



Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

Applications of Newton's Second Law in Agricultural Engineering: a documentary review on machinery dynamics and grain transport

Aplicações da Segunda Lei de Newton na Engenharia Agropecuária: revisão documental sobre dinâmica de máquinas e transporte de grãos

AUTORES:

William Adolfo Valverde Lucio

Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador.

william.valverde@unesum.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-6033-558X>

Pedro Roberto Valdés Tamayo

Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador.

pedro.valdes@unesum.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7264-0440>

Williams Ausberto Merchán García³

Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador.

william.merchan@unesum.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6910-5885>

Edgar Mauro Caicedo Álvarez

Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador.

mauro.caicedo@unesum.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-6354-3307>

Fecha de recepción: 2025-12-17

Fecha de aceptación: 2026-02-02

Fecha de publicación: 2026-04-06

DOI: <https://doi.org/10.33936/cognosis.v11i2.8613>

RESUMEN

La segunda ley de Newton continúa siendo uno de los fundamentos más importantes para comprender el comportamiento dinámico de numerosos procesos presentes en la ingeniería agropecuaria. A partir de esta premisa, el presente estudio tuvo como objetivo analizar las principales contribuciones científicas relacionadas con la dinámica de maquinaria agrícola y el comportamiento de materiales granulares durante operaciones de transporte y almacenamiento. La investigación se desarrolló mediante una revisión documental sustentada en la consulta de bases de datos académicas de reconocido prestigio, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, MDPI y Google Scholar. La búsqueda se concentró principalmente en publicaciones comprendidas entre 2015 y 2025, complementadas con obras clásicas consideradas esenciales para la fundamentación teórica y metodológica del tema. Los documentos seleccionados fueron organizados en categorías vinculadas con dinámica de maquinaria agrícola, materiales granulares y técnicas de simulación numérica basadas en DEM, CFD, FEM y MBD. El análisis realizado permitió identificar un amplio predominio del método de elementos discretos en el estudio de materiales granulares, así como un crecimiento progresivo de enfoques multiphysics orientados a integrar partículas, fluidos y estructuras mecánicas. Asimismo, se identificaron aplicaciones relevantes relacionadas con la optimización de equipos agrícolas, la mejora de la estabilidad operativa y la reducción del daño mecánico durante el manejo de granos. Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de principios de dinámica clásica y herramientas modernas de simulación constituye una alternativa prometedora para el desarrollo de sistemas agroindustriales más eficientes y sostenibles.

PALABRAS CLAVE: dinámica; ingeniería agrícola; maquinaria agrícola; materiales granulares; simulación numérica.

ABSTRACT

Newton's Second Law remains one of the most important foundations for understanding the dynamic behavior of numerous processes involved in agricultural engineering. Based on this premise, the present study aimed to analyze the main scientific contributions related to agricultural machinery dynamics and the behavior of granular materials during transport and storage operations. The research was conducted through a documentary review based on the consultation of internationally recognized academic databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, MDPI, and Google Scholar. The search focused primarily on publications from 2015 to 2025, complemented by classical reference

Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

William Adolfo Valverde Lucio, Pedro Roberto Valdés Tamayo, Williams Ausberto Merchán García, Edgar Mauro Caicedo Álvarez

works considered essential for the theoretical and methodological foundation of the topic. The selected documents were organized into categories related to agricultural machinery dynamics, granular materials, and numerical simulation techniques based on DEM, CFD, FEM, and MBD approaches. The analysis revealed a strong predominance of the Discrete Element Method in the study of granular materials, as well as a progressive increase in multiphysics approaches aimed at integrating particles, fluids, and mechanical structures. Relevant applications were also identified in agricultural equipment optimization, operational stability improvement, and the reduction of mechanical grain damage during handling processes. The findings suggest that the combination of classical dynamics principles and modern simulation tools represents a promising alternative for the development of more efficient and sustainable agro-industrial systems.

