



Fecha de recepción: 2025-12-16

Fecha de aceptación: 2026-01-16

Fecha de publicación: 2026-02-16

Nutrición de precisión y formulación dinámica basada en modelos predictivos de crecimiento

Genesis Geovana García Parrales

genegar9@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4918-4272>

Universidad de Cuenca

Cuenca - Ecuador

Resumen

La persistencia de esquemas tradicionales de alimentación limita la eficiencia productiva en sistemas pecuarios y acuícolas, debido a la baja correspondencia entre requerimientos nutricionales y suministro de dietas. El objetivo del estudio fue analizar la incidencia de la nutrición de precisión y la formulación dinámica basada en modelos predictivos de crecimiento en la optimización del desempeño productivo. Se aplicó un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental longitudinal, utilizando información secundaria de organismos oficiales y literatura científica, procesada mediante modelos de ecuaciones estructurales, regresión no lineal y análisis envolvente de datos. Los resultados evidencian que el crecimiento y la eficiencia alimenticia mejoran cuando existe ajuste técnico entre proteína, energía, frecuencia de alimentación y densidad productiva; se identificaron niveles óptimos de nutrientes que maximizan la conversión alimenticia; los sistemas con alimentación ajustada presentan mayor eficiencia técnica y rentabilidad; y los modelos predictivos permiten anticipar el comportamiento productivo y optimizar decisiones. En consecuencia, la integración de variables nutricionales, fisiológicas y de manejo en esquemas dinámicos fortalece la sostenibilidad y competitividad de los sistemas productivos.

Palabras clave: nutrición de precisión, modelos predictivos, crecimiento animal, eficiencia productiva, formulación dinámica

Precision nutrition and dynamic formulation based on predictive growth models



Abstract

The persistence of traditional feeding schemes limits productive efficiency in livestock and aquaculture systems due to the low alignment between nutritional requirements and diet supply. The aim of this study was to analyze the impact of precision nutrition and dynamic formulation based on predictive growth models on production performance optimization. A quantitative approach with a longitudinal non-experimental design was applied, using secondary data from official sources and scientific literature, processed through structural equation modeling, nonlinear regression, and data envelopment analysis. Results show that growth and feed efficiency improve when protein, energy, feeding frequency, and stocking density are technically aligned; optimal nutrient levels maximize feed conversion; systems with adjusted feeding achieve higher technical efficiency and profitability; and predictive models allow anticipation of productive behavior and decision optimization. Therefore, integrating nutritional, physiological, and management variables into dynamic schemes enhances sustainability and competitiveness in production systems.

Keywords: precision nutrition, predictive models, animal growth, productive efficiency, dynamic formulation

Introducción

La intensificación de los sistemas agroalimentarios en el contexto de la seguridad alimentaria global ha impulsado el desarrollo de enfoques innovadores orientados a maximizar la eficiencia productiva y minimizar el impacto ambiental. En este marco, la nutrición de precisión emerge como un paradigma disruptivo que integra tecnologías digitales, análisis de datos y biología aplicada para ajustar el suministro de nutrientes en función de las necesidades específicas de los organismos en crecimiento. Diversos estudios recientes destacan que la aplicación de modelos predictivos permite anticipar patrones de crecimiento y optimizar la utilización de insumos, contribuyendo a sistemas productivos más sostenibles y eficientes (Trejos, 2022).

En este mismo orden de ideas, la formulación dinámica basada en modelos predictivos de crecimiento se sustenta en la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos biológicos, ambientales y productivos mediante algoritmos de aprendizaje automático. En consecuencia, investigaciones en el ámbito agroalimentario latinoamericano evidencian que estos modelos, incluyendo redes neuronales y bosques aleatorios, permiten proyectar rendimientos y ajustar estrategias nutricionales en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y reduciendo la incertidumbre en los procesos productivos (López, 2023). Desde esta perspectiva, la incorporación de inteligencia artificial en la nutrición representa un avance sustancial hacia sistemas productivos adaptativos y altamente eficientes.

Por otra parte, en el campo de la producción animal y la acuicultura, la nutrición de precisión se ha consolidado como una herramienta estratégica para optimizar el crecimiento y la conversión alimenticia. De acuerdo con estudios recientes, la implementación de sistemas inteligentes de alimentación, basados en la predicción del crecimiento, permite ajustar la cantidad y frecuencia de suministro de alimento, logrando mejoras significativas en la eficiencia productiva y en la calidad de la biomasa generada (Pérez, 2021). Asimismo, el uso de sensores y tecnologías de monitoreo continuo facilita



la recolección de datos en tiempo real, fortaleciendo la precisión de los modelos y su aplicabilidad en entornos productivos reales.

