

Revisión de alcance

## Modelos musculoesqueléticos de columna lumbar de OpenSim en el análisis de levantamientos de cargas: Una revisión de alcance

Musculoskeletal Models of the Lumbar Spine in OpenSim for Load Lifting Analysis: Scoping Reviews

Jhon Alexander Quiñones Preciado<sup>1</sup>, Stefania Peñuela Arango<sup>1</sup>,  
Laura Marquéz García<sup>1</sup>, Lessby Gómez Salazar<sup>2</sup>

Received: 28 junio 2024

Accepted: 09 septiembre 2024

### Resumen

**Introducción:** La prevalencia del dolor lumbar en trabajadores constituye un desafío global con impacto económico y social considerable. Aunque OpenSim ofrece potencial para analizar levantamientos de carga en la columna lumbar, las revisiones actuales son insuficientes.

**Objetivo:** Identificar la literatura existente sobre modelos musculoesqueléticos de columna lumbar en OpenSim y su aplicación en el análisis de levantamientos de carga.

**Métodos:** Se realizó una revisión sistemática exploratoria siguiendo el marco metodológico propuesto por Arskey y O'Malley por Levac et al, además de las directrices PRISMA. La búsqueda abarcó 7 bases de datos y se aplicaron criterios específicos de inclusión y exclusión. Los artículos fueron seleccionados y verificados por dos revisores.

**Resultados:** De 697 artículos revisados, 18 fueron seleccionados como elegibles, presentando 5 modelos para el análisis del levantamiento de carga, con la participación de 11 individuos sanos. Destaca el modelo de Akhavanfar et al., validado para tareas dinámicas de elevación/descenso, prometiendo una estimación más precisa de las cargas espinales. Esta mejora podría tener implicaciones significativas en la ergonomía laboral, previniendo lesiones.

**Conclusiones:** El uso de modelos musculoesqueléticos en OpenSim representa un avance clave en la investigación, ofreciendo herramientas para mejorar la comprensión y gestión de la salud de los trabajadores, con potencial para impulsar intervenciones ergonómicas más efectivas.

### Abstract

**Introduction:** The prevalence of low back pain among workers constitutes a global challenge with considerable economic and social impact. Although OpenSim offers potential for analyzing load lifting in the lumbar spine, current reviews are insufficient.

**Objective:** To identify the existing literature on musculoskeletal models of the lumbar spine in OpenSim and their application in load lifting analysis.

**Methods:** An exploratory systematic review was conducted following the methodological framework proposed by Arskey and O'Malley and Levac et al., in addition to PRISMA guidelines. The search covered 7 databases, applying specific inclusion and exclusion criteria. Articles were selected and verified by two reviewers.

**Results:** Out of 697 articles reviewed, 18 were deemed eligible, presenting 5 models for load lifting analysis, involving 11 healthy individuals. Notably, the model by Akhavanfar et al., validated for dynamic lifting/lowering tasks, promises a more accurate estimation of spinal loads. This improvement could have significant implications in occupational ergonomics, preventing injuries.

**Conclusions:** The use of musculoskeletal models in OpenSim represents a key advancement in research, offering tools to enhance the understanding and management of workers' health, with the potential to drive more effective ergonomic interventions.

**Palabras clave:** Levantamiento de cargas, OpenSim, Columna Lumbar.

**Key words:** Load lifting, OpenSim, Lumbar Spine

<sup>1</sup> Escuela de Ciencias Básicas, Facultad de Salud, Universidad del Valle, Cali, Colombia

<sup>2</sup> Escuela de Rehabilitación Humana, Facultad de Salud, Universidad del Valle, Cali, Colombia

**Autor de correspondencia:** Jhon Alexander Quiñones Preciado . Correo: [quinones.jhon@correounivalle.edu.co](mailto:quinones.jhon@correounivalle.edu.co)

## Introducción

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) constituyen alteraciones físicas y funcionales que afectan a miles de empleados en todo el mundo. <sup>1</sup> Según estudios a nivel global, los TME ocupan los primeros lugares en frecuencia entre las patologías de origen ocupacional, lo que se traduce en altos índices de ausentismo laboral y costos elevados en la atención secundaria y terciaria. <sup>2,3</sup> La Organización Internacional del Trabajo (OIT) señala que los TME son uno de los principales problemas de salud laboral, tanto en países industrializados como en aquellos en vías de desarrollo. <sup>4</sup>

Dentro del ámbito de los trastornos musculoesqueléticos (TME), el dolor lumbar se destaca como una de las principales preocupaciones laborales debido a su alta prevalencia en la población trabajadora a nivel mundial. Se ha documentado que aproximadamente el 37% de los episodios de dolor lumbar están directamente relacionados con la actividad laboral. <sup>5</sup> Diversas Investigaciones han evidenciado una prevalencia notable de trastornos musculoesqueléticos en la columna y los miembros superiores en actividades laborales que implican el manejo y manipulación manual de cargas, siendo la carga física del trabajo el factor principal en este fenómeno. <sup>6</sup> Este tipo de dolor está estrechamente vinculado con una variedad de afecciones musculoesqueléticas, como los trastornos del disco intervertebral y hernias discales.

