- Wróbel, B., Zielewicz, W. & Staniak, M. (2023). Challenges of pasture feeding systems-opportunities and constraints. *Agriculture*, 13, 974. doi: 10.3390/agriculture13050974

Recibido: 10 de octubre de 2023

Aceptado: 05 de febrero de 2024

Uzcátegui-Varela, Juan Pablo. Ingeniero de Producción Agropecuaria. Magíster Scientiarum en Producción Animal. Investigador Asociado al Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes (ULA). Candidato a Doctor en Ciencias Humanas, ULA, Mérida, Venezuela .  <https://orcid.org/0000-0001-7602-1332>