VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

"Desarrollo de plataforma digital para el análisis de posturas laborales musculoesqueléticos en el trabajo agrícola mediante el procesamiento de imágenes"

Development of a digital platform for the analysis of musculoskeletal work postures in agricultural work through image processing

Israel Enrique Herrera Díaz[1] Edith Alejandra Gamiño Ramírez[2] Luz Julieta Barajas Galván[1] Liliana Teresa Vázquez Rodríguez[2] Yahir Rodrigo Huerta Delgado[1]

[1]Campus Irapuato-Salamanca, División de Ciencias de la Vida, Departamento de Ingeniería Agrícola
[2]Campus Celaya-Salvatierra, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Departamento de Enfermería Clínica

eherrera@ugto.mx; ea.gamino@ugto.mx; lj.barajasgalvan@ugto.mx; lt.vazquezrodriguez@ugto.mx; yr.huertadelgado@ugto.mx

Resumen

El proyecto de investigación desarrollado en el marco del **Verano de la Ciencia UG 2026** aborda la alta incidencia de los **Trastornos Musculoesqueléticos (TME)** relacionados con el trabajo representan uno de los principales problemas de salud ocupacional en el sector agrícola, debido a la exposición continua de los trabajadores a posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas. En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar y validar una plataforma computacional basada en **MATLAB®** para la evaluación ergonómica automatizada mediante procesamiento digital de imágenes y la aplicación del método **Rapid Entire Body Assessment (REBA)**. El sistema implementado permite la adquisición y procesamiento de imágenes, la identificación de puntos anatómicos, el cálculo automático de ángulos articulares y la estimación objetiva del nivel de riesgo ergonómico durante la ejecución de tareas agrícolas.

Como caso de estudio se analizó la secuencia completa del movimiento de levantamiento y transporte manual de una carga, evaluando cinco instantes representativos del ciclo biomecánico. Para cada fase se determinaron los ángulos del cuello, tronco, miembros superiores y miembros inferiores, calculándose automáticamente las puntuaciones correspondientes a los Grupos A y B del método REBA, así como la puntuación final de riesgo. Los resultados evidenciaron una variación dinámica de la carga postural a lo largo del movimiento, identificándose los mayores niveles de riesgo durante las fases de levantamiento inicial y manipulación de la carga, con puntuaciones REBA clasificadas como de riesgo alto, mientras que las fases finales mostraron una reducción progresiva del riesgo conforme el trabajador recuperó una postura más neutra.

La plataforma desarrollada demostró ser una herramienta objetiva, reproducible y de bajo costo para la evaluación ergonómica, disminuyendo la subjetividad inherente a las evaluaciones observacionales tradicionales y facilitando la cuantificación automática de variables biomecánicas relevantes para la fisioterapia ocupacional y la ergonomía. Asimismo, el sistema constituye una base tecnológica escalable para futuras aplicaciones de inteligencia artificial y estimación automática de pose humana en tiempo real, contribuyendo al diseño de estrategias preventivas orientadas a reducir la incidencia de trastornos musculoesqueléticos en trabajadores agrícolas.

Palabras clave: Ergonomía Agrícola, Rapid Entire Body Assessment (REBA), Procesamiento digital de Imágenes, Biomecánica, Fisioterapia Ocupacional, Evaluación Postural, Agricultura, Análisis del Movimiento, Trastorns Musculoesqueléticos.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

1. Introducción y Justificación

La agricultura constituye uno de los sectores productivos más importantes para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico mundial. No obstante, continúa siendo una de las actividades laborales con mayor exposición a riesgos ergonómicos y físicos debido a la elevada demanda biomecánica que implican tareas como la siembra, el deshierbe, la cosecha y la manipulación manual de cargas. Estas actividades suelen realizarse en terrenos irregulares, bajo condiciones ambientales adversas y mediante posturas forzadas mantenidas o repetitivas, factores que incrementan significativamente el riesgo de desarrollar trastornos musculoesqueléticos (TME) (International Labour Organization [ILO], 2023; Shivakumar et al., 2023).

En México, el sector agrícola enfrenta además un importante proceso de envejecimiento de su fuerza laboral. La disminución de la participación de población joven en las actividades rurales y la migración hacia sectores urbanos e industriales han favorecido que un número creciente de trabajadores adultos y adultos mayores permanezcan realizando labores agrícolas de elevada exigencia física durante periodos prolongados. Esta situación incrementa la susceptibilidad al desarrollo de lesiones musculoesqueléticas, disminuye la capacidad funcional y repercute negativamente en la productividad, la calidad de vida y la permanencia laboral de los trabajadores (INEGI, 2024; Tonelli, 2014).

Los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo representan actualmente la principal causa de discapacidad ocupacional a nivel mundial. Una revisión sistemática y metaanálisis realizada por Shivakumar et al. (2023), que incluyó estudios desarrollados en países de ingresos bajos y medios, reportó una elevada prevalencia de dolor lumbar, cervical y de extremidades superiores entre trabajadores agrícolas, identificando como principales factores de riesgo la flexión sostenida del tronco, la repetición de movimientos, la manipulación manual de cargas y las jornadas prolongadas de trabajo. De manera similar, Barneo-Alcántara et al. (2021) señalan que la adopción continua de posturas inadecuadas constituye uno de los determinantes más importantes en el desarrollo de enfermedades musculoesqueléticas dentro del sector agrícola, por lo que recomiendan la incorporación de herramientas ergonómicas de evaluación y programas preventivos dirigidos a disminuir la carga biomecánica.

Desde la perspectiva de la ergonomía ocupacional, la evaluación objetiva de las posturas laborales constituye el primer paso para identificar factores de riesgo, establecer prioridades de intervención y diseñar estrategias preventivas basadas en evidencia. Entre los métodos observacionales disponibles, el método **Rapid Entire Body Assessment (REBA)** se ha consolidado como uno de los instrumentos más utilizados para valorar el riesgo postural en actividades dinámicas que involucran movimientos de todo el cuerpo, debido a su facilidad de aplicación, reproducibilidad y capacidad para estimar el nivel de intervención ergonómica requerido (Hignett & McAtamney, 2000).

Tradicionalmente, la aplicación del método REBA depende de la observación directa del evaluador o del análisis manual de fotografías y secuencias de video. Aunque este procedimiento ha demostrado ser útil en diversos entornos laborales, presenta limitaciones relacionadas con la subjetividad entre evaluadores, el tiempo requerido para el análisis y la dificultad para evaluar de manera continua las variaciones posturales que ocurren durante una jornada laboral completa (Plantard et al., 2017). En los últimos años, los avances en visión por computadora, procesamiento digital de imágenes e inteligencia artificial han impulsado el desarrollo de herramientas capaces de automatizar la identificación de segmentos corporales y la estimación de ángulos articulares, favoreciendo evaluaciones ergonómicas más objetivas, reproducibles y eficientes (Moeslund et al., 2006; Zhang et al., 2023).

A pesar de estos avances, la disponibilidad de plataformas accesibles que integren procesamiento de imágenes y métodos ergonómicos validados para su aplicación específica en actividades agrícolas continúa siendo limitada, particularmente en contextos rurales latinoamericanos. La mayoría de las soluciones reportadas requieren sistemas especializados de captura tridimensional, sensores portables o software propietario de alto costo, lo que dificulta su implementación en escenarios reales de trabajo agrícola.