En Colombia, el dolor lumbar se convierte en un problema económico y social prioritario, manifestándose en días de ausentismo laboral, pérdidas de productividad y gastos médicos. <sup>7</sup> Lo que lo hace prioritario para intervenciones preventivas, especialmente en el ámbito ocupacional y ergonómico.

La cuantificación de la biomecánica de la columna lumbar es un factor importante para comprender lesiones, dolor y discapacidad. <sup>6</sup> En este contexto, se han empleado diversos métodos para medir las cargas en la columna lumbar, entre ellos, las simulaciones musculoesqueléticas. Estas simulaciones utilizan modelos que ofrecen una representación matemática del sistema musculoesquelético humano, abarcando segmentos, articulaciones, músculos y componentes funcionales como el movimiento articular, la geometría muscular y la capacidad de generar fuerza. <sup>8</sup>

Entre los recursos disponibles, se destaca OpenSim, una plataforma de simulación y modelado de código abierto que alberga una amplia biblioteca de modelos musculoesqueléticos. Sin embargo, a pesar del potencial de OpenSim en el análisis de la columna lumbar durante levantamientos de carga, las revisiones existentes no proporcionan una visión completa ni detallada de sus avances recientes. Tampoco exploran exhaustivamente los campos de aplicación de esta herramienta ni las características y disponibilidad de sus modelos musculoesqueléticos específicos para la columna lumbar en el levantamiento de carga. Aunque autores como Beaucage-Gauvreau et al. <sup>6</sup>, Raabe y Chaudhari, <sup>9</sup> y Bruno et al. <sup>10</sup>, han utilizado OpenSim con este propósito, aún falta una síntesis exhaustiva de su aplicación en la literatura existente.

El análisis detallado de los modelos musculoesqueléticos de la columna lumbar durante levantamientos, utilizando herramientas como OpenSim, representa un avance prometedor en el campo de la ergonomía. Esta metodología permite una comprensión más profunda de cómo las cargas influyen en la biomecánica lumbar, sirviendo como base para el diseño de intervenciones ergonómicas efectivas. Para ello, es esencial identificar y analizar

**Tabla 1.** Fases de investigación

Fases	Resumen
FASE I. Elaboración de la pregunta	a. Elaborar la pregunta de investigación en relación con el/los objetivo(s) de la RSE b. Detalla el cuerpo de literatura que va a resumir y para quien se está resumiendo
FASE II. Establecimiento de los criterios de inclusión y de exclusión y búsqueda sistemática	a. Establecer los criterios de inclusión ( i.e. años, idiomas, tipo de relevancia) b. Seleccionar las palabras clave y los términos de búsqueda. Consultar las páginas MESH y/o DeCS c. Elaborar una estrategia de búsqueda para cada fuente de información d. Describir todas las fuentes de información en la búsqueda
FASE III. Revisión y selección de estudios	a. Identificar y eliminar estudios que sean duplicados b. Revisar títulos y resúmenes. Dos revisores de manera independientes realizan este paso utilizando los criterios de inclusión y exclusión c. De los artículos restantes se hace la lectura del artículo completo. Dos revisores de manera independientes realizan este paso utilizando los criterios de inclusión y exclusión d. De los artículos que se incluirán en el análisis, se hace una búsqueda de las listas de referencias para detectar estudios relevantes que no fueron capturados en la búsqueda en la base de datos
FASE IV. Extracción de datos	a. Se realiza la extracción de los datos con las necesidades de cada RSE b. La extracción la puede realizar un revisor y un segundo lo confirma, o bien dos revisores extraen los datos y posteriormente la comparan
FASE V. Análisis y reporte de resultados	a. Los resultados de estudios cuantitativos se analizan de manera numérica, mientras los hallazgos de los estudios cualitativos se abalizan utilizando el análisis temático

los modelos existentes para comprender su aplicabilidad en la evaluación y prevención de lesiones laborales. Se espera que esta investigación contribuya a mitigar los riesgos de lesiones, mejorar la salud y el bienestar de los trabajadores, y optimizar la eficiencia y productividad en diversos entornos laborales. Por esta razón, la presente investigación tuvo como objetivo, analizar el impacto y las aplicaciones de los modelos musculoesqueléticos de la columna lumbar desarrollados en OpenSim en la evaluación biomecánica de levantamientos de cargas, identificando sus características, campos de aplicación, avances recientes y potencial en la prevención de lesiones laborales.

## Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática exploratoria, bajo el marco metodológico propuesto por Arskey y O'Malley desarrollado por Levac et al.<sup>11,12</sup> (Tabla 1). Además de seguir las recomendaciones PRISMA<sup>13</sup> para su redacción. La búsqueda se llevó a cabo en siete bases de datos; Scopus, PUBMED, ScienceDirec, Taylor and Francis Online, SPRINGER, Scielo y la Base de datos de Univalle.

### Criterios de inclusión

Publicaciones en inglés de los últimos 5 años, ya que investigaciones recientes reflejan los conocimientos y avances más actuales en este campo, mientras que los estudios más antiguos pueden quedar desactualizados o superados. También estudios primarios en los que se modelará la columna lumbar en OpenSim.

### Criterios de exclusión

Estudios desarrollados en especies diferentes a la humana y fuentes secundarias de información. Para la selección de artículos un primer revisor examinó la cita y extrajo los datos y el segundo revisor la verificó.

