

RELIGACIÓN

R E V I S T A

Acondicionamiento mecanizado de sustratos: impacto en propiedades físicoquímicas, viabilidad de plántulas y productividad en viveros

Mechanized substrate conditioning: Impact on physicochemical properties, seedling viability, and nursery productivity

Félix Javier Manjarrés Arias, Ernesto Ramiro Santillán Mariño, Jorge Eduardo Meythaler Naranjo, Hernán Vinicio Morales Villegas, Harold Saúl Díaz Báez

Resumen

La preparación de sustratos en viveros de la región andina constituye una operación fundamental que impacta directamente la viabilidad de las plántulas y la productividad general. Sin embargo, los métodos manuales tradicionales representan un cuello de botella productivo, generan inconsistencias en la calidad del producto final y exponen a los operarios a riesgos ergonómicos significativos. Este artículo presenta el diseño, la validación y la evaluación de impacto de un sistema mecatrónico semiautomático que integra los procesos de cernido y mezclado para el acondicionamiento de tierra. La metodología de diseño incluyó la conceptualización basada en las necesidades del usuario, seguida de una validación numérica mediante análisis de elementos finitos (FEA) y de elementos discretos (DEM) para optimizar la integridad estructural y la dinámica de partículas. El prototipo implementado fue evaluado experimentalmente en el Vivero de Tunducama (Cotopaxi, Ecuador). Los resultados demuestran una mejora sustancial en la calidad del sustrato, reflejada en un incremento del 31,63% en la tasa de supervivencia de las plántulas. Adicionalmente, se registró un aumento del 5,00% en la capacidad de producción diaria, mientras se reducía la fuerza laboral requerida de seis a dos operarios. Se concluye que la integración mecanizada de estos procesos ofrece una solución tecnológica viable y de alto impacto, que optimiza los recursos, estandariza la calidad del producto agronómico y mitiga la carga física sobre el trabajador.

Palabras clave: Acondicionamiento de sustratos; viabilidad de plántulas; sistema mecatrónico; análisis FEA; productividad; ergonomía; zaranda

Félix Javier Manjarrés Arias

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador | fxmanjarres@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2045-9276>

Ernesto Ramiro Santillán Mariño

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador | ersantillan@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9358-9739>

Jorge Eduardo Meythaler Naranjo

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador | jemeythaler@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3639-5222>

Hernán Vinicio Morales Villegas

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador | hvmorales@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8211-1238>

Harold Saúl Díaz Báez

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador | hsdiaz@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-3750-8224>

<http://doi.org/10.46652/rgn.v10i48.1560>

ISSN 2477-9083

Vol. 10 No. 48, 2025, e2501560

Quito, Ecuador

Enviado: junio 15, 2025

Aceptado: septiembre 14, 2025

Publicado: octubre 07, 2025

Publicación Continua



Abstract

Substrate preparation in nurseries in the Andean region is a fundamental operation that directly impacts seedling viability and overall productivity. However, traditional manual methods represent a production bottleneck, create inconsistencies in the quality of the final product, and expose operators to significant ergonomic risks. This article presents the design, validation, and impact evaluation of a semi-automated mechatronic system that integrates the processes of sifting and mixing for soil preparation. The design methodology included conceptualization based on user needs, followed by numerical validation using Finite Element Analysis (FEA) and Discrete Element Method (DEM) to optimize structural integrity and particle dynamics. The implemented prototype was experimentally evaluated at the Tunducama Nursery (Cotopaxi, Ecuador). The results demonstrate a substantial improvement in substrate quality, reflected in a 31.63% increase in the seedling survival rate. Additionally, a 5.00% increase in daily production capacity was recorded, while the required workforce was reduced from six to two operators. It is concluded that the mechanized integration of these processes offers a viable and high-impact technological solution that optimizes resources, standardizes agronomic product quality, and mitigates the physical burden on workers.

Keywords: Substrate Preparation; Seedling Viability; Mechatronic System; FEA Analysis; Productivity; Ergonomics; Sieve

Introducción

La horticultura, particularmente la producción de plantas ornamentales y forestales en viveros constituye un pilar fundamental para el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental en ecosistemas de montaña, como la sierra andina ecuatoriana. En esta región, los viveros no solo abastecen cadenas de valor comerciales, sino que también son centros neurálgicos para la generación de material vegetal destinado a cruciales programas de reforestación y restauración ecológica. El éxito de estas unidades productivas está intrínsecamente ligado a la fase inicial de propagación, en la cual la calidad del sustrato de cultivo emerge como el factor determinante. Este medio no es simplemente un soporte físico; funciona como un micro ecosistema en la rizósfera que modula procesos vitales como el intercambio gaseoso, la dinámica hídrica y la disponibilidad de nutrientes. Una estructura subóptima puede derivar en problemas de asfixia radicular, lixiviación de nutrientes o compactación, afectando de manera decisiva el establecimiento del sistema radicular y, por ende, la viabilidad y el vigor de las plántulas (Choi et al., 2012). La obtención de un sustrato con propiedades fisicoquímicas óptimas y predecibles —granulometría homogénea, porosidad adecuada y distribución uniforme de enmiendas— es, por tanto, una condición *sine qua non* para la eficiencia y rentabilidad del vivero.

No obstante, en el contexto de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agrícolas, como es el caso del Vivero Tunducama (Cotopaxi, Ecuador), se presenta una paradoja tecnológica. El acondicionamiento de sustratos se sigue basando en operaciones manuales de cernido y mezcla, un modelo productivo que, si bien minimiza la inversión inicial en capital, impone costos ocultos significativos a largo plazo (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024). Desde una perspectiva de producción, estos métodos representan un cuello de botella sistémico.

La dependencia del esfuerzo humano introduce una variabilidad inherente en el proceso, caracterizado por una baja productividad y una heterogeneidad intrínseca en el producto final.