En este contexto, el presente estudio propone el desarrollo de una plataforma digital implementada en **MATLAB**, capaz de automatizar parcialmente la evaluación ergonómica mediante el análisis de imágenes y la aplicación computacional del método REBA. La plataforma permite cuantificar el riesgo postural durante actividades agrícolas a partir de secuencias de video, facilitando la identificación de posturas de riesgo y proporcionando información objetiva que puede apoyar la toma de decisiones clínicas, ergonómicas e ingenieriles orientadas a la prevención de trastornos musculoesqueléticos.

El proyecto fue desarrollado en el marco del **XXXI Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato**, mediante una colaboración interdisciplinaria entre especialistas en ingeniería agrícola y fisioterapia. Esta integración de conocimientos permitió combinar herramientas de procesamiento digital de imágenes, evaluación ergonómica y análisis biomecánico para generar una solución tecnológica con potencial aplicación en programas de vigilancia de la salud ocupacional, investigación ergonómica y prevención de lesiones musculoesqueléticas en trabajadores agrícolas.

2. Marco Teórico y Clínico: Fisioterapia y la escala REBA

Desde la perspectiva de la fisioterapia y la ergonomía ocupacional, la evaluación objetiva de las posturas laborales constituye una herramienta fundamental para la prevención, identificación y tratamiento de los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (TME). La exposición prolongada a posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas genera alteraciones biomecánicas que incrementan el estrés mecánico sobre músculos, tendones, ligamentos y estructuras articulares, favoreciendo el desarrollo de dolor, fatiga muscular y discapacidad funcional (Barneo-Alcántara et al., 2021; Shivakumar et al., 2023).

En el ámbito agrícola, estas condiciones se presentan de manera particularmente frecuente debido a la necesidad de realizar actividades de siembra, cosecha y recolección mediante flexiones sostenidas del tronco, posiciones de cuclillas, elevación repetitiva de los miembros superiores y manipulación manual de productos agrícolas. Diversos estudios han identificado que la región lumbar, el cuello, las rodillas y los hombros representan los segmentos anatómicos con mayor incidencia de lesiones ocupacionales en trabajadores agrícolas (International Labour Organization [ILO], 2023; Tonelli, 2014).

La fisioterapia ocupacional desempeña un papel esencial en este contexto, no únicamente desde la rehabilitación de las lesiones ya establecidas, sino también mediante la implementación de estrategias preventivas orientadas a reducir la exposición biomecánica y promover entornos laborales más seguros. Para ello, resulta indispensable contar con herramientas de evaluación objetivas que permitan cuantificar el nivel de riesgo postural y establecer prioridades de intervención clínica y ergonómica (World Physiotherapy, 2023).

Entre los métodos observacionales disponibles, el **Rapid Entire Body Assessment (REBA)**, desarrollado por Hignett y McAtamney (2000), constituye uno de los instrumentos más utilizados para valorar el riesgo ergonómico asociado a actividades que involucran movimientos dinámicos de todo el cuerpo. A diferencia de otros métodos ergonómicos orientados principalmente al análisis de tareas estáticas o de miembros superiores, REBA fue diseñado específicamente para evaluar actividades caracterizadas por frecuentes cambios posturales, manipulación de cargas y movimientos impredecibles, condiciones que representan adecuadamente las labores agrícolas.

El método REBA realiza una valoración sistemática de las principales regiones anatómicas mediante la estimación de los ángulos articulares del cuello, tronco, piernas, brazo, antebrazo y muñeca. Asimismo, incorpora variables relacionadas con la carga manipulada, la calidad del agarre y las características de la actividad, integrando estos factores en una puntuación global que clasifica el nivel de riesgo ergonómico y establece la prioridad de intervención preventiva (Hignett & McAtamney, 2000).

Con fines analíticos, REBA divide el cuerpo humano en dos grupos funcionales (Figura 1):

- **Grupo A:** comprende cuello, tronco y extremidades inferiores, segmentos responsables del soporte corporal, el equilibrio postural y la transmisión de cargas durante la actividad laboral.

- **Grupo B:** integra brazo, antebrazo y muñeca, estructuras encargadas de la manipulación directa de herramientas y materiales, cuya evaluación permite identificar sobrecargas biomecánicas en las extremidades superiores.

Las puntuaciones obtenidas para ambos grupos se integran mediante una matriz de decisión (Tabla C), incorporando posteriormente modificadores asociados a la actividad realizada, tales como repetitividad, mantenimiento de posturas estáticas e inestabilidad del movimiento. El resultado corresponde al **Score REBA**, cuya interpretación permite clasificar el riesgo ergonómico en cinco niveles, desde riesgo inapreciable hasta riesgo muy alto, orientando la urgencia de las acciones preventivas y correctivas requeridas (Tabla 1).

Aunque el método REBA ha demostrado una adecuada confiabilidad y validez en múltiples sectores productivos, su aplicación convencional continúa dependiendo de la observación directa por parte del evaluador o del análisis manual de imágenes y videos. Este procedimiento puede introducir variabilidad interobservador, aumentar el tiempo requerido para la evaluación y limitar el análisis continuo de actividades altamente dinámicas (Plantard et al., 2017).

En los últimos años, el desarrollo de técnicas de visión por computadora, estimación automática de pose humana y aprendizaje profundo ha permitido avanzar hacia sistemas capaces de identificar puntos anatómicos, estimar ángulos articulares y automatizar parcialmente la aplicación de métodos ergonómicos como REBA. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de realizar evaluaciones más objetivas, reproducibles y eficientes, favoreciendo la vigilancia ergonómica en tiempo real y disminuyendo la dependencia de la valoración manual (Moeslund et al., 2006; Zhang et al., 2023).

Bajo esta perspectiva, la integración del método REBA con herramientas de procesamiento digital de imágenes representa una alternativa tecnológica prometedora para fortalecer la evaluación biomecánica de trabajadores agrícolas. La automatización parcial del cálculo de los ángulos articulares y de la clasificación del riesgo ergonómico no solo reduce la subjetividad del proceso de evaluación, sino que también facilita el seguimiento longitudinal de las posturas adoptadas durante ciclos completos de trabajo, proporcionando información objetiva que puede emplearse para el diseño de intervenciones fisioterapéuticas, ergonómicas e ingenieriles dirigidas a disminuir la incidencia de trastornos musculoesqueléticos.

2.1 Evaluación Biomecánica del Grupo A

El **Grupo A** del método REBA integra los segmentos anatómicos responsables del soporte postural y de la transmisión de cargas durante la actividad laboral: cuello, tronco y extremidades inferiores (Figura 1). Desde la perspectiva biomecánica, estas estructuras constituyen la base del equilibrio corporal y soportan la mayor parte de las cargas compresivas y de cizallamiento generadas durante actividades agrícolas como la siembra, el deshierbe y la recolección manual (Hignett & McAtamney, 2000).

La evaluación del **tronco** representa uno de los componentes más importantes del método debido a que las flexiones sostenidas superiores a 60° incrementan considerablemente el momento de fuerza sobre la columna lumbar, elevando la presión intradiscal y la demanda mecánica sobre la musculatura extensora del tronco. Diversos estudios han demostrado que la permanencia prolongada en estas posturas constituye uno de los principales factores asociados con el desarrollo de lumbalgia ocupacional en trabajadores agrícolas (Shivakumar et al., 2023).