### Procedimiento

El proceso de selección comenzó con un cribado inicial donde el primer revisor examinó los títulos y resúmenes de los artículos recuperados para determinar su elegibilidad según los criterios de inclusión predefinidos. Posteriormente, se realizó una revisión exhaustiva del texto completo de los estudios seleccionados para confirmar su cumplimiento con los criterios establecidos. La extracción de datos clave, como los métodos, resultados y conclusiones, fue realizada por un primer revisor utilizando un formulario estandarizado para mantener la consistencia y calidad. Un segundo revisor verificó de manera independiente la precisión de los datos extraídos, discutiendo cualquier discrepancia para llegar a un consenso. En casos de desacuerdo, el tercer autor actuó como mediador para tomar la decisión final sobre la inclusión y extracción de los datos. Este enfoque de revisión doble minimizó los sesgos y garantizó la integridad del proceso, con un análisis final que sintetizó los hallazgos más relevantes de los estudios seleccionados.

En relación con la búsqueda de los artículos, se utilizaron palabras clave específicas como “lifting tasks and OpenSim” en varias bases de datos, incluyendo Scopus, Taylor and Francis, Springer Link, PubMed, Scielo y ScienceDirect. Las estrategias de búsqueda

se estructuraron utilizando diferentes sintaxis. Por ejemplo, en PubMed se utilizó “(lifting tasks) AND (OpenSim)”, mientras que en Scielo se aplicó “(LIFTING TASKS) AND (OPENSIM)”.

El modelo de búsqueda para la revisión de artículos siguió un enfoque estructurado y sistemático, diseñado para capturar la mayor cantidad de estudios relevantes mediante el uso de palabras clave y operadores booleanos específicos adaptados a cada base de datos. A continuación se detalla el modelo de búsqueda empleado:

**1. Definición de palabras clave:** Se identificaron términos clave relevantes para la investigación, como “lifting tasks” y “OpenSim”, que reflejan los principales conceptos del estudio.

**2. Construcción de estrategias de búsqueda:** Se desarrollaron estrategias específicas para cada base de datos, ajustando la sintaxis y el uso de operadores booleanos para maximizar la precisión y la relevancia de los resultados. Las estrategias incluyeron combinaciones de los términos clave con conectores como “AND” y “OR” para refinar los resultados.

- **Scopus:** Se utilizó la estrategia de búsqueda básica con los términos “lifting tasks AND OpenSim”, aprovechando las capacidades avanzadas de filtrado de la base de datos.
- **Taylor and Francis:** Se empleó la búsqueda “lifting tasks AND OpenSim”, ajustando los filtros de fecha y tipo de publicación para enfocar los resultados en artículos académicos recientes.
- **Springer Link:** Se utilizó la misma combinación de términos, con ajustes adicionales para el campo de búsqueda, como palabras clave en títulos y resúmenes.
- **PubMed:** Se aplicó la sintaxis específica “(lifting tasks) AND (OpenSim)”, aprovechando los filtros disponibles en la plataforma para centrarse en estudios relevantes en el área de la salud y biomecánica.
- **Scielo:** La búsqueda se adaptó utilizando la sintaxis “(LIFTING TASKS) AND (OPENSIM)”, ajustando los filtros para estudios en español y portugués, además de incluir aquellos indexados en temas de salud y ciencias sociales.
- **ScienceDirect:** Se utilizó “lifting tasks AND OpenSim” para explorar artículos científicos y revisiones, enfocándose en estudios publicados en los últimos cinco años.

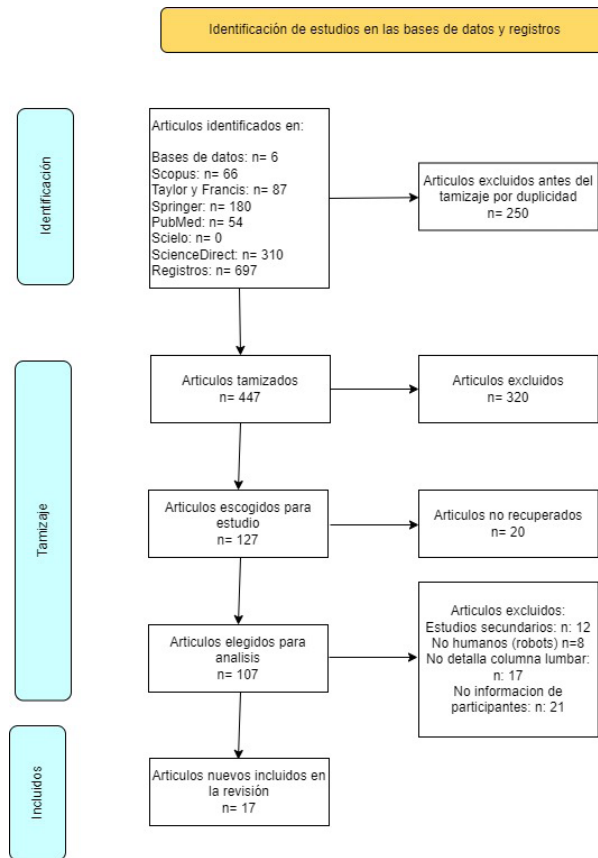
**3. Filtros de búsqueda:** En todas las bases de datos se aplicaron filtros de tiempo (últimos 5 años), tipo de documento (artículos de investigación y revisiones) y área temática (biomecánica, salud ocupacional, simulación computacional).