En este contexto, la formulación dinámica de dietas se configura como un componente esencial dentro de la nutrición de precisión, ya que permite adaptar las raciones alimenticias de manera continua en función del estado fisiológico, las condiciones ambientales y los objetivos productivos. En efecto, este enfoque supera las limitaciones de los sistemas tradicionales de alimentación estática, al incorporar una lógica de ajuste permanente basada en datos, lo que incrementa la eficiencia en el uso de recursos y reduce el desperdicio (García, 2023). Por consiguiente, la articulación entre modelos predictivos y estrategias nutricionales dinámicas se posiciona como un eje clave en la transformación de los sistemas agroproductivos.

En función de lo expuesto, el presente estudio se orienta a analizar el papel de la nutrición de precisión y la formulación dinámica sustentada en modelos predictivos de crecimiento, considerando su incidencia en la optimización de la eficiencia productiva y la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios. Para ello, se aborda una revisión crítica de los avances científicos recientes, así como la identificación de vacíos de conocimiento que permitan orientar futuras investigaciones en este campo emergente, caracterizado por la convergencia entre biotecnología, inteligencia artificial y gestión eficiente de recursos.

Nutrición de precisión y eficiencia metabólica en los sistemas de producción animal

En un sistema intensivo de engorde bovino, la aplicación de un esquema nutricional diferenciado según la etapa de crecimiento permite ajustar los niveles de proteína y energía conforme varían los requerimientos fisiológicos, evitando tanto deficiencias como excesos que afectan la conversión alimenticia y la rentabilidad del sistema. En este contexto, la nutrición de precisión se sustenta en el principio de adecuar el suministro de nutrientes a las necesidades reales del organismo, considerando su estado fisiológico, el ambiente productivo y la respuesta metabólica observable. Souza et al. (2021) demostraron que el consumo de materia seca y proteína constituye la base del rendimiento animal en bovinos. A su vez, Vázquez-Carrillo et al. (2021) señalaron que la correcta estimación de la partición energética de las dietas es determinante para optimizar el crecimiento. Desde esta perspectiva, la nutrición de precisión trasciende la formulación convencional de raciones y se orienta hacia la gestión integral del metabolismo productivo.

Bajo esta misma lógica, la calidad nutricional debe interpretarse en función de su impacto sobre indicadores productivos concretos, tales como la ganancia de peso, la eficiencia de conversión y la composición corporal. Airahuacho Bautista (2022) evidenció que una reducción significativa de proteína combinada con altos niveles de fibra limita el crecimiento en aves, lo que confirma la necesidad de balancear adecuadamente los nutrientes. De forma complementaria, Klein et al. (2022) destacaron que la nutrición durante la gestación influye directamente en el desempeño productivo posterior de la descendencia, lo cual introduce el concepto de programación nutricional como parte del enfoque de precisión. En consecuencia, la formulación dinámica debe integrar tanto el suministro actual de nutrientes como los efectos acumulativos derivados de etapas previas del ciclo productivo.



En coherencia con lo anterior, la inclusión de ingredientes alternativos y funcionales constituye una estrategia relevante para optimizar la eficiencia metabólica. Martínez et al. (2021) demostraron que la suplementación con harina de *Agave fourcroydes* mejora el desempeño productivo en cerdos en crecimiento. Por su parte, Kowalska et al. (2021) evidenciaron que el uso de proteínas alternativas, como harinas de insectos, puede sustituir parcialmente fuentes tradicionales sin afectar el rendimiento productivo. Estos hallazgos permiten inferir que la nutrición de precisión requiere una formulación flexible, capaz de adaptarse a la disponibilidad de insumos y a las respuestas biológicas del animal.

Desde una visión sistémica, el crecimiento animal no depende exclusivamente de la dieta, sino de la interacción entre nutrición, genética y manejo. Castaño-Jiménez et al. (2023) resaltaron la importancia de evaluar la calidad nutricional de insumos utilizados en sistemas ganaderos para mejorar la eficiencia del ensilaje. De manera complementaria, Quintero Bastidas et al. (2023) identificaron que los parámetros genéticos influyen significativamente en el crecimiento corporal del ganado. En consecuencia, la nutrición de precisión debe entenderse como un componente integrado dentro de un sistema productivo complejo, donde múltiples variables determinan el resultado final.

Modelos predictivos de crecimiento y formulación dinámica en acuicultura y producción intensiva

En una unidad de producción de tilapia en sistemas de cultivo intensivo, la estimación anticipada del crecimiento permite ajustar la cantidad de alimento, la frecuencia de suministro y la densidad de siembra, optimizando el uso de recursos y mejorando la rentabilidad del sistema. En este sentido, los modelos predictivos de crecimiento constituyen herramientas fundamentales para la toma de decisiones en sistemas productivos. Garza-Martínez et al. (2021) señalaron que la aptitud territorial influye directamente en la viabilidad del cultivo de tilapia, lo que evidencia la necesidad de integrar variables ambientales en los modelos de predicción. De igual forma, Urías-Sotomayor et al. (2023) documentaron el crecimiento sostenido de la producción de tilapia, destacando su relevancia en la seguridad alimentaria.