El **cuello** se analiza considerando las posiciones de flexión, extensión, inclinación lateral y rotación, ya que estas alteraciones modifican el equilibrio de la cabeza respecto al eje corporal y aumentan la actividad muscular cervical. En labores agrícolas, la necesidad de mantener la atención visual sobre el producto recolectado favorece posturas mantenidas que incrementan el riesgo de dolor cervical y fatiga muscular.

Las **extremidades inferiores**, particularmente las rodillas, aportan información relacionada con la estabilidad postural y la distribución de las cargas corporales. La adopción repetida de posiciones de cuclillas o flexiones profundas incrementa las fuerzas de compresión femorotibial y femoropatelar, favoreciendo procesos degenerativos articulares y sobrecarga muscular, especialmente en trabajadores adultos mayores (Tonelli, 2014).

Las puntuaciones individuales obtenidas para estos segmentos se integran mediante la **Tabla A** (Figura 1), incorporando posteriormente modificadores relacionados con la carga manipulada y la aplicación de fuerza. Esta integración permite obtener una puntuación global que representa la magnitud de la carga biomecánica soportada por el eje axial del cuerpo.

2.2 Evaluación Biomecánica del Grupo B

El **Grupo B** comprende las estructuras anatómicas responsables de la manipulación directa de herramientas, materiales y productos agrícolas: brazo, antebrazo y muñeca. Estas articulaciones participan de manera coordinada en actividades de prensión, transporte y posicionamiento de cargas, siendo especialmente

susceptibles al desarrollo de lesiones por sobreuso cuando las tareas implican movimientos repetitivos o posturas mantenidas (Barneo-Alcántara et al., 2021).

El análisis del **brazo** considera principalmente la posición del hombro respecto al tronco. Las elevaciones prolongadas, la abducción y las rotaciones incrementan la demanda mecánica sobre la musculatura del manguito rotador y deltoides, favoreciendo procesos inflamatorios y tendinopatías.

Por su parte, el **antebrazo** refleja la posición funcional del codo durante la manipulación de objetos. La adopción continua de ángulos extremos disminuye la eficiencia mecánica de la extremidad superior y aumenta la carga muscular requerida para mantener la estabilidad durante la tarea.

La evaluación de la **muñeca** resulta especialmente relevante debido a que las desviaciones radial **y** cubital, así como las flexiones y extensiones mantenidas, incrementan las tensiones sobre los tendones flexores y extensores de la mano. Estas alteraciones se han asociado con una mayor incidencia de tendinopatías, síndrome del túnel del carpo y otras lesiones por movimientos repetitivos (ILO, 2023).

Las puntuaciones obtenidas para estos tres segmentos se combinan mediante la **Tabla B**, incorporando posteriormente el modificador correspondiente a la calidad del agarre (coupling), el cual considera las características de la interfaz entre la mano y el objeto manipulado. Un agarre adecuado disminuye el esfuerzo requerido para controlar la carga, mientras que superficies resbaladizas, objetos de difícil manipulación o herramientas inadecuadas incrementan significativamente el riesgo ergonómico (Hignett & McAtamney, 2000).

2.3 Integración del Score REBA y Clasificación del Riesgo Ergonómico.

La evaluación integral del método REBA se obtiene mediante la combinación de las puntuaciones correspondientes a los Grupos A y B utilizando la **Tabla C** (Figura 1). Esta matriz constituye el núcleo del sistema de clasificación, permitiendo integrar la información biomecánica del eje axial y de las extremidades superiores en una única puntuación representativa del riesgo postural.

Posteriormente, el método incorpora modificadores relacionados con las características de la actividad desarrollada, considerando principalmente la permanencia en posturas estáticas, la repetición continua de movimientos y la presencia de cambios posturales rápidos o inestables. Estos factores permiten estimar de forma más precisa la exposición biomecánica real del trabajador durante el desempeño de sus actividades laborales (Hignett & McAtamney, 2000).

La puntuación final, conocida como **Score REBA**, clasifica el riesgo ergonómico en cinco categorías, que van desde un riesgo inapreciable hasta un riesgo muy alto (Tabla 1). Cada categoría establece la prioridad de intervención ergonómica requerida y constituye una guía para la implementación de medidas preventivas orientadas a reducir la exposición ocupacional.

Desde la perspectiva de la fisioterapia ocupacional, esta clasificación facilita la identificación temprana de trabajadores con mayor probabilidad de desarrollar trastornos musculoesqueléticos, permitiendo diseñar programas de intervención dirigidos al entrenamiento postural, fortalecimiento muscular, dosificación del esfuerzo, pausas activas y rediseño ergonómico del puesto de trabajo (World Physiotherapy, 2023).

En el presente estudio, el método REBA constituye la base clínica sobre la cual se desarrolló la plataforma computacional implementada en MATLAB. La automatización del proceso de evaluación mediante procesamiento digital de imágenes permite disminuir la subjetividad inherente a la observación manual, mejorar la reproducibilidad de las mediciones y facilitar el análisis secuencial de las posturas adoptadas durante actividades agrícolas, fortaleciendo así la objetividad de la valoración ergonómica.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

TABLA A		Tronco				
Cuello	**Piernas**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	**1**	1	2	2	3	4
	2	2	3	4	5	6
	3	3	4	5	6	7
	4	4	5	6	7	8
2	**1**	1	3	4	5	6
	2	2	4	5	6	7
	3	3	5	6	7	8
	4	4	6	7	8	9
3	**1**	3	4	5	6	7
	2	3	5	6	7	8
	3	5	6	7	8	9
	4	6	7	8	9	9

TABLA B		Brazo					
Codo	**Muñeca**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	**1**	1	1	3	4	6	7
	2	2	2	4	5	7	8
	3	2	3	5	5	8	8
2	**1**	1	2	4	5	7	8
	2	2	3	5	6	8	9
	3	3	4	5	7	8	9

TABLA C		Puntos A											
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Puntos B	**1**	1	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
	2	1	2	3	4	4	6	7	8	9	10	11	12
	3	1	2	3	4	4	6	7	8	9	10	11	12
	4	2	3	3	4	5	7	8	9	10	11	11	12
	5	3	4	4	5	6	8	9	10	10	11	12	12
	6	3	4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	12
	7	4	5	6	7	8	9	9	10	11	11	12	12
	8	5	6	7	8	8	9	10	10	11	12	12	12
	9	6	6	7	8	9	10	10	10	11	12	12	12
	10	7	7	8	9	9	10	11	11	12	12	12	12
	11	7	7	8	9	9	10	11	11	12	12	12	12
	12	7	8	8	9	9	10	11	11	12	12	12	12

Figura 1.