KEYWORDS: dynamics; agricultural engineering; agricultural machinery; granular materials; numerical simulation.

RESUMO

A segunda lei de Newton continua sendo um dos fundamentos mais importantes para compreender o comportamento dinâmico de numerosos processos presentes na engenharia agropecuária. Com base nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo analisar as principais contribuições científicas relacionadas à dinâmica de máquinas agrícolas e ao comportamento de materiais granulares durante operações de transporte e armazenamento. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão documental fundamentada na consulta de bases de dados acadêmicas de reconhecido prestígio, entre elas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, MDPI e Google Scholar. A busca concentrou-se principalmente em publicações compreendidas entre 2015 e 2025, complementadas por obras clássicas consideradas essenciais para a fundamentação teórica e metodológica do tema. Os documentos selecionados foram organizados em categorias vinculadas à dinâmica de máquinas agrícolas, materiais granulares e técnicas de simulação numérica baseadas em DEM, CFD, FEM e MBD. A análise realizada permitiu identificar um amplo domínio do método dos elementos discretos no estudo de materiais granulares, bem como um crescimento progressivo de abordagens multiphysics voltadas à integração entre partículas, fluidos e estruturas mecânicas. Também foram identificadas aplicações relevantes relacionadas à otimização de equipamentos agrícolas, ao aprimoramento da estabilidade operacional e à redução dos danos mecânicos durante o manejo de grãos. Os resultados sugerem que a combinação entre princípios da dinâmica clássica e ferramentas modernas de simulação constitui uma alternativa promissora para o desenvolvimento de sistemas agroindustriais mais eficientes e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: dinâmica; engenharia agrícola; máquinas agrícolas; materiais granulares; simulação numérica.

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión del movimiento y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos constituye uno de los pilares de la ingeniería moderna. Dentro de este marco, la

segunda ley de Newton ha mantenido una vigencia notable debido a su capacidad para explicar y predecir el comportamiento dinámico de sistemas físicos sometidos a diferentes condiciones de operación. Su formulación matemática no solo permite describir fenómenos relacionados con aceleración y fuerza, sino que también sirve como base para el desarrollo de modelos aplicados a la ingeniería mecánica, agrícola y agroindustrial (Hibbeler, 2016; Meriam & Kraige, 2018).

En el ámbito agropecuario, numerosos procesos dependen directamente de la interacción entre fuerzas mecánicas, materiales y estructuras. La operación de tractores, sembradoras, cosechadoras e implementos agrícolas involucra condiciones dinámicas complejas caracterizadas por variaciones de carga, vibraciones, esfuerzos mecánicos e interacción continua con el suelo. De manera paralela, los materiales granulares, como granos y semillas, presentan comportamientos particulares derivados de las fuerzas de contacto y fricción que se generan entre partículas, lo que influye significativamente en los procesos de almacenamiento, transporte y manipulación (Horabik & Molenda, 2016).

Diversos autores han destacado que el análisis dinámico resulta indispensable para comprender fenómenos asociados con estabilidad, tracción, resistencia al avance y eficiencia energética de la maquinaria agrícola. Los aportes de la literatura clásica en mecanización agrícola y dinámica vehicular han permitido consolidar una base conceptual sólida para el diseño y optimización de equipos destinados a la producción agropecuaria (Srivastava et al., 2006; Wong, 2008).

Durante los últimos años, el avance de la capacidad computacional ha transformado la forma en que estos fenómenos son estudiados. Métodos numéricos como el método de elementos discretos (DEM), la dinámica de fluidos computacional (CFD), el método de elementos finitos (FEM) y la dinámica multicuerpo (MBD) han ampliado considerablemente las posibilidades de análisis, permitiendo representar procesos complejos con niveles de detalle antes difíciles de alcanzar (Guo & Xia, 2023; Yang et al., 2023).