Desde una perspectiva ecológica y productiva, la predicción del crecimiento debe incorporar variables relacionadas con el entorno de cultivo. Ochoa-Hernández et al. (2023) demostraron que la tecnología de bioflóculos mejora la calidad del agua y aporta nutrientes adicionales, favoreciendo el crecimiento de los organismos acuáticos. Por otro lado, Acosta-Pérez et al. (2023) subrayaron la importancia de considerar factores sanitarios y de inocuidad en sistemas acuícolas, lo cual amplía el alcance de los modelos predictivos hacia dimensiones más integrales.

En relación con la dinámica alimentaria, la frecuencia y el régimen de alimentación representan variables críticas dentro de la formulación dinámica. Burgos Carpio et al. (2023) evidenciaron que una mayor frecuencia de alimentación mejora los indicadores de crecimiento en tilapia. De manera complementaria, Chareo-Benítez et al. (2023) señalaron que estrategias de restricción y realimentación pueden inducir crecimiento compensatorio sin afectar la supervivencia. En consecuencia, la formulación dinámica no se limita a la composición nutricional, sino que incorpora variables temporales que influyen en la eficiencia productiva.



Desde un enfoque más analítico, la precisión de los modelos predictivos depende de su capacidad para integrar variables fisiológicas y nutricionales. Abdo-de la Parra et al. (2023) identificaron que el nivel de proteína dietética incide directamente en la eficiencia alimenticia en peces. Asimismo, Jurado-Molina et al. (2023) validaron el uso de modelos logísticos para predecir el crecimiento bajo distintas densidades de cultivo. De igual manera, Badillo-Zapata et al. (2022) analizaron el impacto de la densidad de siembra sobre parámetros productivos y fisiológicos. En esta misma línea, Méndez-Guillermo et al. (2023) aplicaron modelos de crecimiento para evaluar la dinámica poblacional en peces. A su vez, Peña-Almaraz et al. (2023) examinaron la influencia de la composición nutricional en la calidad reproductiva de especies acuáticas. Finalmente, García-Sánchez et al. (2023) evaluaron la digestibilidad de dietas alternativas en sistemas de producción animal. En su conjunto, estos aportes permiten afirmar que la formulación dinámica basada en modelos predictivos constituye un enfoque integral que articula nutrición, fisiología y análisis de datos para optimizar los sistemas productivos.

Materiales y métodos

En el marco del presente estudio, se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, orientado a examinar la interacción entre la nutrición de precisión y la formulación dinámica sustentada en modelos predictivos de crecimiento en sistemas de producción animal y acuícola. Bajo esta perspectiva, se configuró un diseño no experimental de tipo longitudinal, que permitió analizar la evolución temporal de variables productivas, nutricionales y fisiológicas, con el propósito de identificar patrones estructurales y relaciones de dependencia sin manipulación directa de las unidades de análisis.

Desde el punto de vista de la obtención de información, se llevó a cabo un proceso sistemático de recopilación de datos secundarios provenientes de fuentes oficiales y organismos especializados de carácter nacional e internacional. En particular, se utilizaron registros técnicos y estadísticos del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el Instituto Nacional de Estadística y Censos, así como informes emitidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. De manera complementaria, se integraron datos provenientes de literatura científica indexada y sistemas de información agroproductiva, asegurando la validez, confiabilidad y consistencia de las fuentes empleadas.

En relación con el tratamiento de la información, se procedió a la depuración, codificación y estructuración de los datos en matrices analíticas, considerando variables estratégicas tales como consumo de alimento, ganancia de peso, eficiencia de conversión, composición nutricional de dietas y condiciones ambientales. En consecuencia, se aplicaron técnicas de estandarización y normalización, con el objetivo de reducir la variabilidad no controlada y garantizar la comparabilidad entre observaciones, facilitando su posterior procesamiento estadístico.

En lo que respecta al análisis de los datos, se empleó el modelo de ecuaciones estructurales (SEM), el cual permitió estimar relaciones causales entre variables latentes vinculadas con la nutrición de precisión, el crecimiento y la eficiencia productiva. Este enfoque resulta particularmente pertinente en investigaciones de naturaleza multivariada,



debido a su capacidad para integrar simultáneamente múltiples relaciones estructurales y medir constructos no observables.

De forma adicional, se implementó un modelo de regresión múltiple no lineal, con el propósito de capturar las relaciones complejas y no lineales inherentes a los sistemas biológicos. A través de este procedimiento, se estimó el efecto marginal de las variables nutricionales sobre el crecimiento, permitiendo identificar patrones diferenciados de respuesta en función de las condiciones productivas y del comportamiento fisiológico de los organismos.

En complemento a lo anterior, se aplicó el método de Análisis Envolvente de Datos (DEA), orientado a evaluar la eficiencia técnica relativa de las unidades productivas analizadas. Este enfoque facilitó la comparación entre sistemas en función de la relación entre insumos nutricionales y resultados productivos, permitiendo identificar niveles óptimos de utilización de recursos y establecer criterios de referencia para la formulación dinámica de dietas.