**4. Registro de estrategias y resultados:** Cada búsqueda fue documentada, incluyendo los términos, sintaxis utilizada, filtros aplicados y el número de resultados obtenidos. Esto aseguró la reproducibilidad y transparencia del proceso de búsqueda.

Este modelo permitió identificar estudios pertinentes de manera efectiva y estructurada, alineándose con las recomendaciones PRISMA para la búsqueda y selección de la literatura científica.

## Resultados

Los resultados de la búsqueda arrojaron un total de 697 artículos



**Figura 1.** Diagrama de Flujo los resultados de búsqueda

de los cuales se seleccionaron como elegibles para el estudio 17 (Figura 1). Se identificaron 697 estudios a través de las bases de datos Scopus, Taylor and Francis, Springer Link, PubMed, Scielo y ScienceDirect. Tras eliminar 250 registros duplicados, se evaluaron 447 estudios mediante la lectura de títulos y resúmenes, resultando en la exclusión de aquellos que no cumplían con los criterios de inclusión. Esta fase inicial redujo el número de estudios a 127, de los cuales 20 no estuvieron disponibles para la revisión completa del texto. Finalmente, 107 artículos fueron evaluados en su totalidad, y se excluyeron 90 por no cumplir con los criterios de selección preestablecidos, resultando en 17 estudios que fueron incluidos en el análisis final.

Estos 17 artículos seleccionados proporcionaron datos clave para el estudio, incluyendo información detallada sobre los métodos utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas en cada uno. El proceso de extracción de datos se realizó de manera rigurosa, asegurando que solo los estudios que se alineaban con los objetivos de la investigación fueran considerados para la síntesis y el análisis de los hallazgos.

Los estudios seleccionados son resumidos en la sabana de artículos, donde encuentran elementos importantes como el autor y el año (Tabla 2).

Los resultados indican que los años con mayor cantidad de estudios reportados son 2020 y 2023. Ryan B. Graham<sup>14,15,19,25,28</sup> y Erica Beaucage-Gauvreau,<sup>6,19,25,28</sup> son los autores con más contribuciones en este campo. Las principales áreas temáticas identificadas son las siguientes:

- Modelos musculoesqueléticos y simulación en OpenSim, con artículos como el de Akhavanfar et al.,<sup>14</sup> y Alemi et al.<sup>16</sup>
- Validación de modelos biomecánicos, abordada en los estudios de Beaucage-Gauvreau et al.,<sup>28</sup> y Actis et al.<sup>30</sup>
- Análisis de técnicas de levantamiento y su impacto biomecánico, presente en los trabajos de van der Have et al.,<sup>26</sup> y Beaucage-Gauvreau et al.<sup>19</sup>
- Comparación de herramientas de análisis, que incluye estudios como el de Ghezlbash et al.<sup>22</sup>

Estas temáticas reflejan un enfoque en el desarrollo y validación de modelos biomecánicos de la columna lumbar, con énfasis en la simulación de tareas de levantamiento y el análisis del impacto de diferentes técnicas.

Tras revisar los artículos, se encontraron 5 modelos musculoesquelético que analizan el gesto de levantamiento de cargas, en OpenSim (Tabla 3)

## Discusión

Los resultados muestran una tendencia creciente en la investigación sobre modelos musculoesqueléticos y simulación de la columna lumbar, evidenciada por un mayor número de publicaciones en los años recientes, particularmente en 2020 y 2023. Este incremento sugiere un auge en el interés por el tema, impulsado posiblemente por los avances tecnológicos y la mayor accesibilidad a herramientas de simulación como OpenSim. La evolución temporal de las publicaciones indica una rápida adaptación de la comunidad científica hacia la utilización