Dicha inconsistencia, manifestada en gradientes de compactación y una dispersión errática de fertilizantes, conduce a un desarrollo desigual del lote de plántulas, mermando la predictibilidad del ciclo productivo y la rentabilidad. Desde una óptica de la salud ocupacional, la exigencia biomecánica de estas tareas —que implican la manipulación repetitiva de cargas, el mantenimiento de posturas forzadas y movimientos de alta frecuencia— expone a los operarios a un riesgo elevado y acumulativo de trastornos musculoesqueléticos y fatiga crónica, un hecho ampliamente documentado en el sector agrícola (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024). Este paradigma intensivo en mano de obra se revela, por tanto, como social y productivamente insostenible en un entorno que demanda mayor eficiencia y mejores condiciones laborales.

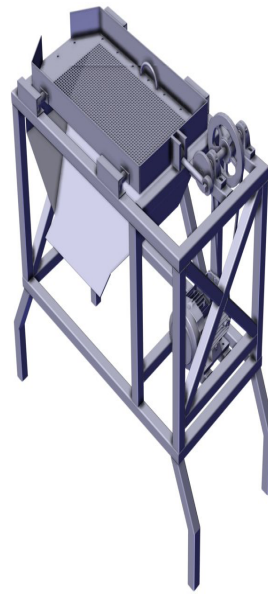
Figura. 1. Representación conceptual del proceso basal de acondicionamiento manual de sustratos y sus limitaciones ergonómicas y de calidad en viveros.



Fuente: elaboración propia

La transición hacia la mecanización se postula como una estrategia ineludible para superar estas limitaciones y catalizar la modernización del sector. La ingeniería de mecanismos contemporánea, potenciada por la sinergia entre el diseño asistido por computador (CAD) y las herramientas de simulación avanzada, ofrece la capacidad de desarrollar soluciones tecnológicas eficientes, robustas y adaptadas al contexto específico de operación (Díaz Báez, 2024). Si bien existen en el mercado global equipos industriales para el cernido y la mezcla, estos suelen estar sobredimensionados, ser energéticamente ineficientes y económicamente inviables para la escala y las realidades operativas de los viveros regionales. La innovación disruptiva, por consiguiente, no reside en la automatización per se, sino en la integración sinérgica y el diseño mecatrónico de un sistema de escala apropiada, que unifique ambas operaciones en un flujo continuo y optimizado. Dicha integración representa una solución de “tecnología apropiada”, diseñada para maximizar la eficiencia del proceso sin incurrir en la complejidad y el costo prohibitivo de los sistemas industriales a gran escala.

Figura. 2. Modelo CAD del prototipo del sistema de cernido mecánico.



Fuente: elaboración propia

Este artículo tiene como finalidad principal detallar y cuantificar el impacto de un sistema semiautomático de acondicionamiento de sustratos, concebido y validado mediante una rigurosa metodología de **Design Thinking**. Se presenta un enfoque de validación numérico-experimental, donde el diseño estructural fue optimizado mediante Análisis por Elementos Finitos (FEA) para asegurar su integridad bajo cargas dinámicas, y la dinámica del material granular fue modelada a través del Método de Elementos Discretos (DEM) para predecir y mejorar la eficiencia del cernido y la homogeneidad de la mezcla. A partir de la implementación de un prototipo funcional, se evalúa empíricamente el impacto tripartito de esta innovación: **1) la eficiencia productiva**, cuantificada a través de la tasa de procesamiento de material; **2) la calidad agronómica del producto**, medida por su efecto directo en la viabilidad de las plántulas; y **3) la optimización del factor humano**, analizada en términos de la reducción de la carga laboral y los operarios requeridos. Los hallazgos ofrecen un modelo tecnológico validado que no solo responde a una necesidad productiva local, sino que también contribuye con un marco replicable para la modernización sostenible y la mejora de la competitividad en el sector hortícola de la región andina.

Desarrollo

Materiales y métodos

Esta sección se estructura en cuatro apartados subsecuentes. Se inicia con la descripción del contexto y el sistema basal, seguido por la metodología de diseño y construcción del sistema mecatrónico. Posteriormente, se detalla el protocolo experimental implementado para la

evaluación comparativa de su impacto. Finalmente, se describe el tratamiento estadístico de los datos recopilados.

Contexto del estudio y caracterización del proceso basal

El presente estudio se realizó *in situ* en las instalaciones del Vivero Tunducama, una unidad de producción adscrita al Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi, Ecuador. Ubicado en la parroquia de Belisario Quevedo, este centro fue seleccionado como un caso de estudio representativo de los viveros de mediana escala en la región altoandina, cuya misión dual abarca tanto la producción de plantas ornamentales de alto valor comercial como la propagación de especies forestales nativas, esenciales para los programas de reforestación provinciales. La ejecución de todas las fases experimentales bajo condiciones operativas reales garantizó la validez ecológica y la pertinencia práctica de los resultados obtenidos.

El paradigma de producción preexistente, que sirve como línea base o control para este estudio, se fundamentaba en un proceso de acondicionamiento de sustratos enteramente manual. Este flujo de trabajo, intensivo en mano de obra, consistía en operaciones secuenciales y físicamente demandantes. El proceso iniciaba con el cernido manual, donde operarios, utilizando palas, transferían la tierra base a través de bastidores con mallas metálicas para segregar impurezas de granulometría no deseada. Subsecuentemente, la mezcla manual se realizaba sobre una superficie plana, donde se incorporaban enmiendas y fertilizantes orgánicos mediante un laborioso proceso de paleado y volteo repetitivo (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024).