Tabla de ponderación REBA

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 1.
Clasificación de Niveles de Riesgo y Acciones Ergonómicas según el Método REBA

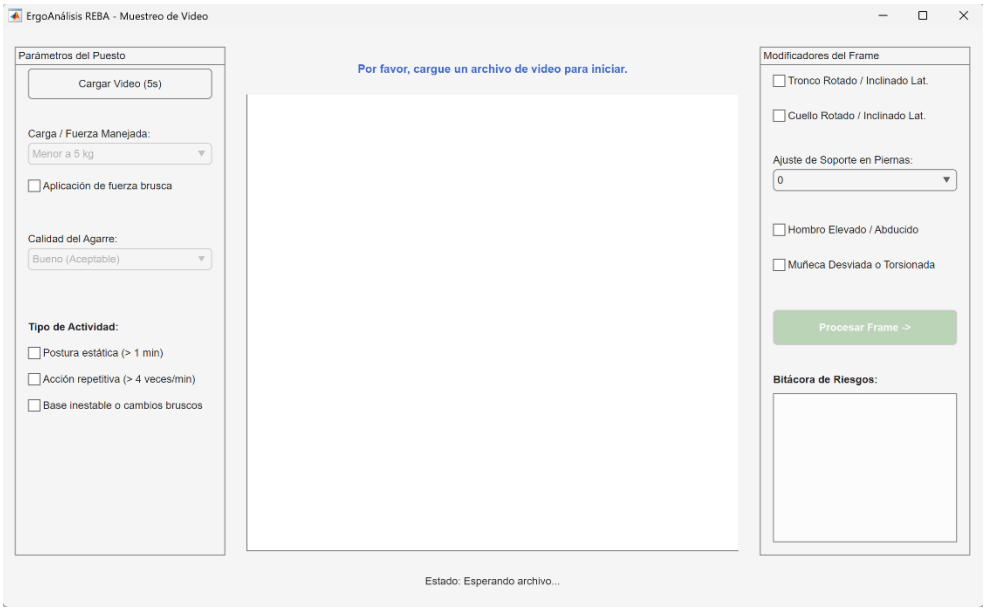
Score REBA	Nivel de Riesgo	Urgencia de la Acción	Descripción e Impacto Fisioterapéutico
1	Inapreciable	No es necesaria	Postura completamente neutral y balanceada.
2 – 3	Bajo	Puede ser necesaria	Exposición controlada, requiere monitoreo periódico.
4 – 7	Medio	Es necesaria	Fatiga muscular acumulativa; riesgo inminente de lesión.
8 – 10	Alto	Es necesaria cuanto antes	Estrés biomecánico severo; daño tisular crónico acelerado.
11 – 15	Muy Alto	Inmediata	Peligro severo de incapacidad física irreversible; cese inmediato.

3. Arquitectura del Sistema Digital y Modelación Numérica en MATLAB

Con el propósito de automatizar la evaluación ergonómica mediante el método REBA, se desarrolló una plataforma computacional utilizando el entorno **MATLAB R2024a** (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) bajo el paradigma de programación orientada a objetos (POO), empleando la herramienta App Designer (Figura 2) para el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI). La clase desarrollada, denominada analisis_REBA_GUI.m, encapsula la interfaz de usuario, las variables dinámicas de estado y los algoritmos matemáticos que procesan y triangulan los datos cinemáticos de entrada con las reglas discretas del estándar REBA.

Figura 2.

GUI en MatLab para el análisis de video/imagen por el método REBA



La imagen o video para analizar de las actividades de un agricultor en campo, se toma como ejemplo de análisis un video con duración de aproximadamente 5 segundos (Figura 3), donde se analizan 5 frames que corresponden a cada segundo de video.

Figura 3.

Video de ejemplo para el análisis por el método REBA



3.1 Análisis de la Estructura del Código Fuente y Propiedades del Objeto

La plataforma fue desarrollada utilizando **MATLAB App Designer**, herramienta que permite implementar aplicaciones interactivas bajo un paradigma de programación orientada a objetos (POO). La aplicación hereda las funcionalidades de la clase base matlab.apps.AppBase, lo que garantiza una administración eficiente del ciclo de vida del software, incluyendo la inicialización, gestión de eventos, procesamiento de datos y actualización dinámica de la interfaz gráfica (MathWorks, 2024).

La arquitectura de la interfaz de usuario fue diseñada siguiendo un enfoque modular que facilita la interacción entre el operador y el sistema de evaluación ergonómica. Para ello, la aplicación se organiza en tres áreas funcionales principales (Figura 2):

Área de visualización.

Constituye el espacio central de la interfaz y está conformada por la ventana principal (*UIFigure*) y los ejes gráficos (*UIAxes*), donde se visualizan las secuencias de video o las imágenes individuales correspondientes a las actividades agrícolas analizadas. Este módulo permite representar de forma gráfica cada fotograma procesado, facilitando la inspección visual de las posturas adoptadas por el trabajador y la verificación del análisis cinemático realizado por el sistema.

Panel de configuración de la actividad.

Ubicado en el sector izquierdo de la interfaz, este panel concentra los controles necesarios para definir las condiciones generales de la evaluación ergonómica. Desde este módulo el usuario puede cargar las secuencias de video (LoadVideoBtn), especificar el peso aproximado de la carga manipulada (CargaDropDown), indicar la presencia de esfuerzos bruscos (FuerzaBruscaChkBx), seleccionar la calidad del agarre (AgarreDropDown) y registrar las características temporales de la actividad, incluyendo la existencia de posturas estáticas (EstaticaChkBx), movimientos repetitivos (RepetitivaChkBx) o condiciones de inestabilidad (InestableChkBx). Estos parámetros complementan la información cinemática obtenida mediante el procesamiento de imágenes y permiten ajustar el cálculo del puntaje REBA conforme a los criterios establecidos por Hignett y McAtamney (2000).

Panel de configuración de la actividad.

El panel derecho integra las herramientas destinadas a realizar ajustes específicos sobre determinados segmentos corporales cuando éstos no pueden identificarse completamente mediante el procesamiento automático de imágenes. Entre estos ajustes se incluyen la detección de torsión o inclinación del tronco (TroncoAjusteChkBx), rotación cervical (CuelloAjusteChkBx), elevación del hombro o abducción del brazo (BrazoAjusteChkBx), desviaciones de la muñeca (MunecaAjusteChkBx). Así mismo, incorpora un menú desplegable para las condiciones particulares del apoyo o inestabilidad de las extremidades inferiores (PiernasAjusteDropDown). El procesamiento de cada fotograma se ejecuta mediante el botón de acción ProcesarFrameBtn y los resultados numéricos se registran dinámicamente en el componente analítico de texto ResultsTextArea.

3.2 Lógica del Callback de Procesamiento de Imágenes y Algoritmo REBA

El núcleo computacional del sistema radica en la función interna procesarFrame(app). Cuando un operador activa el procesamiento, la plataforma ejecuta una subrutina matemática secuencial estructurada bajo el siguiente flujo lógico:

1. Extracción de Ángulos Cinemáticos Básicos: El software adquiere de forma nativa los ángulos articulares medidos (Ángulo de Tronco, Cuello, Rodilla, Brazo y Antebrazo) mediante algoritmos de segmentación y detección de contornos o mediante la lectura directa del registro de coordenadas vectoriales en la base de datos.

2. Evaluación Numérica del Grupo A: Se asigna una puntuación discreta al tronco basándose en umbrales angulares estrictos. Si el operador activa la casilla TroncoAjusteChkBx, la lógica interna añade una penalización de +1 de forma inmediata. Un flujo similar se aplica para el cuello y las rodillas. La puntuación total del Grupo A se incrementa numéricamente leyendo el estado de CargaDropDown y FuerzaBruscaChkBx.