**Tabla 2.** Resumen de estudios seleccionados

#	Título	Año	Principales resultados
14	An Enhanced Spine Model Validated for Simulating Dynamic Lifting Tasks in OpenSim	2024	Se desarrolló y validó un modelo mejorado de columna vertebral, que es preciso para simular tareas dinámicas de levantamiento en una población sana.
15	Replicating spine loading during functional and daily activities: An in vivo, in silico, in vitro research pipeline	2024	Se desarrolló una línea de investigación para estimar no invasivamente las cargas en los discos intervertebrales (IVD) durante actividades funcionales y diarias.
16	EMG Validation of a Subject-Specific Thoracolumbar Spine Musculoskeletal Model During Dynamic Activities in Older Adults	2023	Las comparaciones de modelos específicos del sujeto de columna toracolumbar con datos EMG mostraron concordancia en la activación muscular durante actividades dinámicas en adultos mayores.
17	The Biomechanical Effects of Different Bag-Carrying Styles on Lumbar Spine and Paraspinal Muscles: A Combined Musculoskeletal and Finite Element Study	2023	Reportó que diferentes estilos de transporte de bolsas tienen efectos biomecánicos distintos sobre la columna lumbar y los músculos paravertebrales.
18	Sharing the load: modeling loads in OpenSim to simulate two-handed lifting/	2023	Los modelos de OpenSim permiten simular de manera efectiva cargas durante levantamientos dinámicos usando enfoques diversos.
19	Lumbar spine loads are reduced for activities of daily living when using a braced arm-to-thigh technique	2021	El uso de la técnica BATT (Braced Arm-to-Thigh Technique) técnica de levantamiento con brazo al muslo reduce, las cargas en la columna lumbar durante actividades diarias en comparación con técnicas auto-seleccionadas.
20	Development of a multiscale model of the human lumbar spine for investigation of tissue loads in people with and without a transtibial amputation during sit-to-stand	2021	Se desarrolló un modelo multiescala que integra componentes musculoesqueléticos y de elementos finitos para estudiar las cargas tisulares en la columna lumbar.
21	An open-source musculoskeletal model of the lumbar spine and lower limbs: a validation for movements of the lumbar spine	2021	Desarrollo un modelo musculoesquelético de cuerpo completo que incluye la columna lumbar y fue validado para una variedad de movimientos espinales.
22	Comparison of different lifting analysis tools in estimating lower spinal loads - Evaluation of NIOSH criterion	2020	Diferentes herramientas de análisis de levantamiento proporcionan estimaciones variadas de las cargas espinales, evaluándose también el criterio de NIOSH.
23	Biomechanical analysis of common solid waste collection throwing techniques using OpenSim and an EMG-assisted solver	2020	La técnica simétrica redujo los momentos pico de flexión lateral y rotación axial para bolsas con masas más pesadas, aunque no tuvo un efecto significativo en la reducción de los momentos pico o integrados en otros aspectos.
24	Spinal sagittal alignment goals based on statistical modelling and musculoskeletal simulations	2020	Las simulaciones sugieren alineaciones sagitales espinales biomecánicamente favorables basadas en el modelo estadístico seleccionado.
25	A braced arm-to-thigh (BATT) lifting technique reduces lumbar spine loads in healthy and low back pain participants	2020	La técnica BATT reduce significativamente las cargas lumbares en comparación con levantamientos con dos manos o sin apoyo.
26	Squat Lifting Imposes Higher Peak Joint and Muscle Loading Compared to Stoop Lifting	2019	El levantamiento de sentadillas genera cargas musculoesqueléticas más bajas que el levantamiento agachado, según un modelo musculoesquelético de cuerpo completo.
27	Influence of passive elements on prediction of intradiscal pressure and muscle activation in lumbar musculoskeletal models	2019	La inclusión de elementos pasivos en los modelos lumbares afecta las predicciones de activación muscular y presión intradiscal, evitando sobrestimaciones.
6	Validation of an OpenSim full-body model with detailed lumbar spine for estimating lower lumbar spine loads during symmetric and asymmetric lifting tasks	2019	Desarrolló y validó un modelo en OpenSim que estima con precisión las cargas lumbares durante levantamientos simétricos y asimétricos.
5	Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim	2017	Estimar la carga de la columna lumbar y las fuerzas musculares durante las tareas de levantamiento simétrico y levantamiento asimétrico utilizando un enfoque de modelado musculoesquelético de cuerpo entero.
28	Validation of lumbar spine loading from a musculoskeletal model including the lower limbs and lumbar spine	2018	Se validaron las predicciones de carga lumbar de un modelo musculoesquelético utilizando datos de presión intradiscal para su comparación.

de modelos computacionales para entender mejor las cargas biomecánicas en la columna durante tareas de levantamiento.

En cuanto a los autores, Ryan B. Graham<sup>14,15,19,25,28</sup> y Erica Beaucage-Gauvreau<sup>6,19,25,28</sup> emergen como líderes en el campo, con múltiples contribuciones que refuerzan su papel en la vanguardia de la investigación biomecánica. La constante participación de estos investigadores destaca la importancia de la colaboración continua y la especialización en el desarrollo de modelos biomecánicos, lo cual ha permitido la generación de conocimientos relevantes y la validación de técnicas innovadoras.

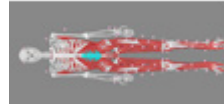
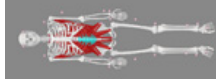
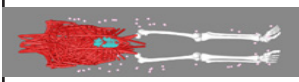
Las áreas temáticas predominantes, como la validación de modelos biomecánicos, la simulación de tareas de levantamiento y la evaluación

de técnicas de levantamiento, subrayan un enfoque claro en la búsqueda de soluciones que mejoren la comprensión de las dinámicas de la columna lumbar bajo diferentes condiciones. La validación de modelos mediante la comparación con datos experimentales refuerza la fiabilidad de estas herramientas para predecir cargas espinales, activación muscular y otros parámetros críticos.

Además, la comparación de diversas herramientas de análisis y enfoques metodológicos resalta la necesidad de un escrutinio riguroso para determinar las técnicas más precisas y aplicables a situaciones reales. Este enfoque permite no solo validar modelos, sino también optimizar la interpretación de los resultados y la toma de decisiones en contextos clínicos y ocupacionales.