Este sistema tradicional, si bien común en la región, presentaba limitaciones sistémicas que afectaban la sostenibilidad del vivero en tres dimensiones críticas:

1. *Constricción Productiva*: el proceso imponía un techo de productividad intrínsecamente ligado a la resistencia física humana. Un equipo de seis operarios lograba procesar un volumen promedio de 4000 litros de sustrato por jornada de ocho horas, constituyendo un cuello de botella que limitaba la capacidad de expansión del vivero (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024).
2. *Heterogeneidad Agronómica*: la falta de un método estandarizado para la mezcla resultaba en una notable heterogeneidad del producto final. La variabilidad inter e intra-operario, exacerbada por la fatiga acumulada, generaba lotes de sustrato con una dispersión errática de nutrientes y gradientes de compactación. Esta inconsistencia es una causa directa de una marcada dispersión en los fenotipos de crecimiento y una menor tasa de supervivencia de las plántulas, comprometiendo la uniformidad y calidad del material vegetal.
3. *Riesgo Ergonómico*: desde una perspectiva de salud ocupacional, la exigencia biomecánica del proceso representaba un riesgo laboral latente y significativo. La combinación de manipulación manual de cargas (superiores a 20 kg por ciclo de paleado), posturas

forzadas y sostenidas con flexión de tronco, y la alta frecuencia de movimientos repetitivos en las extremidades superiores, son factores etiológicos directos para el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos (TME), particularmente en las regiones lumbar, dorsal y del hombro. Esta carga física constante se identificó como una causa principal de fatiga crónica y un factor contribuyente al síndrome de *burnout* entre el personal (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024).

La caracterización de estas deficiencias sistémicas —productivas, agronómicas y, fundamentalmente, humanas— estableció el marco de justificación para el desarrollo de una intervención mecatrónica, concebida no solo como una optimización de procesos, sino como una mejora integral de la sostenibilidad y el bienestar en el entorno del vivero.

Diseño y desarrollo del sistema mecatrónico

El desarrollo del sistema mecatrónico se articuló a través de un marco metodológico híbrido, que integra los principios del **Design Thinking** para la fase de conceptualización y los procedimientos rigurosos de la ingeniería concurrente para el diseño detallado y la validación. Este enfoque estructurado aseguró que la solución tecnológica final no solo fuera técnicamente robusta, sino que también estuviera intrínsecamente alineada con las necesidades operativas, ergonómicas y agronómicas del usuario final.

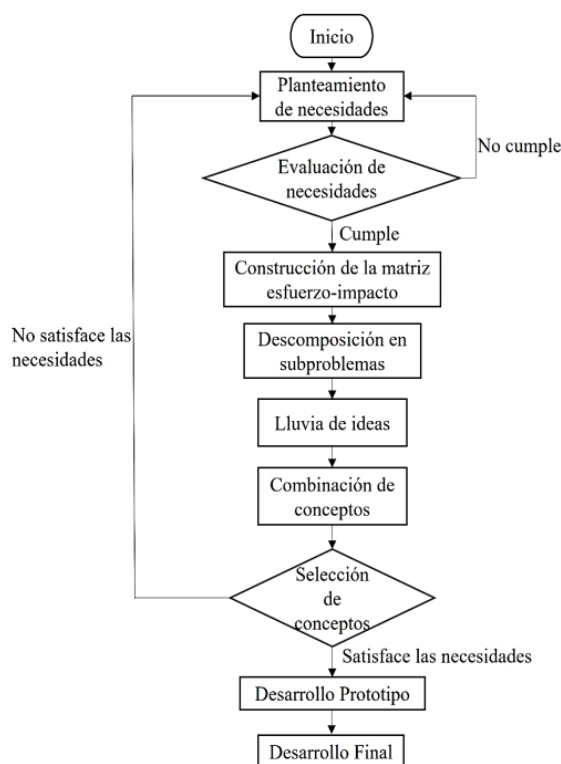
Conceptualización y arquitectura del sistema: un enfoque centrado en el humano

Adoptando un enfoque de Diseño Centrado en el Usuario (DCU), la fase inicial se enfocó en una inmersión profunda en el contexto operativo del Vivero Tunducama. Este paradigma de diseño, que prioriza la comprensión de las necesidades y limitaciones humanas en cada etapa del ciclo de vida del producto, es fundamental para crear soluciones que sean no solo funcionales, sino también usables y seguras (García Acosta et al., 2011). A través de técnicas etnográficas, como la observación directa del proceso y las entrevistas semiestructuradas con el personal (N=20), se recopilaron datos cualitativos sobre el flujo de trabajo, los puntos críticos del proceso y las percepciones de los operarios. Este ejercicio de empatía permitió traducir las problemáticas latentes en un inventario de necesidades explícitas.

Posteriormente, se jerarquizan las necesidades mediante una matriz de impacto-esfuerzo, una herramienta de toma de decisiones que permite priorizar acciones evaluando su potencial de beneficio frente a la complejidad de su implementación. El análisis reveló que los atributos de mayor impacto y viabilidad eran la robustez y durabilidad del equipo, la facilidad de mantenimiento, y la rapidez del ciclo de mezclado. Con las directrices claras, se procedió a la descomposición funcional del problema y a una fase de ideación (**brainstorming**). Se generaron múltiples conceptos para cada subfunción, los cuales fueron combinados para crear cuatro arquitecturas de sistema preliminares. La selección final del concepto se realizó mediante una matriz de ponderación, que integra una

zaranda oscilante de vaivén horizontal y una mezcladora de cintas helicoidales, emergió como la solución óptima al alinear de mejor manera la simplicidad mecánica con la eficiencia del proceso.

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de diseño centrado en el usuario, desde la fase etnográfica hasta la selección del concepto de arquitectura.