3. Evaluación Numérica del Grupo B: El software mapea el ángulo del brazo y aplica una penalización si BrazoAjusteChkBx es verdadero. El antebrazo y la muñeca son calificados bajo el mismo principio. La puntuación total del Grupo B se rectifica sumando el valor entero correspondiente al elemento seleccionado en AgarreDropDown.

4. Triangulación Computacional en Tabla C: Utilizando las puntuaciones rectificadas de los Grupos A y B como índices enteros de una matriz bidimensional predefinida internamente en MATLAB, el programa

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

realiza una operación de búsqueda indexada de alta velocidad para extraer la puntuación base de la Tabla C.

5. Cálculo del Score REBA Final e Inferencia del Riesgo: La puntuación de la Tabla C es sumada algebraicamente al Score de Actividad, el cual se calcula evaluando dinámicamente si los estados lógicos de EstaticaChkBx, RepetitivaChkBx o InestableChkBx se encuentran activos. Finalmente, una estructura condicional anidada de tipo switch-case o if-elseif clasifica el Score REBA Final, determina el nivel de riesgo clínico y despliega de manera automática la directiva ergonómica correspondiente en el panel de resultados.

4. Resultados

Con el propósito de evaluar el desempeño funcional de la plataforma digital desarrollada y verificar su capacidad para cuantificar el riesgo ergonómico mediante el método REBA, se analizó una secuencia de video correspondiente a una actividad agrícola de recolección manual realizada a nivel del suelo (Figura 4). Para ello, se seleccionó un fragmento continuo de **5.0 segundos**, obtenido a partir de una grabación en alta resolución, representativo del ciclo de trabajo del operario durante la ejecución de la tarea.

La secuencia fue procesada mediante la aplicación desarrollada en MATLAB, la cual realizó el cálculo de los ángulos articulares y la estimación automática de las puntuaciones correspondientes al método REBA para cada uno de los fotogramas analizados. La información generada por la plataforma fue exportada a una base de datos para su análisis posterior, registrando las variables cinemáticas de interés, las puntuaciones parciales de los Grupos A y B, el valor obtenido en la Tabla C y el **Score REBA Final**, así como la clasificación del nivel de riesgo ergonómico.

Los resultados obtenidos permiten describir la evolución temporal de la carga biomecánica durante el ciclo de recolección, identificar los instantes de mayor exigencia postural y evaluar la capacidad de la plataforma para detectar cambios en el nivel de riesgo asociados con las diferentes fases del movimiento. La **Tabla 2** resume los parámetros cinemáticos y ergonómicos calculados para cada instante analizado.

Figura 4.

Uso de la APP/GUI en Matlab para el análisis del video

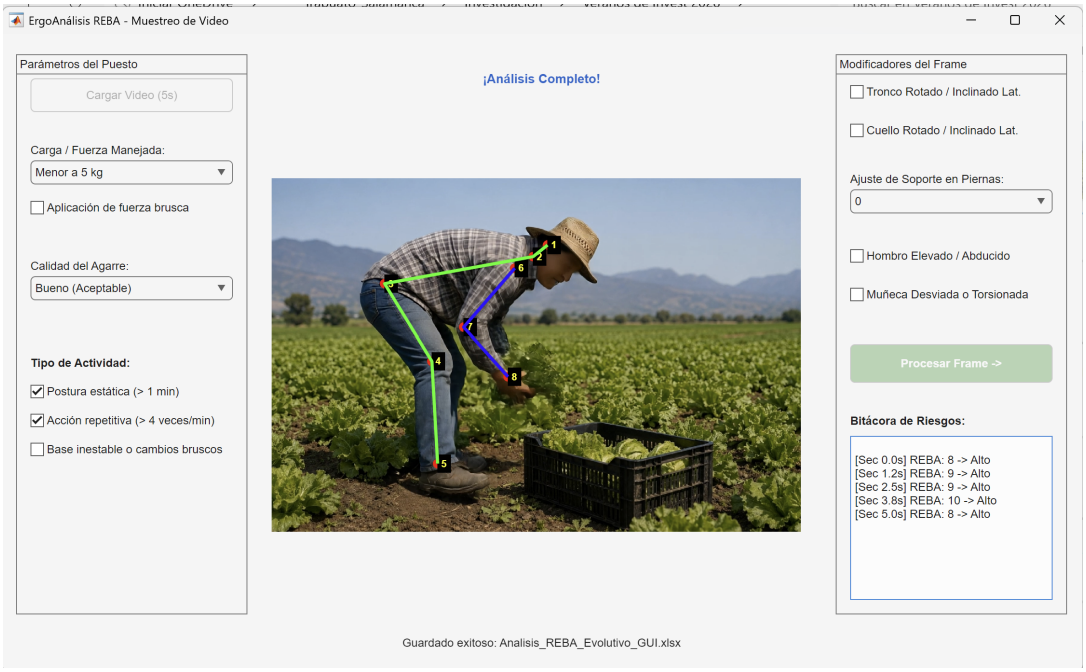


Tabla 2.
Resultados del análisis de video según el Método REBA

Instante	Ang. Tronco	Ang. Cuello	Ang. Rodilla	Ang. Brazo	Ang. Antebr.	Score A	Score B	Tabla C	REBA Final	Nivel Riesgo	Acción
0.0 s	100.5°	160.6°	30.0°	2.7°	51.2°	7	1	7	8	Alto	Acción cuanto antes
1.2 s	97.1°	21.2°	33.4°	12.5°	46.4°	8	1	8	9	Alto	Acción cuanto antes
2.5 s	101.5°	40.3°	51.8°	17.4°	17.4°	8	1	8	9	Alto	Acción cuanto antes
3.8 s	85.9°	36.8°	60.7°	24.2°	24.2°	9	2	9	10	Alto	Acción cuanto antes
5.0 s	98.5°	27.0°	29.2°	38.7°	75.4°	7	2	7	8	Alto	Acción cuanto antes

4.1 Discusión clínica y biomecánica por instante.

Con el propósito de analizar la evolución de la carga biomecánica durante la actividad agrícola, se realizó un estudio secuencial de cinco instantes representativos del ciclo de recolección obtenidos a partir del video procesado por la plataforma digital desarrollada. Cada instante corresponde a una fase funcional del movimiento y permite identificar las modificaciones progresivas de la postura corporal, así como su influencia sobre la puntuación obtenida mediante el método REBA. Este enfoque temporal proporciona una interpretación más completa del comportamiento biomecánico del trabajador que la evaluación de un único fotograma, permitiendo identificar los momentos críticos de exposición ergonómica y comprender la evolución del riesgo durante toda la ejecución de la tarea (Hignett & McAtamney, 2000; McGill, 2007).

Tabla 3.

Secuencia temporal del ciclo de recolección agrícola analizado mediante la plataforma digital desarrollada.

Momento	Fotograma	Tiempo (s)	Fase funcional del movimiento	Score REBA
A		0.0	Aproximación al plano de trabajo	8

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

B		1.2	Descenso controlado	9
C				
D		3.8	Inicio del levantamiento	10
E		5.0	Incorporación y transición	8

Nota. La secuencia corresponde a un ciclo continuo de recolección manual analizado mediante la plataforma desarrollada en MATLAB. Cada imagen representa un instante característico del movimiento utilizado para la evaluación ergonómica mediante la escala REBA.