**Tabla 3.**

Nombre del Modelo	Ref	Grados libertad	Cantidad de músculos	Cantidad de segmentos	Método de validación	Objetivo	Muestra	Características de la muestra
New Falts	14	54	N/A	N/A	Validar las fuerzas espinales estimadas por este modelo mejorado durante nueve tareas dinámicas de elevación/descenso	Investigar la precisión del modelo para una población sana, más allá de los rangos de masa y altura de los pacientes del conjunto de datos del implante.	Tres pacientes varones	(66.7 ±7.0 kg, 169 ±1 cm, 65 ±5 años)
FALTS	18	54	92 músculos de las extremidades inferiores y de la columna lumbar	13	Validar las fuerzas espinales estimadas por este modelo mejorado durante nueve tareas dinámicas de elevación/descenso	Validar las fuerzas espinales intervertebrales estimadas por nuestro modelo durante una variedad de tareas dinámicas de elevación/descenso utilizando varios enfoques de modelado EHF&M	Tres voluntarios varones sanos	(masa 91.3 ±9.4 kg, altura 179 ±5 cm, edad 25 ±4 años)
LFB	(6)	29	238 actuadores musculotendinosos tipo Hill (solo musculatura del tronco)	30	Se validaron mediante comparación directa entre músculos estimados sincronizados, activaciones y actividad muscular por electromiografía (EMG) de los participantes en este estudio.	Adaptar la musculatura del tronco y los movimientos del modelo FBLs existente para cumplir con los requisitos del análisis de levantamiento y validar el modelo resultante para la evaluación de la carga de la columna lumbar durante tareas de levantamiento simétrico y asimétrico.	Tres participantes varones sanos	(22.6 ± 2.3 años, 81.6 ± 3.8 kg, 184.1 ± 5.5 cm)
FBLs	(9)	30	324 actuadores musculotendinosos y el recto abdominal, dorsal ancho, trapecio, oblicuo externo, oblicuo interno, erector de la columna, multifidus, psoas mayor y cuadrado lumbar.	21	Validación de parámetros del modelo, validar la función muscular, validación de simulaciones.	Desarrollar y validar un modelo de cuerpo completo OpenSim más fisiológicamente preciso.	7 participantes Adultos sanos	(masa 79.30 ± 9,18 kilos, altura 1,79 +- 0,07 m, edad 22.43 +- 2,89 años)
LLMS	(21)	29	238 actuadores musculotendinosos de tipo Hill	30	Validado para tareas de elevación como la inclinación a dos manos y la sentadilla a dos manos	Estudiar cinco enfoques para modelar EHF&M en OpenSim; Evaluar el efecto de esto enfoques de modelo en las cargas espinales predichas para un participante durante tareas de levantamiento a dos manos; comparar las fuerzas residuales o "mano de dios" producidas por cada enfoque de modelado EHF&M a nivel de la articulación pelvis-suelo.	Varón sano	(94.5 kg, 178 cm, 27 años)



En conjunto, los resultados reflejan una evolución significativa en el campo, con un enfoque claro en la mejora de los modelos biomecánicos y la comprensión del impacto de diferentes técnicas de levantamiento en la salud lumbar. Esta tendencia no solo demuestra el valor de la simulación como una herramienta de investigación, sino que también resalta la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la innovación continua para enfrentar los desafíos relacionados con el análisis biomecánico de la columna lumbar.

De los 697 artículos revisados, se seleccionaron 17 estudios como elegibles, los cuales presentaron 5 modelos para el análisis del levantamiento de carga (New Falts, FALTS, FBLS, FLB, LLMS). Estos estudios involucraron la participación de 12 individuos sanos. Aunque todos los modelos seleccionados cuentan con diferentes tipos de validación, ya sea a través de mediciones electromiográficas o reportes de cargas espinales en la literatura, destacan varios modelos, entre ellos uno de los más recientes: el desarrollado por Akhavanfar et al.<sup>14</sup>, el cual promete proporcionar información más precisa sobre las cargas espinales. Este modelo ha sido validado para nueve tareas dinámicas de elevación/descenso, investigando su precisión en una población sana y expandiendo los rangos de masa y altura de los participantes, lo que permite una mejor representación de la variabilidad individual en la población general.

Sin embargo, se observa una dificultad al intentar ajustar los parámetros a través de la interfaz de OpenSim, ya que este modelo requiere conocimientos avanzados en Matlab para su operación mediante el código proporcionado. Aunque el código incluye instrucciones detalladas para llevar a cabo los análisis correspondientes, la necesidad de habilidades específicas en programación podría limitar su accesibilidad para algunos investigadores y profesionales del área. A pesar de estas limitaciones, el modelo de Akhavanfar et al.,<sup>14</sup> representa un avance significativo en la simulación de cargas espinales, brindando estimaciones más precisas que pueden mejorar la comprensión del impacto biomecánico del levantamiento de cargas.

Entre los modelos revisados, también se destaca el modelo LFB,<sup>28</sup> validado para el análisis de tareas de levantamiento y que puede ser operado de manera adecuada directamente en la interfaz de OpenSim. Este modelo se caracteriza por su facilidad de uso y su capacidad para generar valores cinemáticos y cinéticos coherentes durante el análisis del levantamiento, sin requerir programación adicional. Su operatividad directa en OpenSim lo convierte en una herramienta accesible para el análisis biomecánico, especialmente en entornos donde se busca una implementación rápida y efectiva.