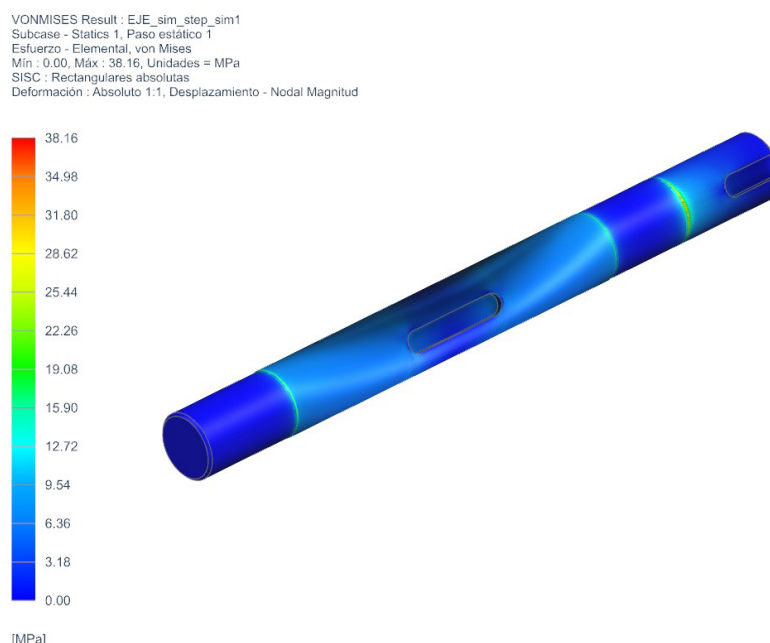
Fuente: elaborado por los autores

Validación numérica y optimización del diseño: de lo conceptual a lo predictivo

Para mitigar los riesgos de diseño y optimizar el rendimiento antes de la fabricación, se realizó la validación numérica multifísica. Este enfoque de “prototipado virtual” es una práctica estándar en la ingeniería moderna que permite evaluar y refinar el diseño de manera eficiente, reduciendo costos y tiempos de desarrollo (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024).

- *Análisis Estructural y Dinámico por Elementos Finitos (FEA)*: se proyectó y construyó el modelo CAD 3D del ensamblaje completo (Solid Edge), el mismo que fue sometido al análisis FEA (Simcenter3D, SAP2000) para evaluar la integridad estructural. Se determinó las condiciones de cargas estáticas (peso propio y del material) y dinámicas inducidas por la inercia del mecanismo oscilante. El análisis de esfuerzos de von Mises confirmó que en todos los componentes críticos las tensiones se mantenían por debajo del límite de fluencia del material (acero estructural ASTM A36), con un factor de seguridad mínimo de 8.77 en el eje principal del sistema. Este análisis es fundamental en el diseño de maquinaria rotativa para prevenir fallas por fatiga y asegurar la durabilidad (Kurnia et al., 2020).

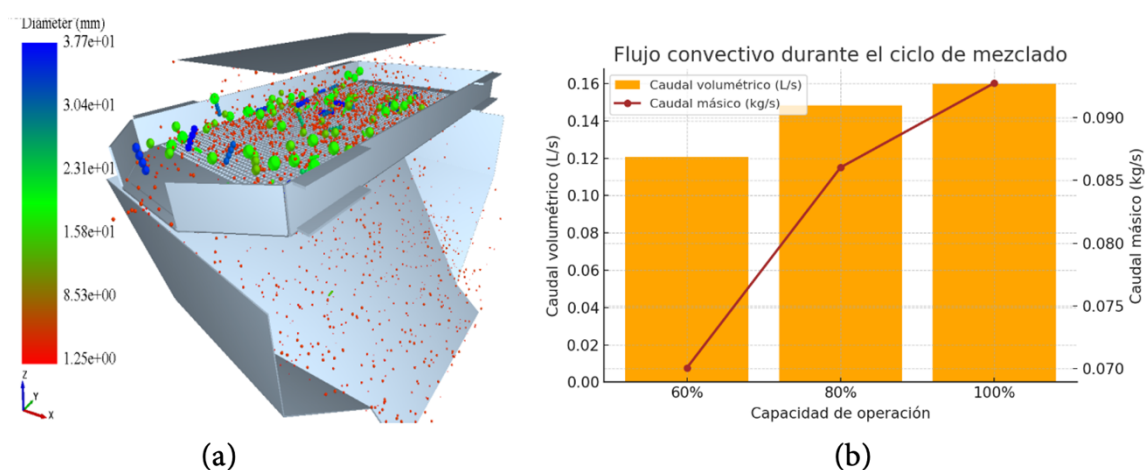
Figura 4. Resultados del análisis FEA. Distribución de esfuerzos de von Mises en la estructura principal bajo carga dinámica, con un factor de seguridad de 8.77 para en el eje.



Fuente: elaborado por los autores

- *Análisis de Flujo de Partículas por el Método de Elementos Discretos (DEM)*: la predicción del comportamiento de medios granulares, como el sustrato, es un problema complejo. Se utilizó el software Altair EDEM para modelar la dinámica de las partículas dentro de la máquina. Esta simulación fue crucial para: (a) verificar la eficiencia de separación de la zaranda, validando que el movimiento y la geometría eran adecuados para una estratificación efectiva y para evitar la colmatación de la malla; y (b) visualizar la cinética de la mezcla, confirmando que la configuración de las cintas helicoidales lograba un índice de homogeneidad superior al 95% en menos de 5 minutos.

Figura 5. Simulación DEM del proceso. (a) Segregación de partículas en la zaranda oscilante. (b) Patrón de flujo convectivo durante el ciclo de mezclado.