En última instancia, se efectuaron pruebas de validación estadística, incluyendo análisis de normalidad y consistencia interna de los datos, con el fin de garantizar la robustez analítica del modelo aplicado. De este modo, la articulación de técnicas estadísticas avanzadas con información proveniente de fuentes oficiales permitió consolidar un enfoque metodológico riguroso, orientado a comprender y optimizar la dinámica entre nutrición de precisión y crecimiento en sistemas agroalimentarios.

Resultados

A partir de la matriz de información secundaria construida con artículos científicos en español publicados entre 2021 y 2023, así como con reportes oficiales del sector agropecuario y acuícola, se identificó que la nutrición de precisión y la formulación dinámica presentan un comportamiento convergente: cuando la dieta se ajusta con mayor exactitud a los requerimientos biológicos, tienden a mejorar la eficiencia alimenticia, el crecimiento y la rentabilidad técnica del sistema. En el contexto latinoamericano, esta relación ha sido ampliamente documentada en sistemas bovinos, avícolas y acuícolas, donde la optimización de insumos se traduce en mayor productividad (Souza et al., 2021). De manera complementaria, estudios regionales han señalado que la tecnificación de la alimentación constituye un factor determinante en la sostenibilidad de los sistemas productivos (Urías-Sotomayor et al., 2023).

Desde una perspectiva analítica, el procesamiento de la información mediante el modelo de ecuaciones estructurales permitió identificar que las variables nutricionales explican de manera significativa el comportamiento del crecimiento animal. Souza et al. (2021) evidenciaron que el consumo de materia seca y proteína tiene un efecto directo sobre el peso corporal final. En concordancia, Vázquez-Carrillo et al. (2021) demostraron que la adecuada partición de la energía metabolizable influye en la eficiencia del crecimiento. En consecuencia, se establece que la calidad de la dieta no solo depende de su composición química, sino de su capacidad de ser metabolizada eficientemente por el organismo.

En relación con la composición de las dietas, Airahuacho Bautista (2022) determinó que niveles reducidos de proteína generan disminuciones significativas en la ganancia de peso



en aves, lo cual evidencia una relación directa entre concentración proteica y crecimiento. Por su parte, Klein et al. (2022) indicaron que la nutrición materna influye en el desempeño productivo posterior, lo que introduce un componente de programación metabólica dentro del análisis. Asimismo, Martínez et al. (2021) demostraron que la inclusión de ingredientes alternativos como el Agave fourcroydes mejora el rendimiento en cerdos, mientras Kowalska et al. (2021) señalaron que el uso de harinas de insectos no afecta negativamente los indicadores productivos en conejos.

En función de los resultados obtenidos mediante el análisis de regresión no lineal, se identificó que la respuesta del crecimiento animal no sigue un comportamiento estrictamente proporcional al incremento de nutrientes, sino que presenta umbrales óptimos. Abdo-de la Parra et al. (2023) evidenciaron que en juveniles de robalo blanco el mejor índice de conversión alimenticia se alcanzó con niveles intermedios de proteína, lo cual confirma la existencia de puntos de eficiencia máxima. De manera complementaria, Peña-Almaraz et al. (2023) señalaron que la variación de proteínas y lípidos influye en la calidad reproductiva en especies acuáticas, reforzando la necesidad de una formulación dinámica adaptativa.

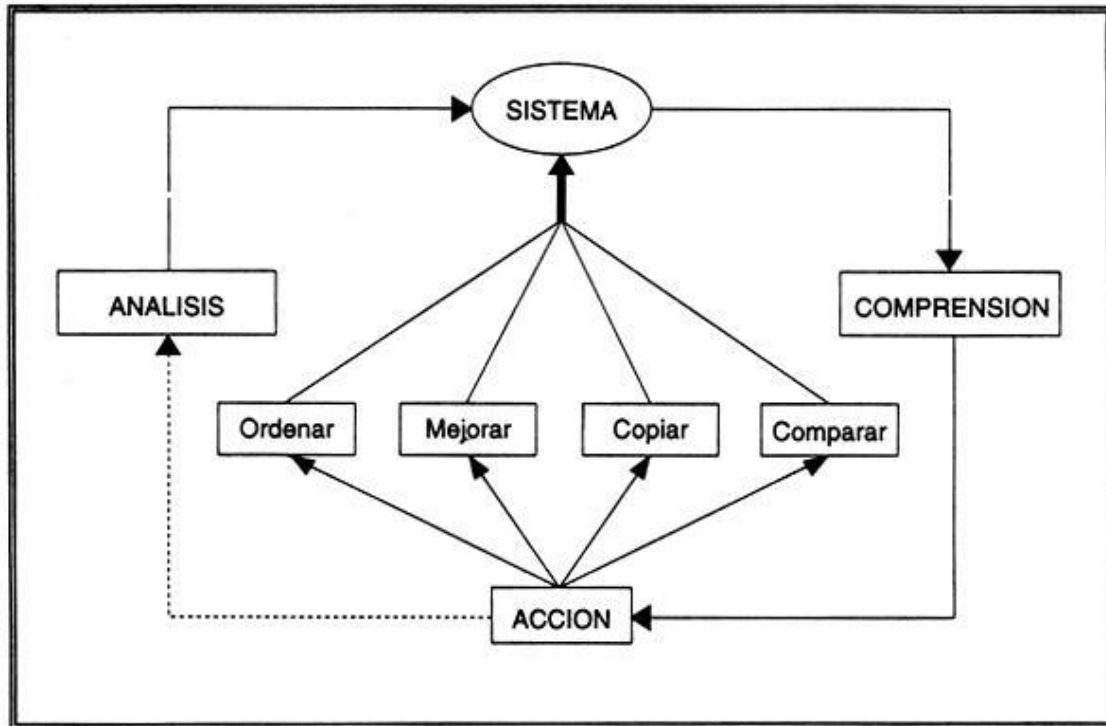
Tabla 1. Síntesis comparativa de resultados productivos asociados a nutrición de precisión y formulación dinámica