Las investigaciones desarrolladas en este campo muestran que la modelación numérica contribuye a mejorar el diseño de maquinaria, optimizar procesos de transporte de granos y comprender de manera más precisa las interacciones entre partículas, fluidos y estructuras. No obstante, los estudios continúan desarrollándose de forma relativamente fragmentada, concentrándose en áreas específicas sin integrar plenamente los diferentes componentes que participan en los sistemas agroindustriales.

A partir de esta realidad surge la necesidad de disponer de una visión más amplia que permita relacionar los aportes provenientes de la dinámica de maquinaria agrícola, el estudio de materiales granulares y las herramientas modernas de

Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

William Adolfo Valverde Lucio, Pedro Roberto Valdés Tamayo, Williams Ausberto Merchán García, Edgar Mauro Caicedo Álvarez

simulación. En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue analizar las aplicaciones de la segunda ley de Newton en la ingeniería agropecuaria mediante una revisión documental orientada a identificar tendencias metodológicas, contribuciones relevantes y desafíos actuales asociados con la dinámica de maquinaria agrícola y el transporte de materiales granulares.

2. MÉTODOS

La investigación se desarrolló mediante una revisión documental de enfoque cualitativo con criterios sistemáticos orientados al análisis de literatura científica relacionada con la aplicación de la segunda ley de Newton en la ingeniería agropecuaria.

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas de alto impacto, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, MDPI y Google Scholar. Para la localización de documentos se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como *Newton's second law*, *granular materials*, *agricultural machinery*, *grain transport*, *DEM*, *CFD*, *FEM* y *multibody dynamics*.

El período de análisis comprendió publicaciones entre 2015 y 2025, priorizando artículos indexados revisados por pares y documentos con información bibliográfica verificable. Adicionalmente, se incorporaron obras clásicas publicadas antes de 2015 cuando resultaron fundamentales para el sustento conceptual y metodológico del estudio.

El proceso de selección incluyó revisión de títulos, resúmenes y textos completos. Como criterios de inclusión se consideraron: pertinencia temática, aplicación de principios dinámicos en sistemas agropecuarios, uso de herramientas de simulación numérica y disponibilidad de DOI o fuente verificable. Se excluyeron documentos duplicados, trabajos sin revisión por pares y estudios con escasa relación con la temática central.

Después del proceso de depuración y análisis de relevancia, se seleccionaron 42 documentos científicos para la revisión final. Los estudios fueron organizados en tres categorías principales:

1. Dinámica de maquinaria agrícola.
2. Comportamiento de materiales granulares.
3. Modelación numérica mediante DEM, CFD, FEM y MBD.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo orientado a identificar tendencias metodológicas, aplicaciones tecnológicas, limitaciones de los modelos y principales aportes científicos relacionados con la dinámica de sistemas agroindustriales.

3. RESULTADOS

3.1 Dinámica de maquinaria agrícola

Los estudios analizados evidencian que la segunda ley de Newton continúa siendo el fundamento principal para el análisis dinámico de maquinaria agrícola. Investigaciones recientes muestran que el modelado dinámico permite optimizar fuerzas de tracción, distribución de cargas y estabilidad operativa en tractores e implementos agrícolas (Ucgul et al., 2017).

Asimismo, la dinámica multicuerpo (MBD) ha permitido representar sistemas mecánicos complejos considerando múltiples grados de libertad e interacciones dinámicas entre componentes. Este enfoque ha facilitado el análisis de vibraciones, estabilidad estructural y comportamiento dinámico global en maquinaria agrícola sometida a condiciones reales de operación (Shabana, 2013).

Por otra parte, estudios recientes integran dinámica multicuerpo con modelos de partículas para representar simultáneamente el comportamiento mecánico de equipos agrícolas y el flujo de materiales granulares. Zhang et al. (2024) desarrollaron un modelo DEM-MBD aplicado al transporte de partículas de semilla, demostrando mejoras significativas en la distribución del flujo y en la eficiencia de sistemas de dosificación agrícola.