Cabe mencionar que otros modelos reportados, como el LLMS,<sup>21</sup> presentan limitaciones significativas para su uso práctico. En primer lugar, no se logra operar este modelo en OpenSim debido a la falta de información en el código proporcionado, lo que impide su correcta implementación y validación en nuevas tareas de estudio. Además, los autores del LLMS reportan tiempos extensos para el procesamiento de datos, superiores a un mes, lo cual representa una barrera considerable en términos de eficiencia y aplicabilidad en estudios que requieren respuestas rápidas o adaptaciones continuas.

Por estas razones, se sugiere considerar principalmente los modelos de Akhavanfar et al.,<sup>14</sup> y LFB<sup>28</sup> para el análisis del levantamiento de carga, dado que la mejora en la precisión de la estimación de cargas espinales podría tener importantes implicaciones en el diseño de intervenciones ergonómicas más efectivas para prevenir lesiones durante el levantamiento de cargas en entornos laborales. Además, los modelos más avanzados, como el de Akhavanfar et al.,<sup>14</sup> podrían guiar la creación de programas de entrenamiento y adaptación biomecánica más precisos, contribuyendo a una mejor prevención de trastornos musculoesqueléticos.

## Conclusiones

El creciente uso del modelado musculoesquelético de la columna lumbar en OpenSim representa un avance significativo en la investigación tanto aplicada como básica. Estos modelos, basados en el conocimiento biomecánico, aprovechan tecnologías innovadoras y accesibles para mejorar la comprensión y la gestión de la salud de las personas. Lo que podría tener importantes implicaciones en la ergonomía y en el diseño de intervenciones destinadas a prevenir lesiones en entornos laborales. Este enfoque no solo contribuye a avanzar en la comprensión de los mecanismos biomecánicos involucrados en el levantamiento de cargas, sino que también brinda herramientas prácticas para mejorar la salud y la seguridad de los trabajadores.

## Fuentes de financiación

La investigación se llevó a cabo como parte del proyecto titulado "Influencia de factores antropométricos del trabajador colombiano en el riesgo biomecánico de la columna lumbar durante el levantamiento manual de cargas en actividades de construcción usando simulación computacional". Este proyecto fue financiado por Minciencias, bajo el código de identificación CD 82185 y el contrato ICETEX 2022-0788.

## Referencias

1. Garcés TK. Trastornos musculoesqueléticos (TME) por manipulación de cargas en obra en construcción. Trabajo de grado. Gestión de la Seguridad y Salud laboral; Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano; 2019
2. Cardenas CB, Holguin OCM, Sandoval PE. Absentismo laboral y prevalencia de síntomas Musculoesqueléticos en área de desprespe de empresa avícola del Valle del Cauca 2015. Tesis de Especialización. Especialización en Salud Ocupacional, Facultad Ciencias de la Salud, Universidad Libre: Cali; 2017
3. Escamilla SM. Prevalencia de desórdenes musculo esqueléticos y diseño de un manual de promoción de la salud y prevención de esta patología en trabajadores de la obra entre verde, de la empresa Construcciones Tarento SAS. Trabajo de grado. Especialización en Higiene, Seguridad y Salud en el Trabajo, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Bogotá; 2015
4. Pinto WJC. Factores asociados a la enfermedad discal lumbar de origen laboral, calificados por la junta de calificación de invalidez regional de Meta (Colombia). *Reva Colomb Salud Ocupacional*. 2015; 5(4): 18–22. doi: 10.18041/2322-634X/rcso.4.2015.4931