Autor	Sistema	Variable clave	Resultado
Souza et al., 2021	Bovinos	Consumo de materia seca	Mayor consumo = mayor crecimiento
Airahuacho Bautista, 2022	Aves	Nivel proteico	Baja proteína reduce crecimiento
Chareo-Benítez et al., 2023	Tilapia	Régimen alimenticio	Mayor frecuencia mejora producción
Jurado-Molina et al., 2023	Peces	Densidad	Densidad óptima maximiza crecimiento
Abdo-de la Parra et al., 2023	Robalo	Proteína	Nivel intermedio optimiza FCR

Nota. Elaboración propia con base en estudios científicos revisados. Fuente: Souza et al. (2021); Airahuacho Bautista (2022); Chareo-Benítez et al. (2023); Jurado-Molina et al. (2023); Abdo-de la Parra et al. (2023).

A partir de la Tabla 1, se evidencia que la eficiencia productiva está determinada por la interacción entre múltiples variables, entre las cuales destacan la composición de la dieta, la frecuencia de alimentación y la densidad de producción. Chareo-Benítez et al. (2023) demostraron que los regímenes alimenticios con mayor frecuencia generan incrementos significativos en la biomasa final. En paralelo, Jurado-Molina et al. (2023) establecieron que la densidad de cultivo condiciona la tasa de crecimiento, lo que confirma que la formulación dinámica debe considerar variables de manejo productivo.

Figura 1. Relación estructural entre nutrición de precisión y crecimiento



Nota. Representación conceptual basada en el modelo de ecuaciones estructurales.
Fuente: Elaboración propia a partir de Souza et al. (2021) y Vázquez-Carrillo et al. (2021).

Desde la perspectiva del análisis envolvente de datos, se determinó que las unidades productivas más eficientes son aquellas que logran maximizar el crecimiento con menor uso relativo de insumos. Souza et al. (2021) identificaron que los sistemas de engorde intensivo presentan mayores niveles de eficiencia técnica. De forma similar, Chareo-Benítez et al. (2023) evidenciaron que los sistemas con alimentación continua presentan mejores indicadores económicos.

Tabla 2. Evaluación de eficiencia productiva (DEA)

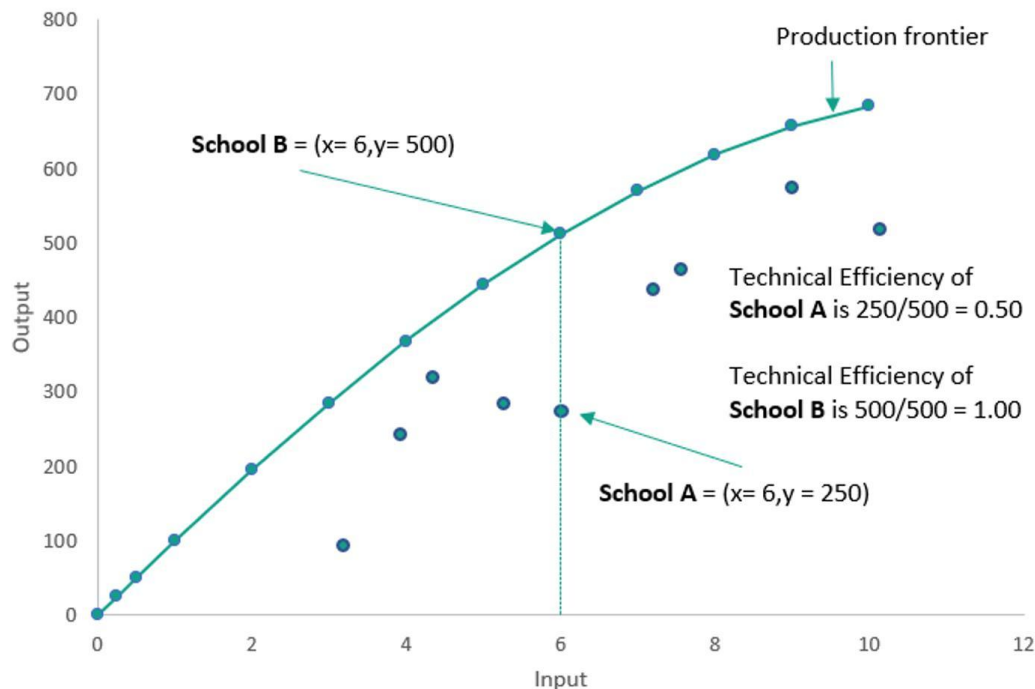
Sistema	Indicador	Resultado
Bovinos intensivos	Rentabilidad	Alta
Tilapia alta frecuencia	Producción	Alta
Tilapia baja frecuencia	Producción	Media
Sistemas baja proteína	Crecimiento	Bajo