3.2 Materiales granulares y transporte de granos

El comportamiento de materiales granulares constituye una de las áreas de mayor desarrollo dentro de la ingeniería agropecuaria moderna. Las investigaciones revisadas indican que variables como humedad, rugosidad superficial, geometría y fuerzas de contacto influyen significativamente en el flujo granular durante procesos de almacenamiento y transporte (Horabik & Molenda, 2016).

En este contexto, el método de elementos discretos se ha consolidado como la principal herramienta para modelar fenómenos de compactación, segregación y formación de arcos en silos y tolvas (Coetzee, 2017). Las simulaciones DEM permiten calcular trayectorias, velocidades y aceleraciones individuales de partículas a partir de las ecuaciones de movimiento derivadas de la segunda ley de Newton.

Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que los modelos DEM permiten predecir el daño mecánico de granos durante procesos de manipulación y transporte. Chen et al. (2022) desarrollaron y validaron un modelo aplicado al impacto de granos de maíz, obteniendo alta correspondencia entre resultados simulados y datos experimentales.

El estudio de los materiales granulares también se apoya en fundamentos clásicos sobre estática y cinemática de partículas, los cuales explican fenómenos como compactación, fricción interna, segregación y formación de arcos durante el almacenamiento y transporte. En este sentido, Nedderman (2005) aporta una base teórica relevante para comprender la mecánica granular, mientras que Orefice et al. (2020) identifican desafíos actuales relacionados con la modelación del flujo granular en sistemas complejos.

3.3 Tendencias en modelación numérica

Los resultados muestran un predominio del método DEM en el análisis de materiales granulares debido a su elevada capacidad para representar interacciones partícula-partícula y partícula-estructura (Guo & Xia, 2023).

De igual manera, se observa un crecimiento sostenido de enfoques multiphysics orientados a integrar diferentes métodos numéricos. El acoplamiento DEM-CFD ha permitido analizar interacción aire-partículas en sistemas de ventilación y transporte neumático, mientras que los modelos DEM-FEM facilitan el análisis estructural de silos sometidos a cargas dinámicas generadas por materiales granulares (Yang et al., 2023).

Además, revisiones recientes destacan que la integración DEM-CFD-FEM-MBD representa una tendencia emergente en ingeniería agropecuaria, ya que permite abordar problemas complejos desde una perspectiva multiescala (Maraveas et al., 2025).

De forma complementaria, los modelos acoplados DEM-CFD han demostrado utilidad en sistemas donde coexisten partículas y fluidos, como ventilación, secado y transporte neumático de granos. Kloss et al. (2012) aportan fundamentos computacionales para la validación de modelos DEM-CFD, mientras que Delele et al. (2016) resaltan su aplicación en procesos particulados propios de la ingeniería agrícola.

El desarrollo del método de elementos discretos ha estado acompañado por avances metodológicos relacionados con la representación matemática de partículas, modelos de contacto y condiciones de frontera. O'Sullivan (2011) destaca que el DEM permite representar con precisión las interacciones entre partículas

discretas, mientras que Li et al. (2022) evidencian su creciente aplicación en maquinaria agrícola, sistemas de dosificación, transporte de semillas y procesos poscosecha.

Tabla 1. Principales estudios analizados sobre dinámica de maquinaria agrícola y comportamiento de materiales granulares

Autor(es)	Año	Método	Objeto de estudio	Principal aporte
Horabik y Molenda	2016	DEM	Granos	Propiedades mecánicas
Coetzee	2017	DEM	Partículas	Modelación granular
Zhao et al.	2021	DEM-CFD	Silos	Interacción fluido-partícula
Guo y Xia	2023	DEM	Flujo granular	Simulación avanzada
Yang et al.	2023	DEM-FEM	Silos	Esfuerzos estructurales
Ucgu et al.	2017	MBD	Tractores	Interacción suelo-herramienta
Zhang et al.	2024	DEM-MBD	Semillas	Regulación de flujo granular