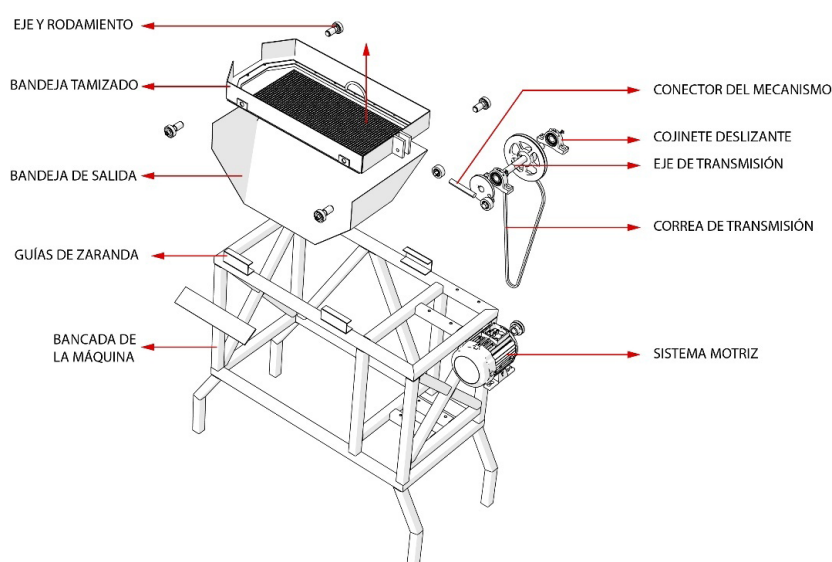


Fuente: elaborado por los autores

Especificaciones técnicas y construcción

El prototipo fue fabricado en **acero estructural ASTM A36**, con un tratamiento superficial de pintura anticorrosiva. El sistema de cernido es accionado por un motor eléctrico trifásico de 1 HP y el de mezclado por un motorreductor de 3 HP. El componente mecatrónico clave es el sistema de control, centralizado en un tablero que integra variadores de frecuencia (VFDs). Estos dispositivos son fundamentales, ya que no solo permiten un arranque suave que reduce el estrés mecánico en la transmisión, sino que también posibilitan la operación con una alimentación eléctrica bifásica de 220V, una adaptación crucial para el contexto rural. Además, garantizan la seguridad mediante paradas de emergencia y sensores de posición, asegurando la protección del operario en todo momento (Díaz Báez & Vásquez Arequipa, 2024).

Figura 6. Despiece del prototipo del sistema mecatrónico implementado en el Vivero Tunducama, con sus componentes principales señalizados.



Fuente: elaborado por los autores

Protocolo experimental y métricas de evaluación

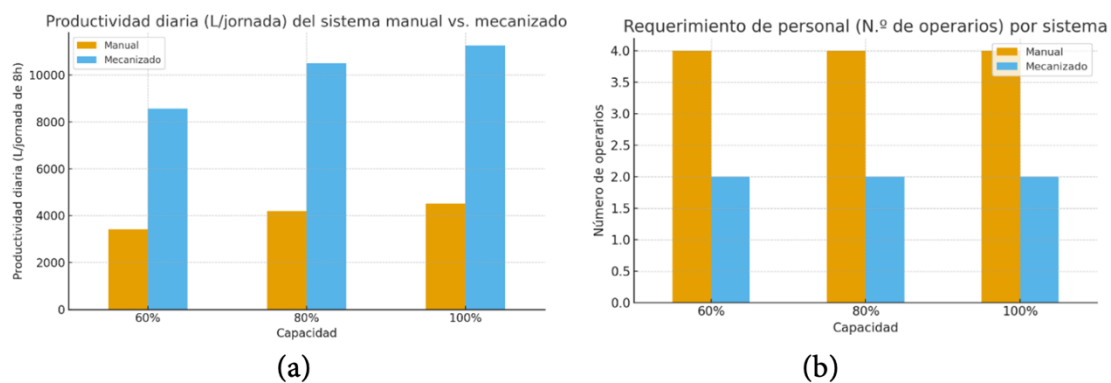
Para cuantificar, de manera objetiva, el impacto de la intervención tecnológica, se implementó un diseño experimental comparativo in situ. Este enfoque permitió evaluar el rendimiento del sistema mecatronizado (“tratamiento”) en contraste directo con el paradigma de producción manual preexistente (“control”), bajo las condiciones operativas y ambientales reales del Vivero Tunducama. La evaluación se estructuró en torno a dos ejes principales: la eficiencia del proceso productivo y la calidad agronómica del sustrato resultante.

Evaluación de la productividad y eficiencia de recursos

La optimización de recursos es un objetivo central en el diseño de maquinaria agrícola, donde la eficiencia se traduce no solo en beneficios económicos, sino también en una reducción de la carga de trabajo humano (García Acosta et al., 2011). Para evaluar esta dimensión, se definieron las siguientes métricas:

- *Productividad del proceso:* se cuantificó la capacidad de producción midiendo el volumen de sustrato (L) procesado por jornada laboral de ocho horas. Para el grupo de tratamiento, se realizaron pruebas cronometradas de ciclos completos (llenado, cernido y mezcla) operando la máquina a capacidades del 60%, 80% y 100% de su volumen nominal (150 L). Los tiempos promedio por ciclo, particularmente en la operación óptima al 80%, se extrapolaron para determinar el rendimiento diario máximo sostenible. Estos valores se contrastaron con la producción basal del método manual, registrada en 3999,7 L/jornada.
- *Eficiencia de recursos humanos:* más allá de la velocidad, un indicador clave del impacto de la mecanización es la optimización del capital humano. Se registró el número de operarios requeridos para sostener la producción en cada sistema. El método de control requería un equipo de seis personas, mientras que la operación del sistema mecatronizado fue gestionada eficientemente por solo dos operarios.
- *Consumo energético:* se realizó un análisis del consumo eléctrico del prototipo mediante un analizador de redes. Se registraron los datos de potencia (kW) durante la operación en estado estacionario a capacidades del 80% y 100%, permitiendo calcular el consumo energético por jornada (kWh) y estimar el costo operativo diario en dólares (\$/día).

Figura 7. Análisis comparativo de la eficiencia productiva. (a) Productividad diaria (L/jornada) del sistema manual vs. mecanizado. (b) Requerimiento de personal (N.º de operarios) para cada sistema.