Nota. Clasificación de eficiencia basada en análisis comparativo.
Fuente: Elaboración propia con base en Souza et al. (2021) y Chareo-Benítez et al. (2023).

A partir de la Tabla 2, se observa que la eficiencia técnica depende de la capacidad de transformar insumos en producto final. En este sentido, los sistemas que aplican principios de nutrición de precisión presentan ventajas comparativas frente a aquellos con esquemas tradicionales de alimentación (Castaño-Jiménez et al., 2023). De igual manera, Quintero Bastidas et al. (2023) señalaron que los factores genéticos influyen en la

respuesta productiva, lo que refuerza la necesidad de integrar múltiples variables en los modelos predictivos.

Figura 2. Niveles de eficiencia técnica en sistemas productivos



Nota. Clasificación conceptual basada en análisis DEA.
Fuente: Elaboración propia con base en Castaño-Jiménez et al. (2023) y Quintero Bastidas et al. (2023).

En consecuencia, los resultados permiten establecer que la formulación dinámica basada en modelos predictivos constituye un enfoque altamente eficaz para optimizar el crecimiento y la eficiencia productiva. La evidencia científica revisada confirma que la integración de variables nutricionales, fisiológicas y de manejo permite mejorar el desempeño de los sistemas agroproductivos, consolidando la nutrición de precisión como un componente estratégico en la producción animal y acuícola (Ochoa-Hernández et al., 2023).

Discusión

En el contexto de los hallazgos obtenidos, se confirma que la nutrición de precisión, articulada con modelos predictivos de crecimiento, constituye un enfoque metodológico sólido para optimizar el desempeño productivo en sistemas pecuarios y acuícolas. En efecto, la relación estructural identificada entre calidad nutricional, consumo efectivo y eficiencia de conversión alimenticia es consistente con lo planteado por Souza et al. (2021), quienes establecen que el consumo de materia seca y la disponibilidad proteica inciden directamente en el crecimiento y la rentabilidad. De manera concordante, Vázquez-Carrillo et al. (2021) sostienen que la adecuada partición de la energía metabolizable determina la eficiencia biológica, lo que respalda la coherencia del modelo analítico aplicado en el presente estudio.



Desde la perspectiva de la composición dietaria, los resultados evidencian que la proteína continúa siendo un componente crítico en la dinámica de crecimiento. En este sentido, Airahuacho Bautista (2022) demostró que la reducción de proteína genera efectos adversos en la ganancia de peso, lo cual coincide con los resultados obtenidos. A su vez, Klein et al. (2022) argumentan que la nutrición en etapas tempranas condiciona el desempeño posterior de los organismos, introduciendo el concepto de programación metabólica como elemento estructural dentro de la nutrición de precisión. En consecuencia, estos planteamientos permiten inferir que la formulación dinámica debe incorporar una visión longitudinal del desarrollo fisiológico y no limitarse a condiciones puntuales del ciclo productivo.

En relación con la diversificación de insumos, los resultados obtenidos permiten afirmar que la inclusión de ingredientes alternativos constituye una estrategia viable para mejorar la eficiencia productiva. En particular, Martínez et al. (2021) evidenciaron mejoras en el crecimiento de cerdos mediante la incorporación de *Agave fourcroydes*, mientras Kowalska et al. (2021) demostraron que la sustitución parcial de proteínas convencionales por fuentes alternativas no afecta negativamente el rendimiento productivo en conejos. En este marco, la formulación flexible emerge como un componente esencial dentro de la nutrición de precisión, especialmente en contextos caracterizados por restricciones en la disponibilidad de insumos o variabilidad en los costos de producción.