5. Kim HK, Zhang Y. Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*. 2017; 60(4): 563–76. doi: 10.1080/00140139.2016.1191679
6. Beaucage-Gauvreau E, Robertson WSP, Brandon SCE, Fraser R, Freeman BJC, Graham RB, et al. Validation of an OpenSim full-body model with detailed lumbar spine for estimating lower lumbar spine loads during symmetric and asymmetric lifting tasks. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2019;22(5):451–64. doi: 10.1080/10255842.2018.1564819
7. Rojas JAS, Sanabria JSG, Carrillo CGH. Análisis del impacto del sector de la construcción en la economía colombiana. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*. 2020; 24(66): 109–18. doi: 10.14483/22487638.16194
8. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2007; 54(11): 1940–50. doi: 10.1109/TBME.2007.901024
9. Raabe ME, Chaudhari AMW. An investigation of jogging biomechanics using the full-body lumbar spine model: Model development and validation. *J Biomech*. 2016;49(7):1238–43. doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.02.046
10. Bruno AG, Mokhtarzadeh H, Allaire BT, Velie KR, Clara De Paolis Kaluza M, Anderson DE, et al. Incorporation of CT-Based Measurements of Trunk Anatomy Into Subject-Specific Musculoskeletal Models of the Spine Influences Vertebral Loading Predictions. *J Orthop Res*. 2017;35:2164–73. doi: 10.1002/jor.23524
11. Fernández-Sánchez H, King K, Enríquez-Hernández CB, Fernández-Sánchez H, King K, Enríquez-Hernández CB. Revisión Sistemática Exploratoria como metodología para la síntesis del conocimiento científico. *Enfermería Universitaria [Internet]*. 2020 Feb 14 [cited 2021 Sep 15];17(1):87–94. doi: 10.22201/eneo.23958421e.2020.1.697
12. Tricco AC, Lillie E, Zarin W, O'Brien KK, Colquhoun H, Levac D, et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Ann Intern Med*. 2018;169(7):467–73. doi: 10.7326/M18-0850
13. Yepes-Nuñez JJ, Urrutia G, Romero-García M, Alonso-Fernández S. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Rev Esp Cardiol*. 2021;74(9):790–9.
14. Akhavanfar M, Mir-Orefice A, Uchida TK, Graham RB. An Enhanced Spine Model Validated for Simulating Dynamic Lifting Tasks in OpenSim. *Ann Biomed Eng*. 2024;52(2):259–69. doi: 10.1007/s10439-023-03368-x
15. Ebisch I, Lazaro-Pacheco D, Farris DJ, Holsgrove TP. Replicating spine loading during functional and daily activities: An in vivo, in silico, in vitro research pipeline. *J Biomech*. 2024;111916. doi: 10.1016/j.jbiomech.2023.111916
16. Alemi MM, Banks JJ, Lynch AC, Allaire BT, Boussein ML, Anderson DE. EMG validation of a subject-specific thoracolumbar spine musculoskeletal model during dynamic activities in older adults. *Ann Biomed Eng*. 2023;51(10):2313–22. doi: 10.1007/s10439-023-03273-3
17. Zhao G, Wang H, Wang L, Ibrahim Y, Wan Y, Sun J, et al. The biomechanical effects of different bag-carrying styles on lumbar spine and paraspinal muscles: a combined musculoskeletal and finite element study. *Orthop Surg*. 2023;15(1):315–27. doi: 10.1111/os.13573
18. Akhavanfar M, Uchida TK, Clouthier AL, Graham RB. Sharing the load: modeling loads in OpenSim to simulate two-handed lifting. *Multibody Syst Dyn*. 2022;54(2):213–34. doi: 10.1007/s11044-021-09808-7
19. Beaucage-Gauvreau E, Brandon SCE, Robertson WSP, Fraser R, Freeman BJC, Graham RB, et al. Lumbar spine loads are reduced for activities of daily living when using a braced arm-to-thigh technique. *European Spine Journal*. 2021;30:1035–42. doi: 10.1007/s00586-020-06631-0
20. Honegger JD, Actis JA, Gates DH, Silverman AK, Munson AH, Petrella AJ. Development of a multiscale model of the human lumbar spine for investigation of tissue loads in people with and without a transtibial amputation during sit-to-stand. *Biomech Model Mechanobiol*. 2021;20(1):339–58. Doi:10.1007/s10237-020-01389-2
21. Favier CD, Finnegan ME, Quest RA, Honeyfield L, McGregor AH, Phillips ATM. An open-source musculoskeletal model of the lumbar spine and lower limbs: a validation for movements of the lumbar spine. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2021;24(12):1310–25. Doi: 10.1080/10255842.2021.1886284
22. Ghezalbash F, Shirazi-Adl A, Plamondon A, Arjmand N. Comparison of different lifting analysis tools in estimating lower spinal loads—Evaluation of NIOSH criterion. *J Biomech*. 2020;112:110024. Doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.110024
23. Nguyen AQ, Rodriguez C, Kumar R, Gupta S, Anderson DE, Saifi C. Biomechanical analysis of complications following T10-Pelvis spinal fusion: A population based computational study. *J Biomech*. 2024;165:111969. Doi:10.1016/j.jbiomech.2024.111969
24. Caprara S, Moschini G, Snedeker JG, Farshad M, Senteler M. Spinal sagittal alignment goals based on statistical modelling and musculoskeletal simulations. *J Biomech*. 2020;102:109621. Doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109621
25. Beaucage-Gauvreau E, Brandon SCE, Robertson WSP, Fraser R, Freeman BJC, Graham RB, et al. A braced arm-to-thigh (BATT) lifting technique reduces lumbar spine loads in healthy and low back pain participants. *J Biomech*. 2020;100:109584. Doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.109584
26. van der Have A, Van Rossom S, Jonkers I. Squat lifting imposes higher peak joint and muscle loading compared to stoop lifting.



Applied Sciences. 2019;9(18):3794. Doi: 10.3390/app9183794

27. Wang K, Wang L, Deng Z, Jiang C, Niu W, Zhang M. Influence of passive elements on prediction of intradiscal pressure and muscle activation in lumbar musculoskeletal models. *Comput Methods Programs Biomed.* 2019;177:39–46. Doi: 10.1016/j.cmpb.2019.05.018

28. Beaucage-Gauvreau E, Robertson WSP, Brandon SCE, Fraser R, Freeman BJC, Graham RB, et al. Validation of an OpenSim full-body model with detailed lumbar spine for estimating lower lumbar spine loads during symmetric and asymmetric lifting tasks. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2019;22(5):451–64. Available from: Doi: 10.1080/10255842.2018.1564819

29. Kim HK, Zhang Y. Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics.* 2017;60(4):563–76. Doi: 10.1080/00140139.2016.1191679

30. Actis JA, Honegger JD, Gates DH, Petrella AJ, Nolasco LA, Silverman AK. Validation of lumbar spine loading from a musculoskeletal model including the lower limbs and lumbar spine. *J Biomech [Internet].* 2018;68:107–14. Doi: 10.1016/j.jbiomech.2017.12.001 Doi:10.1016/j.jbiomech.2017.12.001

© Universidad Libre. 2025. Licence Creative Commons CC-by-nc-sa/4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