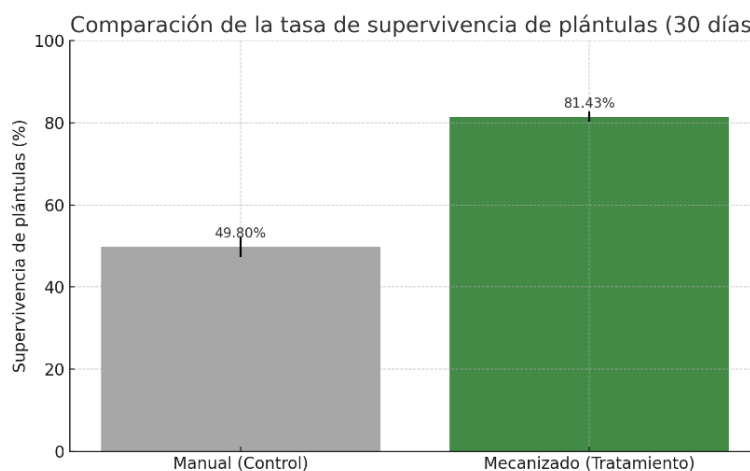
Fuente: elaborado por los autores

Evaluación de la calidad del sustrato y su impacto agronómico

La calidad del sustrato es el predictor más fiable del éxito en la propagación de plántulas (Sharma & Krishna, 2017). Un medio de cultivo con propiedades fisicoquímicas homogéneas asegura un acceso uniforme a agua, aire y nutrientes, lo cual es fundamental para el desarrollo radicular (Choi et al., 2012). Para validar la mejora en la calidad del sustrato, se empleó una metodología dual:

- *Análisis fisicoquímico*: se recolectaron muestras compuestas y representativas de los lotes de sustrato producidos por ambos métodos (manual y mecanizado). Estas muestras se destinaron a un análisis de laboratorio para caracterizar parámetros clave como la distribución granulométrica (mediante tamizado estandarizado), la densidad aparente, la porosidad y la homogeneidad en la distribución de nutrientes (N-P-K). Este análisis permite una caracterización objetiva de las propiedades físicas y químicas que influyen en el microambiente de la rizósfera.
- *Bioensayo de viabilidad de plántulas*: para obtener un indicador integrado y holístico de la calidad agronómica del sustrato, se diseñó un bioensayo a gran escala. Este método refleja el rendimiento real de las plantas, encapsulando la compleja interacción de todas las propiedades del sustrato. Un total de 3700 plántulas ornamentales y forestales nativas fueron trasplantadas a contenedores con sustrato del tratamiento mecanizado, y 1500 plántulas a contenedores con sustrato del grupo de control manual. La principal métrica de evaluación fue la tasa de supervivencia (%), cuantificada rigurosamente tras un período de aclimatación de 30 días bajo condiciones estandarizadas de riego y exposición lumínica en el vivero. La reducción en la mortalidad se consideró una evidencia directa y agronómicamente significativa de la mejora en la calidad del sustrato.

Figura 8. Comparación de la tasa de supervivencia de plántulas. Gráfico de barras mostrando el porcentaje de supervivencia en el sustrato de control (manual) vs. el sustrato de tratamiento (mecanizado) tras 30 días.



Fuente: elaborado por los autores

Análisis estadístico

Para discernir si las diferencias observadas entre el sistema mecanizado y el método manual eran atribuibles a la intervención tecnológica o meramente al azar, se implementó un marco de análisis estadístico inferencial. Este procedimiento es esencial para traducir los datos brutos del experimento en conclusiones científicamente válidas y robustas. Todo el procesamiento de datos se llevó a cabo utilizando el software estadístico SPSS (versión 25.0).

El núcleo de la validación se centró en contrastar dos hipótesis de investigación principales, una para cada eje de impacto evaluado:

1. Hipótesis de productividad:

- Hipótesis nula (H_0): la productividad media diaria (L/jornada) del sistema mecanizado no es superior a la del sistema manual.
- Hipótesis alternativa (H_1): la productividad media diaria del sistema mecanizado es estadísticamente superior a la del sistema manual.

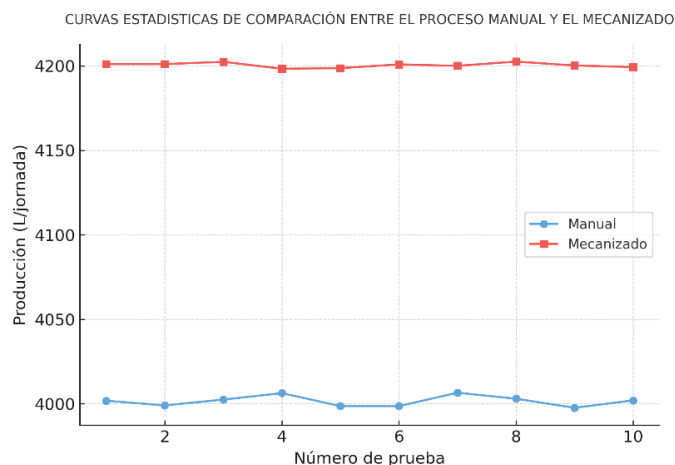
2. Hipótesis de calidad agronómica (Viabilidad):

- Hipótesis nula (H_0): la tasa media de supervivencia de las plántulas (%) en el sustrato mecanizado no es superior a la obtenida con el sustrato manual.
- Hipótesis alternativa (H_1): la tasa media de supervivencia de las plántulas en el sustrato mecanizado es estadísticamente superior a la del sustrato manual.

Para el contraste de estas hipótesis, se seleccionó la prueba t de Student para muestras independientes. Este test paramétrico es el método canónico y más apropiado para comparar las medias de dos grupos de tratamiento independientes (control vs. tratamiento) cuando la variable dependiente es de naturaleza continua, como es el caso de la productividad y la tasa de supervivencia (Hurtado & Silvente, 2012). Previo a la aplicación de la prueba t, se verificaron los supuestos de normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas a través de la prueba de Levene, asegurando la idoneidad del método estadístico.