En la Tabla 1 se observa un predominio del método de elementos discretos (DEM), aplicado al análisis de granos, partículas, semillas y flujos granulares, lo que evidencia su utilidad para caracterizar propiedades mecánicas y simular el movimiento e interacción de materiales particulados. Asimismo, la combinación del DEM con otros métodos, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), el método de elementos finitos (FEM) y la dinámica multicuerpo (MBD), ha permitido estudiar fenómenos más complejos, entre ellos la interacción fluido-partícula en silos, los esfuerzos estructurales y la regulación del flujo de semillas. Por su parte, el uso del MBD en tractores aporta al análisis de la interacción entre el suelo y las herramientas agrícolas. En conjunto, los estudios muestran una evolución hacia modelos integrados y simulaciones avanzadas que permiten comprender y optimizar el funcionamiento de los sistemas y equipos agrícolas.

Tabla 2. Comparación de métodos numéricos utilizados en sistemas agropecuarios

Método	Principio	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
DEM	Dinámica de partículas	de Flujo granular	Alta precisión	Alto costo computacional
CFD	Ecuaciones fluidos	de Transporte neumático	Modela fluidos	Limitado para partículas
FEM	Elementos finitos	Análisis estructural	Precisión mecánica	No representa flujo granular
MBD	Sistemas multicuerpo	Maquinaria agrícola	Modela sistemas complejos	Baja representación granular

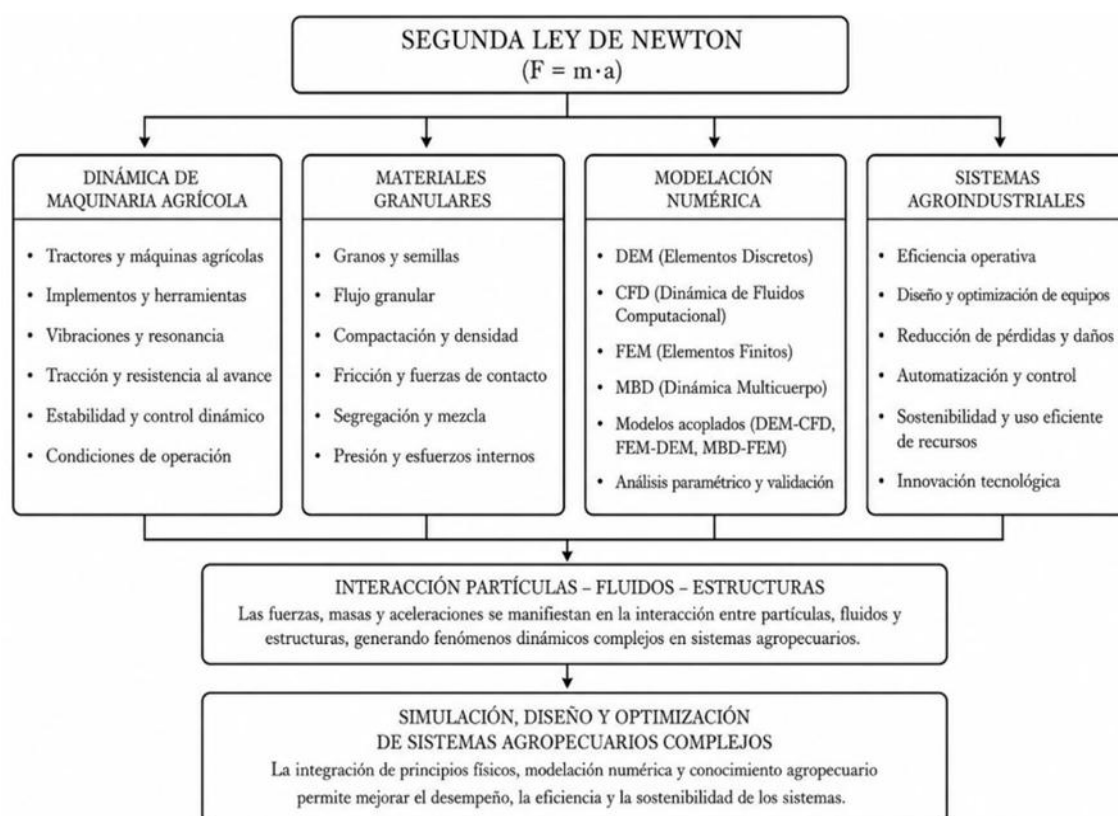
Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