Fase A. Aproximación al plano de trabajo (0.0s)

En el instante inicial del ciclo (Tabla 3A), el trabajador adopta una postura de aproximación al cultivo caracterizada por una **flexión del tronco de 100.5°**, una **desviación cervical de 160.6°**, una participación mínima del **brazo (2.7°)** y una **flexión del antebrazo de 51.2°**. Esta configuración concentra la mayor carga biomecánica sobre el eje axial, mientras que las extremidades superiores permanecen próximas a una posición funcional.

Como consecuencia, el **Grupo A** alcanza una puntuación de **7**, debido principalmente a la marcada flexión del tronco y la alteración de la alineación cervical. En contraste, la escasa participación del miembro superior mantiene el **Grupo B** en **1**. La integración de ambas puntuaciones mediante la **Tabla C**, junto con el modificador asociado a la naturaleza repetitiva de la actividad, genera un **Score REBA Final de 8**, clasificando esta postura como de **riesgo alto**.

Desde la perspectiva biomecánica, este primer instante evidencia que el riesgo ergonómico aparece desde el inicio de la tarea, antes incluso de manipular el producto agrícola, debido a la importante flexión del tronco requerida para aproximarse al plano de trabajo.

Fase B. Descenso controlado (1.2 s)

Durante el descenso hacia el plano de recolección (Tabla 3B), el **tronco mantiene una flexión de 97.1°**, mientras que el **cuello reduce su desviación hasta 21.2°**, mostrando una alineación más cercana a la posición funcional. Paralelamente, las **rodillas incrementan su flexión hasta 33.4°**, reflejando el descenso del centro de gravedad para aproximarse al cultivo. El **brazo** presenta una flexión de **12.5°** y el **antebrazo de 46.4°**, sin modificaciones importantes respecto al instante previo.

Aunque la corrección cervical representa una ligera mejoría postural, la persistencia de una flexión lumbar cercana a los 100° mantiene elevada la carga mecánica sobre la columna vertebral. Esta condición incrementa la puntuación del **Grupo A** hasta **8**, mientras que el **Grupo B** permanece en **1**. Como resultado, el **Score REBA Final aumenta a 9**, indicando un incremento de la exposición ergonómica conforme progresa el movimiento.

Este comportamiento demuestra que la incorporación progresiva de las extremidades inferiores no es suficiente para compensar la elevada carga generada por la flexión sostenida del tronco.

Fase C. Manipulación del producto (2.5 s)

El instante correspondiente a la manipulación del producto (Tabla 3C) representa el momento de mayor demanda postural del ciclo analizado. En esta fase, el **tronco alcanza su máxima flexión (101.5°)**, el **cuello incrementa nuevamente su desviación hasta 40.3°** y las **rodillas registran una flexión de 51.8°**, aproximándose a una postura de cuclillas parcial. Las extremidades superiores continúan mostrando una participación moderada (**brazo: 17.4°; antebrazo: 17.4°**).

La combinación simultánea de estos ángulos incrementa la demanda de estabilización del complejo lumbopélvico y de las extremidades inferiores, manteniendo el **Grupo A** en **8** y el **Grupo B** en **1**. En consecuencia, la **Tabla C** conserva una puntuación de **8**, obteniéndose nuevamente un **Score REBA Final de 9**.

Aunque la puntuación REBA no aumenta respecto al instante anterior, este momento representa el **pico biomecánico del ciclo**, ya que concentra la mayor flexión del tronco y la mayor participación conjunta de cuello y extremidades inferiores durante la maniobra de prensión del producto.

Fase D. Inicio del levantamiento (3.8 s)

Una vez desprendido el producto agrícola (Tabla 3D), el trabajador inicia la incorporación del cuerpo, observándose una disminución progresiva de la flexión del tronco (**85.9°**) y una recuperación parcial de la alineación cervical (**36.8°**). Simultáneamente, las extremidades inferiores continúan proporcionando estabilidad durante el inicio del levantamiento, mientras que las extremidades superiores comienzan a participar activamente en el control de la carga manipulada.

Aunque algunos segmentos corporales muestran una tendencia hacia posiciones más funcionales, la carga biomecánica permanece elevada debido al esfuerzo requerido para vencer el peso del tronco y del producto

recolectado. Esta situación mantiene el **Grupo A** en **9**, el **Grupo B** en **2** y un **Score REBA Final de 10**, evidenciando que el riesgo ergonómico persiste durante la transición hacia la postura erguida.

Desde el punto de vista funcional, este instante representa el inicio de la recuperación postural, aunque la exigencia mecánica continúa siendo considerable.

Fase E. Incorporación y transición (5.0 s)

En el último instante analizado (Tabla 3E), el trabajador continúa la incorporación del tronco, registrándose una flexión de **98.5°**, mientras que el cuello recupera progresivamente una posición más cercana a la neutralidad (**27.0°**). Las rodillas disminuyen su flexión conforme el centro de gravedad asciende, completando la transición hacia una postura más erguida.

Esta reorganización postural reduce parcialmente la carga mecánica sobre el eje axial; sin embargo, la evaluación REBA continúa reflejando un nivel de riesgo elevado (**Grupo A = 7; Grupo B = 2; Score REBA Final = 8**), debido a que la exposición acumulada durante el ciclo permanece dentro de los criterios de intervención establecidos por el método.

Este comportamiento confirma que el riesgo ergonómico asociado a la recolección manual no depende únicamente de un instante aislado, sino de la repetición continua de ciclos de movimiento con características biomecánicas similares, condición ampliamente relacionada con el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos en trabajadores agrícolas (Barneo-Alcántara et al., 2021).

Evolución biomecánica del ciclo de trabajo

El análisis secuencial evidencia que la exposición ergonómica durante la recolección manual corresponde a un proceso dinámico en el que la distribución de las cargas biomecánicas cambia conforme progresa el movimiento. En la fase inicial predomina la flexión del tronco como principal determinante del riesgo; posteriormente aumenta la participación de las extremidades inferiores durante el descenso y la manipulación del producto; finalmente, durante la incorporación, la demanda mecánica persiste debido al esfuerzo requerido para recuperar la postura erguida.

Desde la perspectiva de la fisioterapia ocupacional, estos resultados indican que las intervenciones preventivas no deben centrarse únicamente en corregir una postura específica, sino en optimizar el patrón completo de movimiento mediante estrategias de educación postural, fortalecimiento de la musculatura estabilizadora del complejo lumbopélvico, entrenamiento del control motor y rediseño ergonómico de las tareas agrícolas. Asimismo, la plataforma digital desarrollada demostró su capacidad para identificar objetivamente las variaciones temporales del riesgo postural, proporcionando información cuantitativa que puede contribuir al diseño de programas de vigilancia ergonómica y prevención de trastornos musculoesqueléticos en el sector agrícola.

5. Discusión General.

5.1 Validación de la plataforma digital.

Los resultados obtenidos demuestran que la plataforma desarrollada fue capaz de integrar de manera eficiente el procesamiento digital de imágenes con el método REBA, permitiendo calcular automáticamente los ángulos articulares y clasificarlos según el nivel de riesgo ergonómico establecido por este instrumento. Durante el análisis del ciclo de recolección, el sistema identificó las variaciones posturales del trabajador y generó de forma automática las puntuaciones correspondientes a los Grupos A y B, la Tabla C y el **Score REBA Final**, manteniendo una secuencia lógica de evaluación para cada instante analizado.