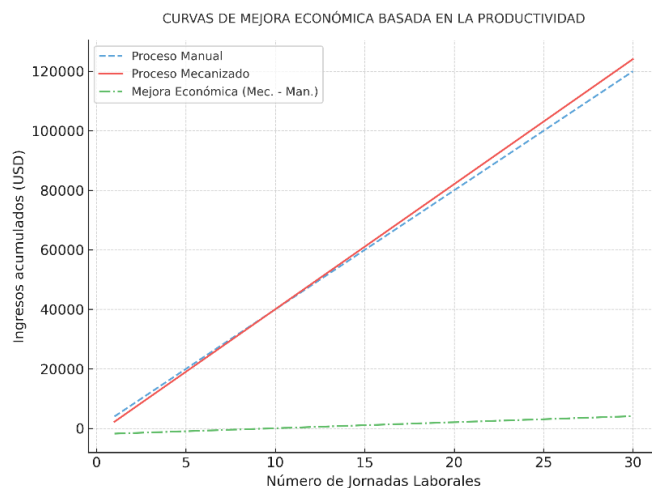
Se estableció un nivel de significancia (α) de 0.05 para todas las pruebas. Este umbral, estándar en las ciencias aplicadas, implica que solo se considerarían significativos aquellos resultados con una probabilidad menor al 5% de haber ocurrido por azar. Los resultados descriptivos en el manuscrito se presentan como la media $\pm$ la desviación estándar ($M \pm DE$), para proporcionar una medida tanto de la tendencia central como de la dispersión de los datos en cada grupo.

Figura 9. Curvas estadísticas que comparan la eficiencia conceptual entre el proceso manual y el mecanizado



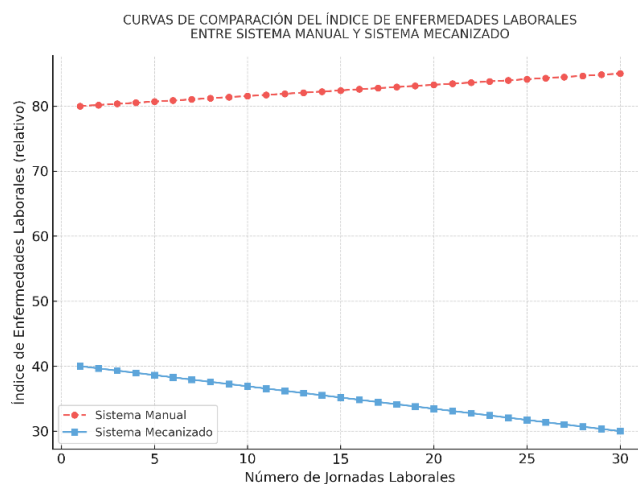
Fuente: elaborado por los autores

Figura 10. Mejora económica en favor de la prefectura de Cotopaxi Ecuador, en base a la implementación de una solución mecatrónica en el proceso de cernido de materia para sustrato



Fuente: elaborado por los autores

Figura 11. Gráfico de reducción de índice de enfermedades laborales relacionando el sistema de cernido manual y mecatrónico



Fuente: elaborado por los autores

Conclusiones

La integración sinérgica de los subsistemas de cernido oscilante y mezclado helicoidal en una única plataforma mecatrónica ha demostrado ser una solución de alta eficacia. El diseño validó que la unificación de procesos en un flujo continuo es superior a la operación de equipos independientes para la optimización del acondicionamiento de sustratos en viveros de mediana escala.

El sistema mecanizado induce un incremento disruptivo en la capacidad productiva del vivero. Operando al 80% de su capacidad nominal, se cuantificó un aumento del 5,00% en el volumen de sustrato procesado por jornada laboral en comparación con el método manual, transformando un cuello de botella sistémico en un proceso eficiente y escalable.

Existe una correlación directa y estadísticamente significativa entre el acondicionamiento mecanizado del sustrato y la mejora de su calidad agronómica. La homogeneidad y granulometría controladas del producto final se tradujeron en un aumento del 31,63% en la tasa de supervivencia de las plántulas, lo que confirma que la estandarización del proceso mecánico tiene un impacto tangible y positivo en la viabilidad del material vegetal.

La semiautomatización del proceso mitiga de manera fundamental los factores de riesgo ergonómico. La reducción del personal directamente expuesto a tareas de alta exigencia biomecánica de seis a dos operarios representa una disminución cuantitativa del riesgo de trastornos musculoesqueléticos (TME) y contribuye a un entorno laboral más seguro y sostenible.

La aplicación de una metodología de Diseño Centrado en el Usuario (DCU) fue un factor determinante para el éxito del proyecto. La traducción de las necesidades priorizadas por los operarios (mantenibilidad, seguridad, robustez) en especificaciones de diseño concretas aseguró la pertinencia y aceptabilidad de la solución tecnológica en su contexto de uso real.

La validación numérica mediante Análisis por Elementos Finitos (FEA) y el Método de Elementos Discretos (DEM) se ha confirmado como una estrategia predictiva indispensable. El FEA garantizó un factor de seguridad estructural mínimo de 8.77 en los componentes críticos, mientras que el DEM predijo un índice de homogeneidad de la mezcla superior al 95%, optimizando el diseño y reduciendo los riesgos antes de la construcción.

La implementación del sistema mecatrónico resulta en una drástica optimización de los recursos.

La reducción de la fuerza laboral en un 66.7% (de 6 a 2 operarios) para una productividad superior, junto a un costo energético operativo diario estimado en solo \$1.34, demuestra una alta eficiencia económica y permite la reasignación de capital humano a labores de mayor valor agregado.