William Adolfo Valverde Lucio, Pedro Roberto Valdés Tamayo, Williams Ausberto Merchán García, Edgar Mauro Caicedo Álvarez

La Tabla 2 presenta una comparación de los principales métodos numéricos empleados en el estudio de sistemas agropecuarios. El método de elementos discretos (DEM) se fundamenta en la dinámica individual de las partículas y ofrece alta precisión para simular flujos granulares, aunque requiere una elevada capacidad computacional. La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite modelar el comportamiento de fluidos en aplicaciones como el transporte neumático, pero su representación de partículas sólidas es limitada. El método de elementos finitos (FEM) destaca por su precisión en el análisis mecánico y estructural, aunque no resulta apropiado para reproducir el movimiento de materiales granulares.

Por su parte, la dinámica multicuerpo (MBD) facilita el análisis de maquinaria agrícola y sistemas mecánicos complejos, pero presenta limitaciones para describir el comportamiento granular. Estas diferencias evidencian que ningún método responde por sí solo a todos los fenómenos presentes en los sistemas agropecuarios, por lo que su selección o combinación debe realizarse en función del objeto de estudio y de las variables que se pretenden analizar.

Figura 1. Modelo conceptual de la dinámica integrada en sistemas agropecuarios basado en la segunda ley de Newton



La Figura 1 representa un modelo conceptual de la dinámica integrada en los sistemas agropecuarios, sustentado en la segunda ley de Newton, que relaciona las fuerzas aplicadas con la masa y la aceleración de los cuerpos. Este principio articula cuatro componentes fundamentales: la dinámica de la maquinaria agrícola, el comportamiento de los materiales granulares, la modelación numérica y los sistemas agroindustriales. La interacción entre estos componentes permite analizar fenómenos como la tracción, las vibraciones, el flujo y la compactación de granos, las fuerzas de contacto y los esfuerzos estructurales mediante métodos como DEM, CFD, FEM y MBD, tanto de forma independiente como acoplada.

En conjunto, el modelo evidencia que la interacción entre partículas, fluidos y estructuras constituye la base para simular, diseñar y optimizar sistemas agropecuarios complejos, con el propósito de mejorar su desempeño operativo, reducir pérdidas, automatizar procesos y favorecer el uso eficiente y sostenible de los recursos.

Los resultados evidencian que la segunda ley de Newton actúa como eje articulador entre dinámica de maquinaria, comportamiento granular y modelación multiphysics, permitiendo comprender el comportamiento global de sistemas agroindustriales complejos.

4. DISCUSIÓN

El análisis de la literatura consultada permite afirmar que la segunda ley de Newton continúa siendo uno de los fundamentos más sólidos para interpretar el comportamiento dinámico de los sistemas agropecuarios. Lejos de limitarse a una formulación teórica clásica, este principio sigue sustentando una gran parte de las herramientas de simulación empleadas actualmente para resolver problemas vinculados con maquinaria agrícola, transporte de materiales granulares y optimización de procesos productivos.

Los estudios revisados muestran que la evolución tecnológica ha favorecido una integración cada vez mayor entre los principios de la mecánica clásica y los métodos computacionales avanzados. Desde esta perspectiva, la dinámica ya no se entiende únicamente como una herramienta para describir el movimiento, sino también como un recurso para predecir el comportamiento de sistemas complejos y apoyar la toma de decisiones en ingeniería. En esta línea, los aportes de Shigley et al. (2020), Fielke (2019) y Hu et al. (2023) evidencian cómo la modelación dinámica se ha convertido en un componente esencial para el diseño y evaluación de soluciones tecnológicas aplicadas al sector agropecuario.