Uno de los principales aportes de la plataforma consiste en disminuir la subjetividad inherente a la aplicación manual del método REBA. Tradicionalmente, la estimación de los ángulos corporales depende de la experiencia del evaluador, lo que puede generar diferencias entre observadores y afectar la reproducibilidad de los resultados. En contraste, la automatización propuesta permite estandarizar el procedimiento de evaluación y obtener mediciones objetivas que pueden repetirse bajo las mismas condiciones de análisis (Hignett & McAtamney, 2000; MathWorks, 2024).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

5.2 Relevancia para la fisioterapia ocupacional.

Desde la perspectiva de la fisioterapia ocupacional, la principal fortaleza de la plataforma radica en su capacidad para identificar objetivamente las fases del movimiento donde existe una mayor exposición biomecánica. En lugar de limitarse a emitir una puntuación final del riesgo, el sistema permite conocer cómo evoluciona la carga postural durante toda la ejecución de la tarea, proporcionando información útil para comprender el origen de los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo.

Esta información facilita el diseño de estrategias preventivas dirigidas específicamente a los momentos críticos del movimiento, favoreciendo intervenciones como la reeducación postural, el entrenamiento del control motor, el fortalecimiento de la musculatura estabilizadora y la modificación de los patrones de trabajo. De esta manera, la plataforma puede constituirse como una herramienta de apoyo para la valoración fisioterapéutica, la vigilancia ergonómica y la planificación de programas de prevención en trabajadores expuestos a actividades agrícolas repetitivas (World Physiotherapy, 2023).

5.3 Comparación con estudios previos.

Los hallazgos obtenidos coinciden con investigaciones previas que reportan una elevada exposición a factores de riesgo musculoesquelético durante actividades agrícolas que requieren flexiones repetidas del tronco y trabajo cercano al nivel del suelo (Barneo-Alcántara et al., 2021; Shivakumar et al., 2023). Asimismo, la permanencia de puntuaciones REBA correspondientes a niveles de riesgo alto durante gran parte del ciclo de trabajo respalda la utilidad de este método para identificar tareas con una elevada demanda biomecánica.

Sin embargo, el presente estudio incorpora un elemento diferenciador respecto a la mayoría de las investigaciones publicadas. Mientras que numerosos trabajos aplican el método REBA mediante observación directa o análisis manual de imágenes, la plataforma desarrollada integra en un solo entorno computacional la adquisición de imágenes, el cálculo automático de ángulos articulares, la implementación del algoritmo REBA y la generación inmediata del nivel de riesgo. Esta integración representa un avance hacia sistemas de evaluación ergonómica más objetivos, reproducibles y eficientes, con potencial para apoyar estudios de investigación y programas de salud ocupacional (Plantard et al., 2017; Zhang et al., 2023).

5.4 Aplicaciones y perspectivas futuras.

La arquitectura modular de la plataforma permite extender su aplicación más allá del análisis de actividades agrícolas. El mismo procedimiento podría utilizarse para evaluar tareas desarrolladas en sectores como la industria manufacturera, la construcción, la logística, la atención sanitaria e incluso la práctica clínica en fisioterapia, donde el análisis objetivo de la postura constituye un elemento fundamental para la prevención de lesiones y la optimización del desempeño funcional.

Asimismo, la estructura del sistema facilita la incorporación futura de tecnologías basadas en inteligencia artificial, como algoritmos automáticos de estimación de pose humana, análisis tridimensional del movimiento y procesamiento en tiempo real mediante cámaras convencionales. Estas mejoras ampliarían la capacidad de la plataforma para realizar evaluaciones ergonómicas con una mínima intervención del usuario y favorecerían su integración en programas institucionales de vigilancia ergonómica, investigación aplicada y prevención de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (Moeslund et al., 2006; Zhang et al., 2023).

6. Limitaciones del estudio y perspectivas futuras.

La plataforma desarrollada demostró ser funcional para la evaluación ergonómica de posturas laborales mediante el procesamiento digital de imágenes y la implementación automatizada del método REBA. Sin embargo, es importante reconocer algunas limitaciones metodológicas que deberán considerarse en investigaciones posteriores.

En primer lugar, el presente estudio se realizó utilizando el análisis de un ciclo de trabajo correspondiente a un trabajador agrícola, por lo que los resultados obtenidos representan un estudio de caso y no pueden generalizarse a toda la población trabajadora. La incorporación de un mayor número de participantes permitirá evaluar la variabilidad postural asociada a diferentes características antropométricas, niveles de experiencia y condiciones de trabajo.

Otra limitación corresponde al empleo de un análisis bidimensional basado en imágenes obtenidas desde un único plano de observación. Aunque esta metodología permitió identificar adecuadamente los principales ángulos articulares requeridos por el método REBA, algunos movimientos fuera del plano de captura podrían no ser representados con la misma precisión que en sistemas tridimensionales de análisis del movimiento.

Asimismo, la localización de los puntos anatómicos se realizó mediante la identificación de referencias visibles sobre la imagen, procedimiento que, si bien resultó adecuado para los objetivos del estudio, aún depende parcialmente de la intervención del usuario. La incorporación de algoritmos de estimación automática de pose humana permitiría reducir este proceso y mejorar la eficiencia del sistema.

Como parte del trabajo futuro, se propone integrar modelos de visión por computadora basados en inteligencia artificial, como **MediaPipe Pose**, **OpenPose** o arquitecturas de aprendizaje profundo para la detección automática de articulaciones humanas. Estas herramientas permitirían automatizar completamente el proceso de análisis, incrementar la precisión de las mediciones y facilitar la evaluación de múltiples trabajadores en tiempo real.

De igual forma, futuras investigaciones deberán considerar la validación de la plataforma frente a sistemas de referencia empleados en análisis biomecánico, como los sistemas optoelectrónicos de captura tridimensional del movimiento, así como su comparación con evaluaciones realizadas por expertos en ergonomía. Esta validación contribuirá a determinar la precisión, sensibilidad y confiabilidad del sistema en diferentes escenarios laborales.

Finalmente, la arquitectura modular desarrollada ofrece la posibilidad de ampliar la plataforma hacia nuevos métodos de evaluación ergonómica, como **RULA**, **OWAS** o la **Ecuación Revisada de Levantamiento de NIOSH**, así como incorporar módulos de generación automática de reportes, almacenamiento en la nube y seguimiento longitudinal de trabajadores, fortaleciendo su aplicación en programas de vigilancia epidemiológica y prevención de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo.

7. Conclusiones.

El desarrollo de la plataforma digital permitió integrar exitosamente técnicas de procesamiento digital de imágenes con el método **Rapid Entire Body Assessment (REBA)** para la evaluación objetiva del riesgo ergonómico durante actividades agrícolas. La implementación computacional realizada en MATLAB demostró que es posible automatizar el cálculo de los ángulos articulares, la clasificación de las posturas y la obtención del nivel de riesgo, reduciendo la subjetividad asociada a la aplicación convencional del método.

El análisis secuencial del ciclo de recolección evidenció que la exposición biomecánica constituye un fenómeno dinámico, en el que la distribución de las cargas posturales cambia conforme avanza la tarea. La identificación de los momentos de mayor exigencia funcional permitió comprender cómo la combinación de la flexión del tronco, la participación de la región cervical y el comportamiento de las extremidades inferiores determina la evolución del riesgo musculoesquelético durante la actividad agrícola.

Desde la perspectiva de la fisioterapia ocupacional, la plataforma representa una herramienta de apoyo para la valoración ergonómica objetiva, al proporcionar información cuantitativa que facilita la identificación de factores de riesgo y la planificación de estrategias preventivas orientadas a disminuir la incidencia de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo. Su aplicación puede contribuir al fortalecimiento de programas de vigilancia ergonómica, evaluación funcional y diseño de intervenciones basadas en evidencia.

Finalmente, la arquitectura modular del sistema establece una base sólida para el desarrollo de futuras herramientas inteligentes de evaluación postural. La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, análisis tridimensional del movimiento y procesamiento en tiempo real permitirá ampliar las capacidades de la plataforma y favorecer su implementación en distintos sectores productivos, consolidándola como una alternativa tecnológica con potencial para apoyar la investigación, la práctica clínica y la prevención de lesiones en salud ocupacional.

7.1 Implicaciones clínicas y prácticas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian el potencial de la plataforma desarrollada como una herramienta tecnológica de apoyo para la evaluación ergonómica objetiva en actividades agrícolas, facilitando la identificación temprana de factores de riesgo asociados con el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo. Su capacidad para automatizar el análisis postural mediante el procesamiento digital de imágenes y la implementación del método REBA permite generar información cuantitativa que puede complementar la toma de decisiones de fisioterapeutas, médicos del trabajo, ingenieros en seguridad e higiene y especialistas en salud ocupacional.

En el contexto mexicano, donde el sector agrícola representa una de las actividades económicas con mayor demanda física y una elevada exposición a posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas, la incorporación de herramientas digitales de evaluación ergonómica constituye una oportunidad para fortalecer las estrategias de prevención de riesgos laborales. La identificación objetiva de las tareas con mayor carga biomecánica permite priorizar intervenciones preventivas dirigidas a modificar los métodos de trabajo, optimizar los procesos productivos y reducir la probabilidad de lesiones musculoesqueléticas derivadas de la actividad laboral.

Desde la perspectiva clínica, la plataforma ofrece información que puede incorporarse durante la valoración fisioterapéutica ocupacional para identificar patrones de movimiento con mayor exigencia biomecánica, establecer programas individualizados de educación postural, entrenamiento del control motor y fortalecimiento de grupos musculares específicos, así como evaluar objetivamente la efectividad de las intervenciones implementadas mediante comparaciones seriadas del desempeño postural del trabajador.

De igual forma, la automatización del análisis favorece la implementación de programas institucionales de vigilancia ergonómica, al permitir documentar de manera estandarizada las condiciones de trabajo y generar evidencia objetiva para la identificación de puestos con mayor nivel de exposición. Esta información puede contribuir al diseño de programas preventivos orientados a disminuir la incidencia de trastornos musculoesqueléticos, mejorar las condiciones laborales y promover entornos de trabajo más seguros.

En materia normativa, la plataforma desarrollada puede constituirse como una herramienta complementaria para apoyar los procesos de identificación y evaluación de factores de riesgo ergonómico contemplados en la legislación mexicana en materia de seguridad y salud en el trabajo. Particularmente, su aplicación resulta congruente con los principios establecidos en la **NOM-036-1-STPS-2018**, relativa a los factores de riesgo ergonómico asociados al manejo manual de cargas, así como con las disposiciones generales sobre prevención de riesgos laborales establecidas en el **Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo**. Si bien la plataforma no sustituye la evaluación realizada por personal competente ni los procedimientos establecidos por la normatividad vigente, sí proporciona evidencia objetiva que puede fortalecer los procesos de diagnóstico ergonómico, priorización de intervenciones y seguimiento de las acciones preventivas implementadas.

Asimismo, la naturaleza modular del sistema favorece su integración con futuras estrategias de transformación digital en materia de salud ocupacional. La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, análisis automático del movimiento y procesamiento en tiempo real permitirá ampliar su aplicación hacia sistemas inteligentes de vigilancia ergonómica, contribuyendo al fortalecimiento de la cultura preventiva en los centros de trabajo y favoreciendo la transición hacia modelos de gestión basados en evidencia.

En conjunto, la plataforma desarrollada representa una alternativa tecnológica con potencial para fortalecer la práctica de la fisioterapia ocupacional y la ergonomía aplicada en México, al proporcionar una metodología objetiva, reproducible y de fácil implementación para la evaluación del riesgo postural. Su utilización puede contribuir tanto al cumplimiento de las estrategias nacionales de prevención de riesgos laborales como al desarrollo de investigaciones orientadas a mejorar la salud, la seguridad y la calidad de vida de los trabajadores.

Bibliografía

Barneo-Alcántara, M., Díaz-Pérez, M., Gómez-Galán, M., Carreño-Ortega, Á., & Callejón-Ferre, Á.-J. (2021). Musculoskeletal disorders in agriculture: A review from Web of Science Core Collection. *Agronomy, 11*(10), 2017. https://doi.org/10.3390/agronomy11102017.

Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics, 31*(2), 201–205. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE): Indicadores de ocupación y empleo. https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/

International Labour Organization. (2023). *Safety and health in agriculture*. International Labour Organization.

MathWorks. (s. f.). *Desarrollar aplicaciones con App Designer*. Recuperado el 22 de julio de 2026, de https://es.mathworks.com/help/matlab/app-designer.html

McGill, S. M. (2007). *Low back disorders: Evidence-based prevention and rehabilitation* (2nd ed.). Human Kinetics.

Moeslund, T. B., Hilton, A., & Krüger, V. (2006). A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Computer Vision and Image Understanding, 104*(2–3), 90–126. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.08.002

Plantard, P., Auvinet, E., Pierres, A.-S. L., & Multon, F. (2015). Pose estimation with a Kinect for ergonomic studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. *Sensors, 15*(1), 1785–1803. https://doi.org/10.3390/s150101785

Secretaría de Gobernación. (2014, 13 de noviembre). *Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo*. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5368114&fecha=13/11/2014

Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2018, 23 de noviembre). *Norma Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018, factores de riesgo ergonómico en el trabajo: Identificación, análisis, prevención y control. Parte 1: Manejo manual de cargas*. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5544579&fecha=23/11/2018

Shivakumar, M., Welsh, V., Bajpai, R., Helliwell, T., Mallen, C., Robinson, M., & Shepherd, T. (2024). Musculoskeletal disorders and pain in agricultural workers in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Rheumatology International, 44*, 235–247. https://doi.org/10.1007/s00296-023-05500-5

Tonelli, S., Culp, K., & Donham, K. (2014). Work-related musculoskeletal disorders in senior farmers: Safety and health considerations. *Workplace Health & Safety, 62*(8), 333–341. https://doi.org/10.1177/216507991406200804

World Physiotherapy. (2023). *Policy statement: Occupational health and safety of physiotherapists*. https://world.physio/sites/default/files/2024-01/PS-2023-Occupational-health.pdf

Zhang, X., Chen, Y., Wang, H., & Li, Z. (2023). Vision-based ergonomic risk assessment using deep learning human pose estimation: A review. Applied Sciences, 13(9), 5512. https://doi.org/10.3390/app13095512