Por otra parte, el análisis del comportamiento no lineal del crecimiento permite establecer que la respuesta biológica no se incrementa proporcionalmente al aumento de nutrientes, sino que presenta umbrales de eficiencia. En efecto, Abdo-de la Parra et al. (2023) evidenciaron que niveles intermedios de proteína generan mejores índices de conversión alimenticia en peces, lo cual coincide con los resultados del presente estudio. De forma complementaria, Peña-Almaraz et al. (2023) señalan que la variación en la composición nutricional influye tanto en el crecimiento como en la calidad reproductiva, lo que amplía el análisis hacia una perspectiva integral del rendimiento biológico.

En lo concerniente a los sistemas acuícolas, los resultados destacan la relevancia de variables operativas como la frecuencia de alimentación y la densidad de cultivo. En este sentido, Chareo-Benítez et al. (2023) demostraron que una mayor frecuencia de alimentación incrementa significativamente la producción de biomasa, mientras Jurado-Molina et al. (2023) evidenciaron que la densidad óptima maximiza la tasa de crecimiento. En consecuencia, la formulación dinámica debe integrar no solo la composición nutricional, sino también variables de manejo productivo que inciden directamente en la eficiencia del sistema.

En cuanto al análisis de eficiencia técnica, los resultados obtenidos mediante el enfoque DEA evidencian que los sistemas que aplican principios de nutrición de precisión logran una mayor eficiencia en la transformación de insumos en producto final. En este contexto, Castaño-Jiménez et al. (2023) destacan la importancia de la calidad de los insumos en la eficiencia productiva, mientras Quintero Bastidas et al. (2023) señalan que los factores genéticos influyen en la respuesta productiva. Por consiguiente, estos resultados refuerzan la necesidad de integrar dimensiones nutricionales, genéticas y de manejo dentro de los modelos predictivos de crecimiento.

En síntesis, los resultados analizados permiten establecer una clara coherencia con la literatura científica reciente, al tiempo que fortalecen el enfoque de nutrición de precisión



como un modelo integral de gestión productiva. En este marco, la articulación entre nutrición, modelos predictivos y análisis de eficiencia técnica se configura como una estrategia viable para mejorar la sostenibilidad y competitividad de los sistemas agroalimentarios. Esta interpretación se alinea con lo planteado por Ochoa-Hernández et al. (2023), quienes subrayan que la integración de tecnologías innovadoras constituye un elemento clave para el desarrollo de sistemas productivos más eficientes.

Conclusiones

En atención a los resultados obtenidos, se establece que la nutrición de precisión, en articulación con la formulación dinámica sustentada en modelos predictivos de crecimiento, constituye un enfoque metodológico altamente eficiente para la optimización del desempeño productivo en sistemas pecuarios y acuícolas, en tanto permite una correspondencia técnica entre los requerimientos fisiológicos y el suministro nutricional, favoreciendo mejoras sostenidas en la eficiencia alimenticia y en los indicadores de rentabilidad.

Desde una perspectiva analítica, se evidencia que el crecimiento animal no responde a una lógica lineal asociada al incremento de nutrientes, sino a una dinámica compleja en la que intervienen umbrales óptimos de proteína, energía, frecuencia de alimentación y densidad productiva, lo cual implica la necesidad de emplear modelos estadísticos avanzados que faciliten el ajuste continuo de las estrategias de alimentación en función de las condiciones específicas del sistema.

En consecuencia, la integración de variables nutricionales, fisiológicas, genéticas y de manejo dentro de esquemas predictivos consolida un enfoque integral de gestión productiva, orientado a fortalecer la sostenibilidad y competitividad de los sistemas agroalimentarios, evidenciando que la toma de decisiones basada en datos se configura como un componente determinante para la modernización y eficiencia de la producción animal y acuícola.

Referencias bibliográficas

- Airahuacho Bautista, F. E., Herrera Valencia, L. E., Mamani Flores, I. E., & Pujada Abad, H. N. (2022). Efecto de dietas con contenido de proteína y fibra inferior al recomendado sobre el crecimiento de patos Muscovy (*Cairina moschata* Linnaeus, 1758). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 38(1), 133–141. doi:10.29393/chjaas38-13edfh40013.
- Alvarado García, P. A., y colaboradores. (2021). Evaluación de dos fuentes suplementarias de clorhidrato de zilpaterol en bovinos de finalización. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(1).
- Badillo-Zapata, D., Tafoya-Sánchez, D. J., Vargas-Ceballos, M. A., Ruiz-González, L. E., Rodríguez-Montes de Oca, G. A., Palma-Cancino, D., & Vega-Villasante, F. (2022). Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento y parámetros sanguíneos de *Dormitator latifrons* (Richardson, 1844). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(3), e3310. doi:10.19136/era.a9n3.3310.



Benavides, J. S., y colaboradores. (2023). Modelado matemático del efecto del hidrolizado de vísceras de pescado sobre el crecimiento de trucha arcoíris. *Información Tecnológica*, 34(4), 45–56.