Referencias

- Choi, J. M., Lee, C. W., & Chun, J. (2012). Optimization of Substrate Formulation and Mineral Nutrition during the Production of Vegetable Seedling Grafts. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 53(3), 212–221. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0108-1>
- Culley, S. J., Duffy, A., McMahon, C., & Wallace, K. (2001). *Engineering design methods*. Wiley.
- Díaz Báez, H. S., & Vásquez Arequipa, O. L. (2024). *Diseño, construcción e implementación de una máquina semiautomática para el saneado de tierra mediante el uso de un sistema de cernido y mezcla con fertilizantes para la optimización de recursos en el vivero de Tunducama Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi* [Tesis de pregrado].
- Dumroese, R. K., Luna, T., & Landis, T. D. (Eds.). (2009). *Nursery Manual for Native Plants: A Guide for Tribal Nurseries*. USDA Forest Service.
- Erdman, A. G., & Sandor, G. N. (1991). *Mechanism design: analysis and synthesis*. Prentice-Hall.
- García Acosta, G., Lange Morales, K., Puentes Lagos, D. E., & Ruiz Ortiz, M. R. (2011). Addressing Human Factors and Ergonomics in Design Process, Product Life Cycle, and Innovation: Trends in Consumer Product Design. In N. Stanton, (ed.). *Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design* (pp. 133-154). Taylor & Francis Group.
- Gómez-Macpherson, H., Gómez, J. A., Orgaz, F., Villalobos, F. J., & Fereres, E. (2016). Soil Conservation. In F. J. Villalobos & E. Fereres, (eds.). *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (pp. 241-254). Springer International Publishing.
- Jackson, B. E., & Wright, R. D. (2009). Pine Tree Substrate: an Alternative and Renewable Substrate for Horticultural Crop Production. *Acta Horticulturae*, 819, 265–272.
- Kurnia, G., Yulianto, B., Jamari, J., Bayuseno, A. P., & Tauviquirrahman, M. (2020). Contact mechanism between shaft, key, and crank in the sand sieving machine. *AIP Conference Proceedings*, 2262. <https://doi.org/10.1063/5.0015775>
- Sharma, R. R., & Krishna, H. (2017). *Textbook of Plant Propagation and Nursery Management*. CBS Publishers & Distributors Pvt. Ltd.
- Shen, H., Li, J., Deng, J., Liu, Y., Ding, L., Zhang, J., Zhang, H., & Yang, T. (2009). *A Novel Vibration Sieve Based on the Parallel Mechanism*. 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Wenzhou, China.
- Tüchsen, F., & Astrup Jensen, A. (2000). Agricultural work and the risk of Parkinson's disease in Denmark, 1981-1993. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 26(4), 359–362.
- Uicker, J. J., Jr., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2011). *Theory of Machines and Mechanisms*. Oxford University Press.
- Wilkinson, K. M., & Landis, T. D. (Eds.). (2014). *Tropical Nursery Manual: A guide to starting and operating a nursery for native and traditional plants* (Agriculture Handbook 732). U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Autores

Félix Javier Manjares Arias. Es docente e investigador del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especializado en el área de Diseño y Mecánica Computacional. Su formación académica inició con el título de Tecnólogo en Mecánica de Aviación mención Motores del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico de la Fuerza Aérea, seguido por los títulos de Ingeniero Automotriz por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE e Ingeniero Industrial por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Posteriormente, obtuvo los posgrados de Magíster en Gestión de Empresas mención PYMES en la ESPE y Magíster en Ciencias en Diseño, Producción y Automatización Industrial por la Escuela Politécnica Nacional. Su trayectoria profesional incluye la participación en proyectos de investigación y vinculación, manteniendo colaboración interinstitucional con la Universidad Técnica de Cotopaxi, la Escuela Politécnica Nacional y la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Adicional a su rol en la ESPE, es catedrático en el programa de Maestría de Diseño Mecánico, con mención en Estructuras y Recipientes a Presión, de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Escuela Politécnica Nacional. Su producción científica está documentada en artículos académicos disponibles para consulta en su perfil de Google Scholar.

Ernesto Ramiro Santillán Mariño. Es docente e investigador del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especializado en el área de Diseño y Mecánica Computacional, Producción y Automatización Industrial. Su formación académica inició con el título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Posteriormente, obtuvo los posgrados de Magíster en Dirección de Empresas Mención Proyectos en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y Magíster en Ciencias en Diseño, Producción y Automatización Industrial por la Escuela Politécnica Nacional. Su trayectoria profesional incluye la participación en proyectos de investigación y vinculación. Adicional a su rol dentro de la ESPE, fue catedrático en el programa de Maestría de Diseño Mecánico Mención Autopartes en la Universidad Internacional SEK. Su producción científica está documentada en artículos académicos disponibles para consulta en su perfil de Google Scholar.

Jorge Eduardo Meythaler Naranjo. Es docente e investigador del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especializado en el área de Energía y Termodinámicos. Su formación académica inició con el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Posteriormente, obtuvo los posgrados de Diplomado Superior en Autotrónica por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Diplomado Superior en Gestión del Aprendizaje Universitario por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y de Magíster en Gestión de Energía por la Universidad Técnica de Cotopaxi. Su trayectoria profesional incluye la participación en proyectos de investigación y vinculación, manteniendo colaboración interinstitucional con la Universidad Técnica de Cotopaxi, y la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Adicional a su rol en la ESPE, está acreditado en el programa Formador de Formadores del Senescyt. Su producción científica está documentada en artículos académicos disponibles para consulta en su perfil de Google Scholar.

Hernán Vinicio Morales Villegas. Es docente e investigador del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especializado en el área de Energía y Termodinámicos. Su formación académica inició con el título de Ingeniero Mecánico por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Posteriormente, obtuvo los posgrados de Magíster en Gestión Superior del Aprendizaje Universitario en la ESPE y Magíster en Diseño y Formulación de Proyectos en la Universidad Nacional de Chimborazo. Luego obtuvo un Magíster en Gestión de las Energías por la Universidad Técnica de Cotopaxi. Ha participado como funcionario, capacitador y colaborador en proyectos de productivos, de vinculación y otras funciones, con la Universidad Técnica de Cotopaxi, empresas particulares y estatales. Posee producción científica disponible en Google Scholar, Scopus y otras páginas electrónicas.

Harold Saúl Díaz Báez. Es Ingeniero Mecatrónico graduado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador). Cuenta con experiencia profesional en el sector de hidrocarburos, con especialización en aseguramiento y control de calidad mecánica en funciones de supervisión. Está acreditado como Inspector Nivel II por la ASNT TC-1A en ensayos no destructivos (VT y PT). Sus intereses académicos y profesionales abarcan la inspección y evaluación de integridad estructural, la implementación de sistemas de aseguramiento de calidad y la optimización de procesos industriales, con un marcado énfasis en la aplicación de normas internacionales como ASME y AWS.

Declaración

Conflicto de interés

No tenemos ningún conflicto de interés que declarar.

Financiamiento

Sin ayuda financiera de partes externas a este artículo.

Nota

El artículo es original y no ha sido publicado previamente.