Uno de los aspectos más destacados de la revisión es la consolidación del método de elementos discretos como herramienta de referencia para el estudio de

Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

William Adolfo Valverde Lucio, Pedro Roberto Valdés Tamayo, Williams Ausberto Merchán García, Edgar Mauro Caicedo Álvarez

materiales granulares. La elevada capacidad del DEM para representar interacciones entre partículas ha permitido mejorar la comprensión de fenómenos asociados con flujo, compactación y transporte de granos. Los resultados obtenidos coinciden con lo señalado por Guo y Xia (2023), quienes destacan la importancia de este método en el desarrollo de simulaciones cada vez más realistas.

De igual manera, la incorporación de modelos acoplados DEM-CFD y DEM-FEM refleja una tendencia orientada hacia enfoques integradores capaces de representar simultáneamente distintos fenómenos físicos. Esta evolución metodológica resulta especialmente relevante para la ingeniería agropecuaria, donde los procesos productivos suelen involucrar la interacción permanente entre partículas, fluidos y estructuras mecánicas.

A pesar de los avances observados, la revisión también permitió identificar limitaciones que continúan representando desafíos para la investigación futura. Entre ellas destacan la complejidad asociada a la calibración de parámetros en modelos DEM, los elevados requerimientos computacionales de ciertas simulaciones y la necesidad de incrementar los estudios de validación experimental en condiciones reales de operación. Estas limitaciones adquieren particular importancia en contextos tropicales y latinoamericanos, donde la disponibilidad de información especializada aún resulta limitada.

Finalmente, la evidencia recopilada muestra que la simulación dinámica puede desempeñar un papel relevante en la reducción de pérdidas asociadas al manejo de granos. Los resultados reportados por Wang et al. (2024) indican que las fuerzas de contacto ejercen una influencia directa sobre el daño mecánico del producto, lo que refuerza la necesidad de incorporar criterios dinámicos durante el diseño y evaluación de equipos destinados al transporte y almacenamiento agrícola.

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado permitió constatar que la segunda ley de Newton continúa siendo un elemento central para el análisis y comprensión de numerosos procesos presentes en la ingeniería agropecuaria. Su aplicación sigue proporcionando una base sólida para interpretar fenómenos relacionados con maquinaria agrícola, materiales granulares y sistemas de transporte utilizados en la actividad productiva.

La revisión efectuada mostró que el método de elementos discretos ocupa actualmente una posición predominante dentro de las herramientas de simulación utilizadas para el estudio de materiales granulares. Paralelamente, se identificó un crecimiento sostenido de enfoques multiphysics que integran DEM, CFD, FEM y

MBD con el propósito de representar sistemas agroindustriales cada vez más complejos.

Otro hallazgo relevante fue la contribución de la modelación dinámica al mejoramiento del desempeño operativo de la maquinaria agrícola y a la reducción de pérdidas durante el manejo de granos y semillas. Los avances observados evidencian que la simulación numérica constituye una herramienta estratégica para apoyar procesos de diseño, evaluación y optimización tecnológica.

No obstante, persisten desafíos relacionados con la validación experimental de modelos, la disponibilidad de información específica para contextos tropicales y la necesidad de fortalecer los procedimientos de calibración empleados en simulaciones avanzadas. Estos aspectos representan oportunidades de investigación que podrían favorecer una mayor transferencia de resultados hacia escenarios reales de producción.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten sostener que la articulación entre fundamentos mecánicos clásicos y tecnologías modernas de simulación continuará desempeñando un papel relevante en el desarrollo de soluciones innovadoras orientadas a incrementar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de los sistemas agroindustriales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Estatal del Sur de Manabí por el apoyo académico brindado durante el desarrollo de la presente investigación.

6. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionado con esta investigación y que no ha recibido financiamiento externo que pudiera influir en los resultados presentados.

7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Autor 1	Conceptualización, investigación, metodología, búsqueda y selección bibliográfica, análisis formal, curación de datos, elaboración de tablas y figura conceptual, redacción del borrador original, revisión y edición final del manuscrito.
Autor 2	Asesoría metodológica, validación científica del contenido, revisión crítica del marco conceptual, supervisión académica y revisión del manuscrito.

Aplicaciones de la Segunda Ley de Newton en la Ingeniería Agropecuaria: revisión documental sobre dinámica de maquinaria y transporte de granos

William Adolfo Valverde Lucio, Pedro Roberto Valdés Tamayo, Williams Ausberto Merchán García, Edgar Mauro Caicedo Álvarez

- Autor 3 Apoyo en la búsqueda y selección de literatura científica, validación de referencias bibliográficas, revisión técnica del contenido y edición del manuscrito.
- Autor 4 Revisión académica del documento, análisis crítico de resultados y discusión, validación de la coherencia científica y revisión final del manuscrito.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, Z., Wassgren, C., & Ambrose, R. P. K. (2022). Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels. *Biosystems Engineering*, 224, 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.09.012>
- Coetzee, C. J. (2017). Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.076>
- Delele, M. A., Tijssens, E., & Ramon, H. (2016). On modeling and simulation of particulate processes in agricultural engineering. *Biosystems Engineering*, 145, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.001>
- Fielke, J. M. (2019). Soil–tool interaction modeling in agricultural engineering. *Soil and Tillage Research*, 189, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.009>
- Guo, Y., & Xia, J. (2023). Discrete element modeling of granular materials in agricultural engineering: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107746. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107746>
- Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Dynamics* (14th ed.). Pearson.
- Horabik, J., & Molenda, M. (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Powder Technology*, 293, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.043>
- Hu, M., Gao, T., Dong, X., Tan, Q., Yi, C., Wu, F., & Bao, A. (2023). Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*, 229, 105671. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671>
- Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., & Pirker, S. (2012). Models, algorithms and validation for DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 12(2–3), 140–152. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2012.047457>
- Li, Y., Xu, L., & Qiu, Z. (2022). Advances in DEM applications in agricultural machinery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107085>
- Maraveas, C., Tsigkas, N., & Bartzanas, T. (2025). Agricultural processes simulation using discrete element method: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110733>
- Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2018). *Engineering mechanics: Dynamics* (8th ed.). Wiley.
- Nedderman, R. M. (2005). *Statics and kinematics of granular materials*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511617542>

- Orefice, L., Ketterhagen, W. R., & Hancock, B. C. (2020). Granular flow modeling: Current challenges. *Powder Technology*, 360, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.034>
- O'Sullivan, C. (2011). *Particulate discrete element modelling: A geomechanics perspective*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10826>
- Shabana, A. A. (2013). *Dynamics of multibody systems* (4th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107337219>
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2020). *Mechanical engineering design* (11th ed.). McGraw-Hill.
- Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2006). *Engineering principles of agricultural machines* (2nd ed.). ASABE.
- Ucgul, M., Fielke, J. M., & Saunders, C. (2017). Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: Accounting for soil cohesion and adhesion. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.001>
- Wang, L., Zhang, S., & Chen, X. (2024). DEM simulation of grain damage during handling. *Biosystems Engineering*, 235, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.01.005>
- Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470172571>
- Yang, W., Li, Y., & Wang, X. (2023). Coupled DEM–FEM modeling of granular flow and structural interaction in silos. *Computers & Structures*, 279, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.106969>
- Zhang, B., Wang, J., Yang, X., & Chen, B. (2024). A DEM-MBD based method for regulating transfer flux in the supply and discharge of cane seed particles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108732>
- Zhao, Y., Gong, Z., & Zhang, R. (2021). Coupled DEM–CFD simulation of grain flow in storage and handling systems. *Biosystems Engineering*, 205, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.005>