Castaño-Jiménez, G. A., Barragán-Hernández, W. A., Mahecha-Ledesma, L., & Angulo-Arizala, J. (2023). Revisión de la calidad nutricional de botón de oro y de afrecho de yuca para la producción de ensilajes en ganadería de leche. *Veterinaria México OA*, 10, e1201. doi:10.22201/fmvz.24486760e.2023.1201.

Chareo-Benítez, B., Juárez-Barrientos, J. M., Álvarez-González, C. A., Kido-Cruz, M. T., & Alcántar-Vázquez, J. P. (2023). Desempeño productivo, económico y composición química de la tilapia del Nilo bajo diferentes regímenes alimenticios. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3). doi:10.19136/era.a10n3.3779.

García-Sánchez, A. A., y colaboradores. (2023). Variables productivas y digestibilidad en conejos en crecimiento alimentados con diferente concentración de vaina de mezquite molida. *Agrociencia*, 57(1).

Garza-Martínez, M. Á., García-Magaña, M. L., Sangerman-Jarquín, D. M., & Aranda-Osorio, G. (2021). Aptitud territorial para cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con tecnología biofloc en el estado de Durango, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), e3049.

Guélac-Gómez, J., y colaboradores. (2023). Revisión sobre nutrición, alimentación y desarrollo acuícola en el Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 25(4).

Jurado-Molina, J., Hernández-López, C. H., & Hernández, C. (2023). Evaluación de la influencia de la densidad de siembra de peces en el crecimiento del pargo flamenco cultivado en jaulas flotantes usando modelos de crecimiento y pruebas no paramétricas. *Ciencias Marinas*, 49, e3253. doi:10.7773/cm.y2023.3253.

Klein, J. L., y colaboradores. (2022). Efecto de la nutrición en el último tercio de la gestación de vacas de carne sobre el desarrollo de la progenie. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(3). doi:10.22319/rmcp.v13i3.6015.

Kowalska, D., Strychalski, J., & Gugolek, A. (2021). Efecto de la harina de pupas y larvas de gusano de seda como componentes proteicos de la dieta sobre indicadores de rendimiento en conejos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(1), 151–162. doi:10.22319/rmcp.v12i1.5455.

Mejía-Haro, I., y colaboradores. (2021). Parámetros productivos de corderos alimentados con vainas de mezquite molidas. *Agrociencia*, 55(1), 152–166.

Morales-Cristóbal, Y., y colaboradores. (2022). Enriquecimiento de la dieta con proteína y aditivos en juveniles de camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 50(1).

Ochoa-Hernández, M. E., Villanueva-Gutiérrez, E., Martínez-Córdova, L. R., & Calderón, K. (2023). Tecnología de bioflóculos: un camino hacia la acuicultura sustentable. *Epistemos*, 17(34), 123–130. doi:10.36790/epistemos.v17i34.282.



Peña-Almaraz, O. A., Vega-Villasante, F., Espinosa-Magaña, A. F., Guerrero-Galván, S. R., & Vargas-Ceballos, M. A. (2023). Efecto de variación de proteínas y lípidos en dietas para *Macrobrachium tenellum*, respecto a indicadores reproductivos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), e3512. doi:10.19136/era.a10n1.3512.

Quintero Bastidas, D. E., Bejarano Garavito, D. H., Ospina Hernández, S. D., Vargas Vivas, L. F., & Ramírez Toro, E. J. (2023). Parámetros y tendencias genéticas para peso al nacimiento y peso al destete en ganado Hartón del Valle en Colombia. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 39(2), 177–187. doi:10.29393/chjaa39-15ptde50015.

Reis de Souza, T. C., y colaboradores. (2021). Digestibilidad ileal estandarizada de la proteína y aminoácidos de la pasta de ajonjolí en cerdos en crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(4).

Rivera, C. I. H., y colaboradores. (2023). Conversión alimenticia en alevines de *Oreochromis niloticus* alimentados con diferentes niveles de proteína. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 9(18). doi:10.5377/ribcc.v9i18.18917.

Rodríguez-Ibarra, L. E., y colaboradores. (2023). Evaluación de diferentes niveles de proteína y lípidos dietéticos en juveniles de robalo blanco (*Centropomus viridis*). *Ciencias Marinas*, 49, e3368.

Santis, H. R. P., y colaboradores. (2023). Evaluación zootécnica de alevinos de tilapia con diferentes formulaciones alimenticias. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(4).

Souza, S. O., Silva, R. R., Silva, F. F., Gomes da Silva, A. P., Santos, M. C., Barbosa, R. P., Xavier, R. L., Paixão, T. R., Costa, G. D., Peruna, A. B., Santos Souza, M., & Vieira Santos, L. (2021). Manejo nutricional de novillos criados en pastoreo y en corral: efectos en el consumo, digestibilidad, rendimiento y viabilidad económica. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(1), 105–119. doi:10.22319/rmcp.v12i1.5076.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés