



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**PARAMETRIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS
AUTOMÁTICOS DE TRASPLANTE DE PLÁNTULAS DE
JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)**

TESIS DE GRADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

GAUDENCIO GRANDE MARTÍNEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

MARTÍN HIDALGO REYES, DR.



APROBADA



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, OCTUBRE DE 2026



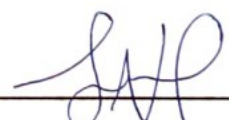
**PARAMETRIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS
AUTOMÁTICOS DE TRASPLANTE DE PLÁNTULAS DE
JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)**

Tesis realizada por **GAUDENCIO GRANDE MARTÍNEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
DR. MARTÍN HIDALGO REYES

ASESOR: 
DR. PEDRO CRUZ MEZA

ASESOR: 
DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

LECTOR EXTERNO: 
DR. FRANCISCO GARIBALDI MÁRQUEZ

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ACRÓNIMOS	xviii
DEDICATORIAS	xxi
AGRADECIMIENTOS	xxii
DATOS BIOGRÁFICOS	xxiv
RESUMEN GENERAL	xxv
GENERAL ABSTRACT	xxvi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Estructura de la tesis	4
1.5 Referencias	7
2. REVISIÓN DE LITERATURA	12
1.6 Generalidades e importancia del jitomate	12
1.7 Sistemas de producción de jitomate	13
1.8 Trasplante de plántulas	14
1.9 Sistemas de un trasplantador automático	16
2.4.1 Extracción de plántulas	17
2.4.2 Transporte y manipulación de plántulas	20
2.4.3 Trasplante de plántulas	21

2.5	Parámetros de diseño para trasplantadoras automáticas	21
2.5.1	Consideraciones socioeconómicas.....	22
2.5.2	Consideraciones técnicas	23
2.5.3	Consideraciones agronómicas.....	23
2.6	Propiedades físico-mecánicas de las plántulas	24
2.7	Importancia de las trasplantadoras automáticas en México	30
2.8	Referencias.....	32
3.	EVOLUTION AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF AUTOMATIC TRANSPLANTERS FOR VEGETABLES: A REVIEW	42
	ABSTRACT.....	43
	RESUMEN.....	43
	INTRODUCTION	43
	MATERIALS AND METHODS	45
	Search method.....	45
	Bibliometric analysis.....	45
	Detailed review.....	46
	RESULTS AND DISCUSSION.....	46
	Evolution of automated transplanting equipment.....	46
	Scientific production on automated transplanters.....	48
	Morphological and mechanical characteristics of seedlings	50
	Systems, features, and performance of transplanters	52
	Manufacturing and operating costs	55
	Functional systems in automated transplanters	56
	Current situation on prototype development in Mexico.....	57
	Areas of opportunity for future research	57

CONCLUSIONS.....	58
ACKNOWLEDGEMENTS	59
REFERENCES	59
4. PHYSICAL–MECHANICAL PROPERTIES OF TOMATO SEEDLINGS FOR THE DESIGN AND OPTIMIZATION OF AUTOMATIC TRANSPLANTERS	64
1. Introduction	66
2. Materials and Methods.....	67
2.1. Location and Experimental Material	67
2.2. Determination of Physical Characteristics	67
2.2.1. Number of Leaves, Total Height, and Canopy	67
2.2.2. Root Ball and Stem Dimensions	68
2.2.3. Weight and Moisture Content	68
2.2.4. Center of Mass and Oscillation Period.....	69
2.3. Mechanical Test	70
2.3.1. Adhesion Force.....	70
2.3.2. Root Ball Punching Force	70
2.3.3. Static Friction Coefficient	70
2.3.4. Drop Test.....	71
2.4. Statistical Analysis.....	71
3. Results	71
3.1. Physical Characteristics	71
3.1.1. Number of Leaves, Total Height, and Canopy	71
3.1.2. Stem and Root Ball Dimensions	72
3.1.3. Mass and Moisture Content	73
3.1.4. Center of Mass and Oscillation Period.....	73

3.2. Mechanical Tests	76
3.2.1. Adhesion Force.....	76
3.2.2. Root Ball Punching Force	77
3.2.3. Static Friction Coefficient	78
3.2.4. Drop Test	78
4. Discussion.....	79
4.1. Physical Characteristics	79
4.1.1. Number of Leaves, Total Height and Canopy	79
4.1.2. Stem and Root Ball Dimensions	79
4.1.3. Weight and Moisture Content	80
4.1.4. Center of Mass and Oscillation Period.....	80
4.2. Mechanical Tests	80
4.2.1. Adhesion Force.....	80
4.2.2. Root Ball Punching Force	81
4.2.3. Static Friction Coefficient	82
4.2.4. Drop Test	82
5. Conclusions	83
Abbreviations	84
References.....	85
5. COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE TALLOS DE PLÁNTULAS DE JITOMATE PARA EL DISEÑO DE MECANISMOS DE SUJECCIÓN DE TRASPLANTE AUTOMÁTICO.....	88
Resumen.....	89
1. Introducción.....	90
2. Materiales y métodos	91
2.1. Ubicación y material de experimentación.....	92

2.2.	Propiedades físicas.....	93
2.3.	Fuerza de compresión radial del tallo	95
2.4.	Análisis estadístico.....	96
3.	Resultados	97
3.1.	Propiedades físicas del tallo	97
3.2.	Análisis de covarianza multivariado factorial y univariado	98
3.3.	Fuerza de compresión radial y estrés bajo compresión	101
4.1.	Propiedades físicas del tallo	104
4.2.	Análisis de covarianza multivariado factorial y univariado	105
4.3.	Fuerza de compresión y estrés bajo compresión.....	106
5.	Conclusiones.....	107
	Agradecimientos.....	108
	Referencias	108
6.	DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PLÁNTULAS DE JITOMATE DE CHAROLAS GERMINADORAS PARA TRASPLANTADORAS AUTOMÁTICAS.....	113
	Resumen.....	114
	Abstract	115
	Introducción.....	116
	Materiales y métodos	120
	Localización del experimento.....	121
	Consideraciones agronómicas y caracterización bio-mecánica de las plántulas	121
	Diseño conceptual del dispositivo extractor	122
	Diseño de detalle	123
	Resultados y discusión.....	128

Caracterización físico-mecánica de las plántulas	128
Diseño conceptual	129
Diseño de detalle	133
Conclusiones.....	140
Agradecimientos	140
Referencias.....	141
7. AUTOMATIZACIÓN DEL TRASPLANTE DE HORTALIZAS EN MÉXICO: INNOVACIÓN SOSTENIBLE O RIESGO DE DESPLAZAMIENTO LABORAL RURAL.....	147
Resumen.....	148
Abstract	148
Introducción.....	149
1. Panorama actual de la automatización agrícola en México	150
2. El trasplante automatizado de hortalizas: innovación tecnológica emergente	153
3. Impacto ambiental y contribución a la sustentabilidad	155
4. Implicaciones sociales y laborales: ¿desplazamiento o transformación del trabajo rural?	156
5. Viabilidad económica para pequeños y medianos productores	158
Prospectiva.....	159
Conclusiones.....	160
Agradecimientos.....	161
Referencias	161
8. CONCLUSIONES GENERALES	168
9. ANEXOS: Congresos internacionales y Simposios	171

CINCA 2025.....	171
CICA 2025	172
II Simposio 2025	173
Agrociencias 2026	175

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2

Cuadro 1. Propiedades físico-mecánicas de las plántulas en diferentes tipos de hortalizas de investigaciones realizadas.....	25
--	----

CAPÍTULO 3

Table 1. General information of the analyzed articles	46
Table 2. Most cited articles globally	50
Table 3. Characteristics of the studied seedlings and root ball	51
Table 4. Physical and mechanical properties studied in seedlings	51
Table 5. Transplanter components	53
Table 6. Properties of transplanters	54
Table 7. Technical parameters of transplanters	55

CAPÍTULO 4

Table 1. General seedling dimensions.....	72
Table 2. Dimensions of the seedling root ball (RB) and stem.	72
Table 3. Total weight (w_t) and moisture content (MC) of seedlings.	73
Table 4. Location of the center of mass (CM) and oscillation period (T) of seedlings.....	74
Table 5. Summary of the ANOVA and VIF for the best model obtained.	75

CAPÍTULO 5

Tabla 1. Evaluación de la colinealidad de los predictores mediante el Generalized Variance Inflation Factor (GVIF).	99
Tabla 2. Resumen del MANCOVA global de dos vías (Pillai's trace) para las variables de respuesta (RCF1, $\Delta D1$, RCF2 y $\Delta D2$) en función de los factores (híbrido y LV) y las covariables físicas del tallo.....	99
Tabla 3. Resumen del MANCOVA de dos vías (Pillai's trace) para la fase inicial de RCF (RCF1 y $\Delta D1$).	100
Tabla 4. Resumen del MANCOVA de dos vías (Pillai's trace) para la fase dos de RCF (RCF2 y $\Delta D2$).	100
Tabla 5. Resultados de los ANCOVAs univariados para las variables de respuesta RCF1, $\Delta D1$, RCF2 y $\Delta D2$ en función de factores y covariables.....	100

CAPÍTULO 6

Cuadro 1. Características físico-mecánicas de los tallos de plántulas de jitomate tomadas en cuenta para el diseño del dispositivo extractor.....	129
Cuadro 2. Especificaciones para el mecanismo de recolección de las plántulas de jitomate de charolas germinadoras.	131
Cuadro 3. Diagrama morfológico para el dispositivo de extracción de plántulas de jitomate.	132

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Estados de México líderes en volumen de producción de jitomate por toneladas durante el año 2024.....	13
Figura 2. Rendimientos de las principales variantes comerciales cultivadas en México durante el año 2023, según el tipo de tecnología utilizada.	14
Figura 3. Arreglo topológico para el trasplante del jitomate a una sola hilera: a) vista frontal, b) corte longitudinal. Las dimensiones están en milímetros.	15
Figura 4. Arreglo topológico para el trasplante del jitomate a dos hileras: a) vista frontal, b) corte longitudinal y c) Profundidad a la que se depositarás las plántulas. Las dimensiones están en milímetros.....	16
Figura 5. Tipos de trasplante según el nivel de automatización.	17
Figura 6. Consideraciones socioeconómicas para el desarrollo de un equipo de trasplante automático.....	22
Figura 7. Consideraciones técnicas necesarias al desarrollar un prototipo de trasplante automático.....	23
Figura 8. Consideraciones agronómicas sobresalientes para el desarrollo de trasplantadoras automáticas.....	24
Figura 9. Diagrama esquemático de dimensiones morfológicas de una plántula de jitomate.	29
Figura 10. Propiedades mecánicas para diseño de máquinas trasplantadoras.	30

CAPÍTULO 3

Fig. 1– Flowchart for data search and analysis.....	45
Fig. 2 – Origin and evolution of articles published between 1979 and 2023	47
Fig. 3 – Co-occurrence network of authors' keywords	48

Fig. 4 – Current trends in automated transplanting-related topics	48
Fig. 5 – Authors' scientific production over time	49
Fig. 6 – Leading countries in scientific production.....	49
Fig. 7 – Physical and mechanical properties of seedlings included in the design and evaluation of an automated transplanter	52
Fig. 8 – Sub-functions of a machine for automated vegetable transplanting.....	53

CAPÍTULO 4

Figure 1. Flowchart for determining physical and mechanical properties of tomato seedlings.....	67
Figure 2. Physical dimensions of tomato seedling.	68
Figure 3. Device for determining (a) the center of mass (CM) of the seedling; (b) distance d_p and oscillation of the seedlings.....	69
Figure 4. (a) AF test of seedlings attached by their stems to the germination tray, (b) RBPF.....	70
Figure 5. (a) Device for testing the SFC of seedlings, (b) diagram of the DT at two heights.	71
Figure 6. Selection of the best model using the criteria: (a) Bayesian Information Criterion (BIC) and (b) adjusted coefficient of determination (R_a^2). The optimal model was identified based on the lowest BIC and the highest R_a^2 on the Y-axis. These metrics indicate the most suitable model among those incorporating different combinations of variables (X1 to X11), as highlighted in the shaded area.	75
Figure 7. Model diagnostics for seedlings CM: (a) residuals vs. predicted values and (b) actual values vs. predicted values.	76
Figure 8. AF of tomato seedlings in cavities of germination trays. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences (p -value $< 2 \times 10^{-16}$) among hybrids according to Tukey's test.....	76

Figure 9. Damage observed in seedlings subjected to the AF test: (a) RB breakage in an H1 seedling, (b) RB damage in an H2 seedling, and (c) residual substrate in the cavity due to an incomplete root system in an H3 seedling.	77
Figure 10. Average final loads from the RBPF test on seedlings. Different lowercase letters (a, b, and c) indicate statistically significant differences between hybrids (p -value $< 6.66 \times 10^{-10}$) according to Tukey's test.	77
Figure 11. Mean comparison of SFC values using Tukey's test: (a) by hybrid on each material and (b) by material for each hybrid. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences.	78
Figure 12. Residual substrate amount left on the galvanized steel sheet (GSS) during the DT. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences among the F1 hybrids studied.	78

CAPÍTULO 5

Fig. 1. Diagrama de flujo de análisis estadístico del diseño experimental.	92
Fig. 2. Dimensiones físicas del tallo de la plántula de jitomate consideradas para la determinación de su fuerza de compresión.	94
Fig. 3. Algunos grupos de tallos de las plántulas de jitomate estudiadas: a) muestras de CIH-LV2 y b) muestras GAH-LV2.	95
Fig. 4. Esquema de la determinación de RCF del tallo de la plántula de jitomate en el analizador de textura.	96
Fig. 5. Metodología para la preparación de los datos de las variables de respuesta.	97
Fig. 6. Análisis exploratorio sobre las propiedades físicas de los tallos estudiados: a) Peso (SW), b) diámetro (d_s), c) altura (h_s) y d) contenido de humedad (SMC). Los símbolos ● para CIH y ▲ para GAH con valores en diferentes colores indican la media de las propiedades físicas.	98
Fig. 7. Distribución de las RCF por cada variedad para las dos fases analizadas a diferentes LV: a) CIH y b) GAH. LV1-LV5 son las LV a las que se sometieron los tallos.	102

Fig. 8. Medias ajustadas $\pm$ error estándar obtenidas a partir de los modelos ANCOVA univariados para las variables de respuesta en función de factores y covariables: a) resultados exploratorios de RCF1, b) resultados exploratorios de $\Delta D1$, c) comparación de medias ajustadas de RCF2 (contraste T de Student), y d) comparación de medias ajustadas de $\Delta D2$ (contraste T de Student).	102
Fig. 9. Curvas de RCF promedio-desplazamiento con su desviación estándar para los tallos de las 100 muestras estudiadas por variedad. Las áreas sombreadas en gris y verde claro indican la desviación estándar correspondientes a los híbridos indicados.	103
Fig. 10. Diagramas de esfuerzo-deformación de unas pruebas de RCF: a) muestra 20 de CIH-LV4 y b) muestra 08 de GAH-LV4.	104
Fig. 11. Microestructura de un tallo de muestra GAH obtenido mediante un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6390 y controlado por el software Scanning Electron Microcospe: a) corte transversal del tallo y b) corte longitudinal del tallo.....	104

CAPÍTULO 6

Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.	120
Figura 2. Diagrama de los materiales experimentales: a) dimensiones generales de la charola germinadora, b) propiedades físicas de las plántulas de jitomate. d_s -diámetro del tallo de la plántula, h_s -altura del tallo llamada hipocótilo que se encuentra entre el cepellón y las hojas cotiledóneas, d_{se} -altura a la que se midió el d_s , b_{ma} -base mayor del cepellón, b_{mi} -base menos del cepellón.	122
Figura 3. Proceso del diseño adaptado al problema planteado: metodología del diseño conceptual.	123
Figura 4. Análisis del proceso de sujeción de las plántulas: a) Diagrama de una plántula desplazada del centro de la cavidad, b) Diagrama de la plántula desplazada del centro de la cavidad sujeta por los dedos del efector final.	124
Figura 5. Diagrama general del efector diseñado.	127

Figura 6. Anatomía de las partes de los dedos involucrados en la extracción de las plántulas a través de los tallos. (1) pulpejo del índice, (2) pulpejo del pulgar, (3) zona de la falange (hueso) del índice y (4) zona de la falange (hueso) del pulgar.....	128
Figura 7. Árbol de objetivos del prototipo diseñado.	130
Figura 8. Establecimiento de funciones: a) caja negra y b) análisis de las funciones del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.	130
Figura 9. Vista isométrica del dispositivo extractor sin plántulas. (1) efector final, (2) actuador lineal eléctrico para la sujeción de la charola germinadora, (3) motor paso a paso Nema 24 para el desplazamiento en el eje X, (4) estructura del dispositivo, (5) Plataforma para la colocación de la charola germinadora, (6) charola germinadora, (7) brazo para el sistema de efectores finales, (8) motor paso a paso Nema 23 para el desplazamiento en el eje Y, (9) chumacera para la barra guía, (10) nivelador de dispositivo extractor, (11) guía de brazo, (12) husillo para el desplazamiento del sistema de efectores finales, (13) barras guía para el desplazamiento del sistema de efectores finales, (14) cabezal para la sujeción de los efectores finales, (15) motor paso a paso Nema 23 para el desplazamiento en el eje Z, (16) articulación de soporte del cabezal, (17) soporte para barras de guía lineal, (18) base corredera del cabezal, (19) base soporte del cabezal, y (20) chumacera para husillo para el desplazamiento del sistema en el eje X.	134
Figura 10. Dispositivo extractor: a) vista superior, b) vista lateral izquierdo. Las flechas de color amarillo indican el desplazamiento del cabezal en los tres ejes. P1-C1 indica la cavidad 1 en la posición 1, P1-C20 indica la cavidad 20 en la posición 1, P10-C1 indica la cavidad 1 en la posición 10, P10-C20 indica la cavidad 20 en la posición 10.....	135
Figura 11. Histogramas para los parámetros de diseño de los gripper del efector final: a) medidas de h_{s1} según el d_s de cada tallo, b) medidas de h_g según el h_s de cada tallo.....	137
Figura 12. Efector final para la sujeción de las plántulas: a) vista lateral, b) vista frontal, c) vista isométrica. (01) micro servomotor, (02) eslabón, (03) eje guía, (04) estructura para sujeción de ejes guía, (05) estructura principal del efector final,	

(06) tornillería, (07) gripper 1, (08) gripper 2, (09) sensor de fuerza y (10) recubrimiento de silicona RTV.	138
Figura 13. Propuesta del diagrama de flujo para el funcionamiento del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.	139

CAPITULO 7

Gráfica 1. Valor en millones de exportaciones e importaciones de hortalizas, plantas, raíces y tubérculos	152
Gráfica 2. Porcentaje de existencia de la maquinaria, equipo e implementos utilizados en las unidades de producción agropecuaria a nivel nacional	153
Figura 1 Situación actual del trasplante de hortalizas en el contexto de la evolución de la agricultura a nivel mundial	154
Figura 2 Prácticas de Agricultura tradicional en la comunidad de Atzacoloya, municipio de Chilapa de Álvarez, Guerrero: a) preparación de suelo previo al trasplante de cebolla, b) trasplante manual de plántulas de cebolla roja en campo abierto con riego rodado, c) trasplante manual de plántulas de tomate de cáscara en campo abierto con sistema de riego por goteo, y d) trasplante manual de plántulas de jitomate en campo abierto con acolchado y riego por goteo; instalación posterior de malla sombra.....	157
Figura 3 Implicaciones necesarias para lograr implementar la tecnología del trasplante automático de hortalizas en el campo mexicano.....	158
Figura 4 Instituciones clave y acciones estratégicas para promover la automatización del trasplante de hortalizas en México.....	159

ACRÓNIMOS

AF	Adhesion Force
IA	Artificial Intelligence
ANOVA	Analysis of variance
ASNS	American Standard for Nursery Stock
ASAE	American Society of Association Executives
BIC	Bayesian Information Criterion
b_{ma}	The widest base of the root ball
CIH	<i>CID</i> hybrid
CM	Center of mass
CONAHCyT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
CSM	Common sequence method
CV	Coefficient of variation
De	Demandas del cliente
DF	Degrees of Freedom
DT	Drop test
Ds	Deseos del cliente para los requerimientos de diseño
d_s	Stem diameter
d_{s1}	One-third of d_s
d_{s2}	Two-thirds of d_s
d_{se}	Position located 10 mm above the root-ball surface
ED	Estadísticos descriptivos
E_a	Energy (auxiliary)
E_c	Energy (charge)
E_l	Energy (loss)
EMMs	Estimated Marginal Means
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations

GAH	<i>Gavilán</i> hybrid
GGA	Greedy genetic algorithm
GPU	Graphics Processing Unit
GRA	Greedy algorithm
GSS	Galvanized steel sheet
GVIF	Generalized Variance Inflation Factor
H	Number of leaves
h	Height
H1	Natalie F1 hybrid
H2	CID F1 hybrid
H3	<i>Gavilán</i> F1 hybrid
h_g	Altura de los gripper
h_s	Stem height
h_{s1}	Altura a la que se sujeta el tallo que se encuentra entre el gripper y la b_{ma}
I	Large
IGSA	Improved greedy simulated annealing
LR	Loading Rates
MA	Massachusetts
MAE	Mean Absolute Error
MC	Moisture content
NR	Number of rows
P1-C1	Cavidad 1 en la posición 1
P1-C20	Cavidad 20 en la posición 1
P10-C1	Cavidad 1 en la posición 10
P10-C20	Cavidad 20 en la posición 10
R^2	Coefficient of determination
R_a^2	Adjusted coefficient of determination
RB	Root ball
RBPF	Root ball punching force
RCF	Radial Compression Force

RCF1	Radial Compression Force of d_{s1}
RCF2	Radial Compression Force of d_{s2}
RCF_{perm}	Permissible radial compression force
RMSE	Root Mean Square Error
RTV	Room Temperature Vulcanizing
SECIHTI	Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación
SBR	Commercial neoprene
SD	Standard Deviation
SFC	Static friction coefficient
SG	Seedlings
SMC	Stem Moisture Content
S&WoS	Scopus and Web of Science
Sys-1	System 1
Sys-2	System 2
Sys-3	System 3
SW_i	Initial stem weight
T	Oscillation period
TC	Total citations
USA	United States American
VIF	Variance inflation factors
w	Width
W_{exp}	Experimentally absorbed energy
W_{pre}	Absorbed energy predicted
$\bar{x}$	Mean
ΔD	Displacement of the upper platen
$\Delta D1$	Platen displacement equivalent to d_{s1}
$\Delta D2$	Platen displacement equivalent to d_{s2}
χ^2	Chi-squared

DEDICATORIAS

*Níktlasojkamate to **Tajtsín**, uan okichíjchi nochej on tlamantle, pampa nechmakatikaj nemílistle iuan tlamachílistle tlin onehpaleuej kampa ninemej amantsin.*

*Ika notaj **Luis Grande**, níktlasojkamate kampa nochipa nechtlayokolia miyak tlamachílistle, tlakanotsalistle, iknotlamatílistle iuan nechpaleuia ipan notlalnamiikilis kuak xoknikita on ojtle uan tlin níknejnentina.*

*Ika nonan **Hermelinda Martínez**, tlaxtlaue kampa nechtlayokolia miyak tlasojkatlalistle, itlajtolpaleuilis iuan itlapaleuilis ipan nochej tlin níjtlapejpenia ipan nonemilis.*

*Ika nokni **Santa Grande** iuan itotaj **Cirilo Rodríguez**, níktlasojkamate kampa nochipa nechpaleuij.*

*Ika nosobrinas **Ana Lucía** iuan **Dalia**, níktlasojkamate kampa nochipaj nechtlayokolij miyak pakílistle.*

*Ika nochej noyojlo, **Gaudencio**.*

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación** (SECIHTI) por el apoyo económico (N° de beca 838532) para hacer posible mis estudios de doctorado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo** y al **Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA)**, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado.

Al **Dr. Martín Hidalgo Reyes**, por el apoyo y las valiosas sugerencias recibidas a lo largo de los cuatro años de este proyecto de investigación. Asimismo, valoro enormemente la confianza depositada en mí durante las etapas de aprobación, ejecución y revisión de este trabajo, así como su constante orientación y retroalimentación, fundamentales para su finalización.

Al **Dr. Pedro Cruz Meza**, por su disposición, valioso tiempo y acompañamiento durante la aprobación, desarrollo y revisión de este proyecto de investigación. Sus conocimientos, experiencia y acertadas observaciones contribuyeron significativamente al enriquecimiento de este trabajo y a mi formación académica.

Al **Dr. Noé Velázquez López** por el tiempo, apoyo y dedicación brindados durante las etapas de aprobación, desarrollo y revisión de este proyecto. Expreso mi más sincero agradecimiento por sus valiosas aportaciones, conocimientos y experiencia, que aportaron de manera significativa al desarrollo científico de esta tesis.

Al **Dr. Francisco Garibaldi Marquez** por el tiempo dedicado a la revisión de este documento y por las valiosas observaciones realizadas para su mejora. Expreso mi más sincero agradecimiento por sus valiosas aportaciones, conocimientos y experiencia, los cuales contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento académico y científico de esta tesis.

Al **Ing. Abraham Cortés** y al **M. E. Humberto Sebastián**, por la gestión para el acceso a las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y los diferentes equipos utilizados para la realización de este proyecto de investigación. Así mismo, en la gestión de apoyo económico para la compra de algunos materiales de experimentos y la logística para salidas a campo y pruebas.

Al **Dr. Carlos Villaseñor** y a la **Dra. Rosario Venegas**, por facilitarme el acceso y apoyo técnico para la realización de pruebas en las instalaciones del Laboratorio de Pruebas Biológicas.

Al **Dr. Noel Chávez**, por facilitarme el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Física y Mecánica de Suelos para la realización de algunas pruebas realizadas. Su colaboración contribuyó de manera significativa a los resultados de esta investigación.

Al **Biól. José Cutberto Vázquez**, por la facilidad de ingreso a las instalaciones del laboratorio del Departamento de Fitotecnia para la realización de algunas pruebas que contribuyeron significativamente al desarrollo de esta tesis.

Al **Dr. Juan Sanabria Mafaile**, por facilitarme el acceso a las instalaciones del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) del Instituto Politécnico Nacional y apoyo técnico brindado durante las pruebas realizadas en el analizador de texturas. Su colaboración contribuyó significativamente a la obtención de resultados que fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación.

Al **Colegio de postgraduados (COLPOS) Campus Montecillos**, en particular a la **Dra. Luz María Pérez Hernández**, a la **M.C. Cirene Gutiérrez** y al **Biól. Simón Morales**, por las facilidades brindadas para el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), así como por el apoyo técnico proporcionado durante la preparación, análisis y obtención de resultados de las muestras evaluadas en esta investigación.

Al **Dr. Juan Gabriel Brigido Morales**, por el tiempo y la dedicación brindados durante la revisión de uno de los capítulos de esta tesis doctoral. Agradezco profundamente sus valiosas observaciones, conocimientos y sugerencias, que contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento de la calidad científica de esta tesis.

A mis compañeros y amigos del posgrado: **Raúl Vidal, Plutarco, Álvaro, Gamaliel, Luis Gerardo, Oneyda, y Eduardo**, por su amistad, apoyo y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron significativamente al desarrollo de este proyecto de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales



Nombre: Gaudencio Grande Martínez
Fecha de nacimiento: 12 de febrero de 1993
Lugar de nacimiento: Atzacoloya, Chilapa de Álvarez, Guerrero
CURP: GAMG930212HGRRRD08
Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola
Cédula Profesional: 11716325
Cédula maestría: 12979870

Desarrollo Académico

Bachillerato: Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Guerrero, plantel 02 Chilapa (2011).
Licenciatura: Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (2018).
Maestría Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (2021).

RESUMEN GENERAL

PARAMETRIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE TRASPLANTE DE PLÁNTULAS DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)

En México, el trasplante de plántulas de jitomate en sistemas de producción de pequeña y mediana escala se realiza de forma manual o mediante equipos mecánicos, debido a la limitada disponibilidad de sistemas automáticos adaptados a estas condiciones. Las trasplantadoras automáticas comerciales están orientadas a producciones de gran escala y su costo es elevado por su origen extranjero. El objetivo de esta tesis fue generar fundamentos técnicos para el diseño de un sistema automatizado de extracción de plántulas de jitomate, mediante la caracterización de sus propiedades físico-mecánicas. La investigación comprendió cinco estudios. El primero consistió en una revisión de las principales variables que influyen en el desarrollo de trasplantadoras automáticas de plántulas de hortalizas. En el segundo se determinaron las propiedades físico-mecánicas en tres híbridos comerciales F1 (*Natalie*, *CID* y *Gavilán*), como contenido de humedad, masa, fuerza de adhesión (AF) y coeficiente de fricción. En el tercero se evaluó la fuerza de compresión radial (RCF) y estableció criterios para prevenir daños en el tallo durante la sujeción. Después, en el cuarto se abordó el diseño de un dispositivo extractor con base en los requerimientos mecánicos obtenidos experimentalmente. Finalmente, en el quinto se analizó, mediante un ensayo científico, los efectos de incorporar sistemas automáticos de trasplante en zonas rurales, particularmente respecto al desplazamiento de mano de obra. Los resultados permitieron establecer parámetros de diseño para la extracción simultánea de plántulas y determinar una AF de 3.815-7.470 N y una RCF_{perm} de 20 N, como valores de referencia para reducir el riesgo de daño microestructural. El dispositivo propuesto presenta dimensiones de $1.2 \times 0.5 \times 1.0$ m, una masa estimada de 33 kg y capacidad para extraer simultáneamente 10 plántulas. Su integración busca favorecer la transición tecnológica en el trasplante de jitomate sin generar efectos adversos sobre el empleo rural.

Palabras clave: contenido de humedad, fuerza de adhesión, fuerza de compresión radial, híbridos F1, plántulas de jitomate, propiedades físico-mecánicas, trasplante automático.

GENERAL ABSTRACT

PARAMETERIZATION FOR THE DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS FOR TRANSPLANTING OF TOMATO (*Solanum lycopersicum*) SEEDLINGS

In Mexico, tomato seedling transplanting in small- and medium-scale production systems is carried out either manually or with mechanical equipment due to the limited availability of automated systems adapted to these conditions. Commercial automatic transplanters are designed for large-scale production, and expensive due to their foreign origin. The aim of this thesis was to provide technical basis for the design of an automated tomato seedling extraction system through the characterization of the physical-mechanical properties of tomato seedlings. The research comprised five studies. The first consisted of a review of the main variables influencing the development of automated vegetable seedling transplanters. In the second, the physical and mechanical properties of three commercial F1 hybrids (*Natalie*, *CID*, and *Gavilán*), including moisture content, weight, adhesion force (AF), and coefficient of friction were determined. The radial compression force (RCF) and established criteria to prevent stem damage during gripping were evaluated in the third. The fourth addressed the design of an extraction device based on the mechanical requirements obtained experimentally. Finally, the fifth study analyzed, through a scientific essay, the effects of incorporating automated transplanting systems in rural areas, particularly regarding labor displacement. The results established design parameters for the simultaneous extraction of seedlings and identified an AF of 3.815-7.470 N and an RCF_{perm} of 20 N, as reference values for reducing the risk of microstructural damage. The proposed device has dimensions of 1.2 × 0.5 × 1.0 m, an estimated weight of 33 kg, and the capacity to simultaneously extract 10 seedlings. Its integration aims to promote the technological transition in tomato transplanting without adversely affecting rural employment.

Keywords: moisture content, adhesion force, radial compression force, F1 hybrids, tomato seedlings, physical-mechanical properties, automatic transplanting.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Se estima que la población mundial alcanzará los 9700 millones de habitantes para el año 2050, y que dos terceras partes vivirán en zonas urbanas (FAO, 2017). Este crecimiento poblacional provocará hasta 102% en la demanda de alimentos de la que se requiere actualmente; sin embargo, se prevé una menor disponibilidad de mano de obra en la agricultura, que deberá abastecer a la población y garantizar su seguridad alimentaria (Fukase & Martin, 2020; Tripathi et al., 2019).

Frente a este escenario, el sector agrícola debe adoptar nuevas estrategias tecnológicas que le permitan enfrentar los desafíos asociados al aumento de la producción, reducir la escasez de alimentos, optimizar los sistemas agrícolas y fomentar la sostenibilidad en el futuro (Huang & Wang, 2024; Islam et al., 2024; Ruzzante et al., 2021). Entre estas técnicas y tecnologías se encuentran la biotecnología, la ingeniería genética, energía renovable, drones, automatización con robots, tecnología ganadera, teledetección, gestión del agua y monitoreo de riego, internet de las cosas, Big data, inteligencia artificial, nanotecnología, entre otras (Boros et al., 2025; Gamage et al., 2024; Kalfas et al., 2024).

En este contexto, la automatización agrícola tiene un papel importante ya que podría ayudar a complementar la mano de obra escasa, principalmente en actividades repetitivas y físicamente exigentes durante periodos de tiempo prolongados, como el trasplante de plántulas de hortalizas, lo que mejoraría la eficiencia y reduciría los costos en su producción (Bazargani & Deemyad, 2024; Charania & Li, 2020; B. Cheng et al., 2024; Marinoudi et al., 2019).

El trasplante automático de hortalizas, combina prácticas tradicionales basadas en tareas manuales y laboriosas que requiere habilidades específicas para evitar el daño de las plántulas. También involucra innovaciones tecnológicas como sensores de visión y efectores finales, manteniendo la precisión y estabilidad durante la práctica (Ahmed et al., 2024; Cheng et al., 2023). El trasplante automático de plántulas ha sido estudiado en diversas hortalizas por varios investigadores. Khadatkhar et al. (2021) exploró el trasplante de plántulas de chile (variedad *Pusa Jwala*); Zhou et al. (2024) con plántulas de pimiento (*Capsicum annuum*); Shi (2015), con plántulas de maíz (*Zea mays*); Jie et al. (2019), con plántulas de arroz (*Oryza sativa*); Reza et al. (2023) y Chowdhury et al. (2023), con cebolla (*Allium cepa*); Jin et al. (2020), con repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*); Vivek et al. (2017), con berenjena (*Solanum melongena*); Han et al. (2019), con pepino *Jinyou* (*Cucumis sativus*) y Jin et al. (2022), con lechuga (*Lactuca sativa*).

En el caso específico de plántulas de jitomate, Xin et al. (2019) y Khadatkhar et al. (2024) realizaron investigaciones sobre mecanismos y trasplantadoras automáticas en las variedades *Jinguan 19* y *Abhilash*, respectivamente. Asimismo, Liu et al. (2024), Shao et al. (2021) y Zhou et al. (2025) estudiaron sistemas de trasplante automatizado sin especificar la variedad de jitomate utilizada. Sin embargo, para el desarrollo de sistemas de trasplante automatizado es necesario considerar las propiedades físico-mecánicas de las plántulas, por su susceptibilidad a sufrir daños durante las operaciones de manipulación, particularmente en el tallo, las hojas y el cepellón. En este sentido, algunas investigaciones han incorporado la caracterización de dichas propiedades como parte de los criterios para el diseño y desarrollo de prototipos. Khadatkhar et al. (2020) estudiaron plántulas de la variedad *Abhilash*; Abubakar et al. (2020) trabajaron con la variedad *Roma VF*; Magar et al. (2023), con el híbrido *Ansal*; y Shao et al. (2021) y L. Han et al. (2023), quienes no especificaron la variedad empleada. Estos estudios evidencian la importancia de determinar las características físico-mecánicas de las plántulas como fundamento para

establecer criterios de diseño que permitan su manipulación y extracción de manera eficiente, reduciendo el riesgo de ocasionar daños mecánicos.

Sin embargo, la literatura en México sobre el desarrollo de sistemas para el trasplante automático y la determinación de las propiedades físico-mecánicas de plántulas de hortalizas, específicamente de jitomate, es escasa. Por lo que, considerando que el país es un exportador importante de hortalizas, es conveniente desarrollar tecnologías que ayuden a mejorar los procesos repetitivos y exhaustos de trasplante.

1.2 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar y caracterizar los parámetros físicos, morfológicos y biomecánicos de plántulas de jitomate, a fin de establecer criterios técnicos de diseño y dimensionamiento de los mecanismos de extracción, sujeción y manipulación que integran sistemas automáticos de trasplante, adaptados a las condiciones de producción de pequeña y mediana escala de la región centro de México.

1.3.2. Objetivos específicos

- ❖ Analizar la evolución, el desarrollo tecnológico y las características ingenieriles de los prototipos para el trasplante automático de hortalizas a través de los años, mediante un análisis bibliométrico y una revisión detallada.
- ❖ Determinar las propiedades físicas y mecánicas de tres variedades híbridas F1 de jitomate, con el fin de generar datos que sirvan de base para el diseño de trasplantadoras automáticas adaptadas a las condiciones específicas de dichas variedades.
- ❖ Determinar la fuerza de compresión radial (RCF) a un tercio del diámetro del tallo, así como la RCF máxima, en plántulas de jitomate correspondientes a dos híbridos F1 (*CID* y *Gavilán*), evaluadas bajo cinco velocidades de carga, para la definición de rangos de fuerza de sujeción

seguros durante la etapa de extracción en sistemas de trasplante automatizado.

- ❖ Proponer el diseño teórico de un dispositivo para trasplantadoras automáticas capaz de extraer plántulas de jitomate, a través de sus tallos, que han sido germinadas en charolas germinadoras mediante las fases del proceso de diseño con metodologías de diseño existentes, para asegurar una extracción eficiente sin causar daño mecánico al tallo.
- ❖ Analizar el impacto potencial de la automatización del trasplante de hortalizas en México, considerando tanto los beneficios asociados con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, como con los posibles efectos sobre el empleo rural y la cohesión social, a fin de dar pauta para que las comunidades rurales adopten la transición hacia una agricultura más inteligente, sostenible e inclusiva.

1.3 Hipótesis

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de las plántulas de jitomate permite establecer parámetros de diseño para un dispositivo automatizado de extracción simultánea mediante la sujeción de los tallos, operando bajo límites mecánicos permisibles que reducen significativamente el riesgo de daño tisular durante la extracción en el trasplante.

1.4 Estructura de la tesis

El presente trabajo de investigación está conformado por nueve capítulos:

El **capítulo uno** presenta la introducción general del proyecto de investigación, compuesto de los antecedentes, el problema estudiado, los objetivos y la composición de la investigación (descripción breve del contenido de los capítulos).

El **capítulo dos** corresponde a la revisión de literatura referente al problema de investigación y la importancia del estudio. Abarca temas como el origen del jitomate, la importancia y producción en México, proceso de trasplante, sistemas

que componen el trasplante automático, propiedades de las plántulas que influyen en su trasplante, y prototipos de trasplantadoras automáticas.

El **capítulo tres** presenta el primer artículo titulado: “**Evolution and technological development of automatic transplanter for vegetables: a review**”. En este capítulo se presentan los resultados de la revisión de literatura sobre la evolución y como se han desarrollado las trasplantadoras automáticas de diferentes países del mundo con plántulas de diferentes tipos de hortalizas y características y variables a tomar en cuenta para el desarrollo de estos prototipos. Así mismo, el panorama actual del trasplante automático de hortalizas en México y las áreas de oportunidades para el desarrollo de prototipos novedosos.

El **capítulo cuatro** presenta el segundo artículo científico titulado: “**Physical-Mechanical properties of tomato seedlings for the design and optimization of automatic transplanters**”. Este capítulo presenta las propiedades físicas y mecánicas de las plántulas de jitomate de 30 días de edad en tres híbridos F1: *Natalie* (H1), *CID* (H2) y *Gavilán* (H3). Las variables tipo de híbrido, el tiempo de germinación y el contenido de humedad son las que influyen más en las propiedades físicas y mecánicas. Las propiedades estudiadas se utilizan para el diseño (dimensionamiento y modelado 3D), la construcción y la evaluación técnica de un prototipo para el trasplante automático de plántulas de jitomate.

El **capítulo cinco** presenta el tercer artículo científico titulado: “**Comportamiento biomecánico de tallos de plántulas de jitomate para el diseño de mecanismos de sujeción de trasplante automático**”. Este capítulo presenta el análisis de la fuerza de compresión radial en tallos de plántulas de jitomate para dos híbridos comerciales F1: *CID* (CIH) y *Gavilán* (GAH). Se incluyeron cinco velocidades de carga (LV) y covariables físicas: diámetro, contenido de humedad y altura del tallo. Se obtuvieron resultados en dos fases: en la inicial denominada RCF1 se presentan fuerzas cuando comienzan a aparecer micro rupturas y en la avanzada como RCF2 se presentan fuerzas al punto de ruptura del tallo. Estos datos son necesarios para conocer la fuerza máxima que se le puede aplicar a

los tallos de las plántulas al extraer y manipularlas en el trasplante automatizado sin tener microfracturas y causar estrés y aparición de hongos en la etapa de postrasplante.

El **capítulo seis** presenta el cuarto artículo científico titulado: “**Diseño de un dispositivo extractor de plántulas de jitomate de charolas germinadoras para trasplantadoras automáticas**”. Aquí se propone el diseño del extractor de plántulas de jitomate con datos experimentales de dos híbridos comerciales F1: *CID* (CIH) y *Gavilán* (GAH). Se obtuvo el diseño de un dispositivo con dimensiones de $1.2 \times 0.5 \times 1.0$ m, una masa estimada de 33 kg y capacidad para extraer simultáneamente 10 plántulas. Este prototipo podría ser adaptado a trasplantadoras mecánicas y aprovechar el sistema eléctrico del tractor, generando de esta manera una transición y actualizando maquinaria existente en el país.

El **capítulo siete** presenta un ensayo científico titulado: “**Automatización del trasplante de hortalizas en México: innovación sostenible o riesgo de desplazamiento laboral rural**”. Se analiza de manera crítica como afectaría la robótica en el trasplante de hortalizas en el país a futuro. Analiza de qué manera se realiza en el país actualmente y como se realiza en un lugar específico de Guerrero y como influyen los tiempos críticos al sembrar este tipo de cultivos. Además, se discute la necesidad de realizar la transición tecnológica y se enlistan algunas instituciones o acciones necesarias para el desarrollo tecnológico del trasplante de hortalizas en el país, con el fin de garantizar la mano de obra en tiempos críticos en un futuro cercano y garantizar la soberanía agroalimentaria.

El **capítulo ocho** presenta las **conclusiones generales** del tema de investigación. Además, se reflexiona sobre los alcances obtenidos y el futuro de la investigación realizada.

Finalmente, el **capítulo nueve** muestra los anexos de la investigación, compuesta principalmente de las constancias de congresos internacionales y simposios en los que se participó, derivados de la tesis doctoral.

1.5 Referencias

- Abubakar, A. J., Iya, S. A., Aliyu, B., & Tashiwa, Y. I. (2020). Determination of physico-mechanical properties of tomato seedlings for design of a tomato transplanter. *Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)*, 25(1), 106–122.
- Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P. (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation — a review. *Frontiers in Plant Science*, 15(April), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1357153>
- Bazargani, K., & Deemyad, T. (2024). Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects. *Robotics*, 13(2), 33–57. <https://doi.org/10.3390/robotics13020033>
- Boros, A., Szólik, E., Desalegn, G., & Tózsér, D. (2025). A Systematic Review of Opportunities and Limitations of Innovative Practices in Sustainable Agriculture. *Agronomy*, 15(1), 1–40. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010076>
- Charania, I., & Li, X. (2020). Smart farming: Agriculture's shift from a labor intensive to technology native industry. *Internet of Things (Netherlands)*, 9, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100142>
- Cheng, B., Wu, H., Zhu, H., Liang, J., Miao, Y., Cui, Y., & Song, W. (2024). Current Status and Analysis of Key Technologies in Automatic Transplanters for Vegetables in China. *Agriculture (Switzerland)*, 14(12), 2168. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>
- Cheng, C., Fu, J., Su, H., & Ren, L. (2023). Recent advancements in agriculture robots: benefits and challenges. *Machines*, 11(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/machines11010048>
- Chowdhury, M., Ali, M., Habineza, E., Reza, M. N., Kabir, M. S. N., Lim, S. J.,

- Choi, I. S., & Chung, S. O. (2023). Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards. *Agriculture (Switzerland)*, 13(3), 652. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030652>
- FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. In *El futuro de la agricultura y la alimentación*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f7ecc7f0-8b58-48b5-ae57-290d5f8808c1/content>
- Fukase, E., & Martin, W. (2020). Economic growth, convergence, and world food demand and supply. *World Development*, 132, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Subasinghe, S., Gamage, J., Guruge, C., Senaratne, S., Randika, T., Rathnayake, C., Hameed, Z., Madhujith, T., & Merah, O. (2024). Advancing sustainability: The impact of emerging technologies in agriculture. *Current Plant Biology*, 40(April), 100420. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100420>
- Han, L. H., Mao, H. P., Hu, J. P., & Kumi, F. (2019). Development of a riding-type fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 17(3). <https://doi.org/10.5424/sjar/2019173-15358>
- Han, L., Xiang, D., Xu, Q., Du, X., Ma, G., & Mao, H. (2023). Development of simplified seedling transplanting device for supporting efficient production of vegetable raw materials. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18), 10022. <https://doi.org/10.3390/app131810022>
- Huang, W., & Wang, X. (2024). The Impact of Technological Innovations on Agricultural Productivity and Environmental Sustainability in China. *Sustainability (Switzerland)*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/su16198480>
- Islam, M. H., Anam, M. Z., Hoque, M. R., Nishat, M., & Bari, A. B. M. M. (2024). Agriculture 4.0 Adoption Challenges in the Emerging Economies: Implications for Smart Farming and Sustainability. *Journal of Economy and*

- Jie, H., Jinguang, Z., Zhigang, Z., Xiwen, L., Yang, G., & Lian, H. (2019). Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 50(3).
- Jin, X., Li, R., Tang, Q., Wu, J., Jiang, L., & Wu, C. (2022). Low-damage transplanting method for leafy vegetable seedlings based on machine vision. In *Biosystems Engineering* (Vol. 220, pp. 159–171). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.05.017>
- Jin, X., Yuan, Y., Ji, J., Zhao, K., Li, M., & Chen, K. (2020). Design and implementation of anti-leakage planting system for transplanting machine based on fuzzy information. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169(December 2019), 105204. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105204>
- Kalfas, D., Kalogiannidis, S., Papaevangelou, O., Melfou, K., & Chatzitheodoridis, F. (2024). Integration of Technology in Agricultural Practices towards Agricultural Sustainability: A Case Study of Greece. *Sustainability (Switzerland)*, 16(7), 2664. <https://doi.org/10.3390/su16072664>
- Khadatkar, A., Gaikwad, B., & Pandirwar, A. (2020). Biometric Properties of Plug Vegetable Seedlings Relevant to the Design of Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering*, 57(1), 16–24.
- Khadatkar, A., Magar, A. P., Sawant, C. P., & Modi, R. U. (2024). Development and testing of automatic seedling extractor in robotic transplanter using mechatronics for nursery seedlings. *Discover Applied Sciences*, 6(2), 51. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05670-2>
- Khadatkar, A., Mathur, S. M., Dubey, K., & Bhusanababu, V. (2021). Development of embedded automatic transplanting system in seedling transplanters for precision agriculture. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 175–184.

<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.08.001>

- Liu, Z., Shi, L., Liu, Z., Xing, J., Hu, C., Wang, X., & Wang, L. (2024). Design and Testing of a Seedling Pick-Up Device for a Facility Tomato Automatic Transplanting Machine. *Sensors*, 24(20), 6700. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24206700>
- Magar, A. P., Nalawade, S. M., Walunj, A. A., Khadatkar, A., Bhangare, S. C., Bhalekar, M. N., Nimbalkar, C. A., & Gaikwad, B. B. (2023). Engineering Properties of Some Plug-type Vegetable Seedlings for Development of Automatic Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 60(1), 1–13. <https://doi.org/10.52151/jae2023601.1792>
- Marinoudi, V., Sørensen, C. G., Pearson, S., & Bochtis, D. (2019). Robotics and labour in agriculture. A context consideration. *Biosystems Engineering*, 184, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013>
- Reza, M. N., Ali, M., Habineza, E., Kabir, M. S., Kabir, M. S. N., Lim, S. J., Choi, I. S., & Chung, S. O. (2023). Analysis of operating speed and power consumption of a gear-driven rotary planting mechanism for a 12-kW six-row self-propelled onion transplanter. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 21(3). <https://doi.org/10.5424/sjar/2023213-20245>
- Ruzzante, S., Labarta, R., & Bilton, A. (2021). Adoption of agricultural technology in the developing world: A meta-analysis of the empirical literature. *World Development*, 146, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105599>
- Shao, Y., Han, X., Xuan, G., Liu, Y., Gao, C., Wang, G., & Hu, Z. (2021). Development of a multi-adaptive feeding device for automated plug seedling transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(2), 91–96. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211402.6003>
- Shi, T. (2015). Development and test of automatic corn seedling transplanter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(3), 23–30.

- Tripathi, A. D., Mishra, R., Maurya, K. K., Singh, R. B., & Wilson, D. W. (2019). Estimates for world population and global food availability for global health. In *The Role of Functional Food Security in Global Health* (pp. 3–24). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813148-0.00001-3>
- Vivek, P., Duraisamy, V. M., & Kavitha, R. (2017). Development of an Automatic Transplanting Mechanism for prostrate vegetable seedlings. *Madras Agricultural Journal*, 104(10–12), 401. <https://doi.org/10.29321/maj.2017.000087>
- Xin, J., Kaixuan, Z., Jiangtao, J., Hao, M., Jing, P., & Zhaomei, Q. (2019). Design and experiment of automatic transplanting device for potted tomato seedlings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(3), 1045–1054. <https://doi.org/10.1177/0954406218762954>
- Zhou, B., Miao, H., Guan, C., Ji, X., & Wang, X. (2024). Design and Test of Seedling-Picking Mechanism of Fully Automatic Transplanting Machine. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(20), 9235. <https://doi.org/10.3390/app14209235>
- Zhou, F., Zhang, M., Yan, W., Song, S., Niu, Y., Fan, T., Wang, B., Lu, F., & Zhang, G. (2025). Optimization and Testing of Operating Parameters for the Automatic Seedling Picking Device of Tomato Pot Seedling Transplanter. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 75(1), 610–618. <https://doi.org/10.35633/inmateh-75-52>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

1.6 Generalidades e importancia del jitomate

La especie *Solanum lycopersicum* L. es denominada comúnmente como jitomate (*xitomatl* en Nahuatl) en el centro y sur de México, mientras que en el norte del país y a nivel internacional se le conoce como tomate (Long, 1995; PROFECO, 2020). El jitomate tuvo su origen en la región andina de Colombia, Perú y Bolivia; sin embargo, su domesticación se desarrolló en México, donde lo cultivaban en un sistema policultivo (milpa) en chinampas durante los siglos XIV al XVI (González & Torres, 2014; Saavedra et al., 2017).

A nivel mundial, el jitomate es un producto hortícola de gran relevancia por su impacto económico y su valor nutricional. Esta hortaliza constituye una fuente importante de vitaminas, minerales y antioxidantes, contiene propiedades anticancerígenas, además, proporciona protección contra enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas, pudiendo ingerirse tanto en fresco como en diversas formas procesadas, tales como salsas, puré, saborizantes y otros productos alimenticios (Collins et al., 2022; SADER, 2022; SAGARPA, 2017; Tiwari et al., 2022).

En 2023, la producción de jitomate a nivel mundial fue de 192.318 millones de toneladas, siendo China el principal productor con 68.2 millones de t. Por su parte, México ocupó el 7° lugar a nivel mundial con una producción de 3.637 millones de t, bajo sistemas de agricultura protegida y cielo abierto; sin embargo, fue el principal exportador con el 25.1% de las exportaciones mundiales de 7.2 millones de toneladas (FAO, 2023; SIAP, 2024b). De acuerdo con el (DGSIAP, 2025), durante el año agrícola 2024, como se presenta en la Figura 1, los principales estados productores de esta hortaliza fueron Sinaloa, San Luis Potosí y Michoacán, con el 21.3, 15.0 y 7.8 %, respectivamente.

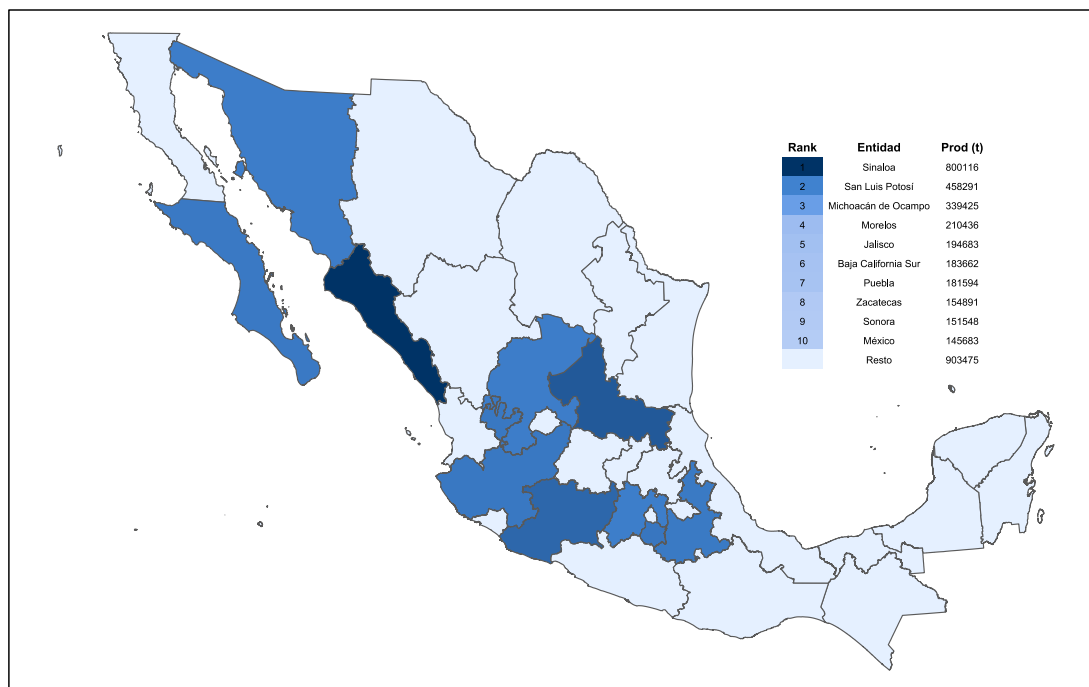


Figura 1. Estados de México líderes en volumen de producción de jitomate por toneladas durante el año 2024.

1.7 Sistemas de producción de jitomate

En México, el jitomate se cultiva comúnmente en campo abierto, malla sombra e invernadero, y los rendimientos varían según la tecnología empleada, el tipo de sistema de riego, la nutrición, el control fitosanitario y el ciclo agrícola correspondiente (Cih-Dzul et al., 2011; FIRA, 2019). Según datos del SIAP (2024a), las variantes comerciales o tipos de fruto más cultivados son saladette, bola, cherry y uva, y sus rendimientos durante el año agrícola 2023 (ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano), bajo la modalidad de riego + temporal, se presentan en la Figura 2.

En la producción de jitomate, existen labores culturales que son necesarias para obtener rendimientos por arriba de la media, que incluyen: preparación del suelo, trasplante, riego, fertilización, podas, control de plagas, control de malezas y cosecha (Naika et al., 2005; Pavani et al., 2020; Porcuna et al., 2012). Entre estas labores, el trasplante es una de las más importantes ya que disminuye la pérdida

de semillas y asegura la densidad de plántulas en un área determinada, uniformidad en el crecimiento y aumenta las ganancias obtenidas de la producción (Javanmardi & Moradiani, 2017; Lazcano-Bello et al., 2021; Sharma & Khar, 2024b; Vázquez-Casarrubias et al., 2011).

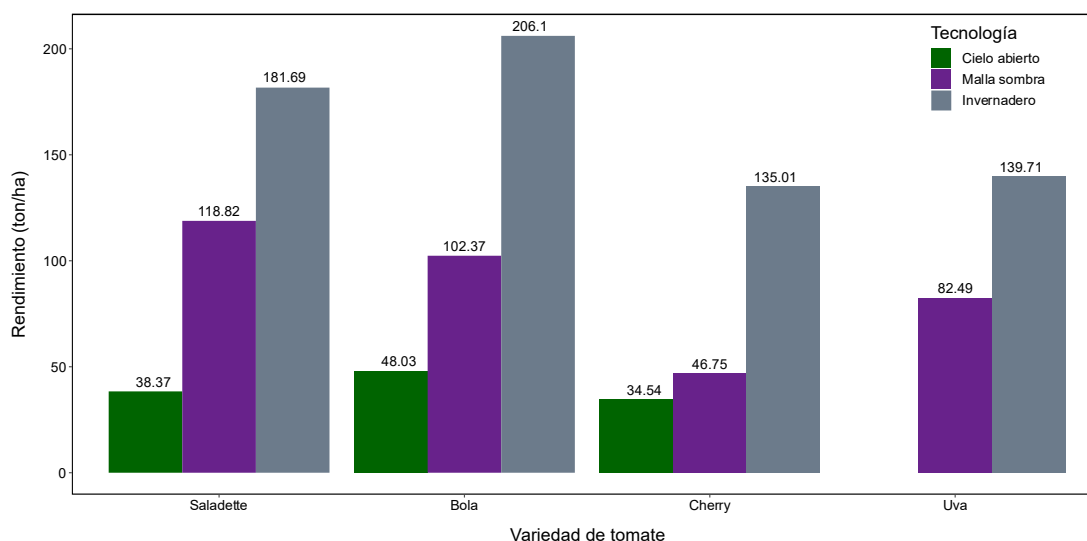


Figura 2. Rendimientos de las principales variantes comerciales cultivadas en México durante el año 2023, según el tipo de tecnología utilizada.

1.8 Trasplante de plántulas

Independientemente de la tecnología utilizada en el cultivo de jitomate, se lleva a cabo el proceso de trasplante con el objetivo de controlar la densidad de plantas por metro cuadrado y optimizar la producción, ya que este método permite un número mayor de cosechas posibles en comparación con la siembra directa (Amundson et al., 2012; Javanmardi & Moradiani, 2017).

En el trasplante, una de las variables a considerar es la edad de la plántula. Para el caso del jitomate, comúnmente esta práctica se realiza a las cuatro semanas después de sembrarse en charolas germinadoras, y debe realizarse por la tarde y con viento moderado (FAO, 2013). Aunque existen algunos autores que han realizado estudios con variedades silvestres, como Agustín-Oropeza et al. (2025), quienes concluyeron que a mayor edad mejoró la productividad del jitomate riñón silvestre, al trasplantarse a 49 días y 34 días.

Al diseñar un sistema de trasplante, el arreglo topológico del jitomate y de cualquier hortaliza es importante. Este parámetro define sus dimensiones ideales para garantizar el manejo adecuado de las plántulas. De acuerdo con SAGARPA (2017), el trasplante de jitomate se recomienda de 30 a 40 cm de distancia entre plantas en invernadero y de 25 a 40 cm en campo abierto. Las plántulas se disponen en dos hileras con una separación de 120 a 180 cm. Por otro lado, Baudoin (2002), recomienda que el trasplante de las plántulas de jitomate puede hacerse en líneas individuales (100 x 25 a 40 cm) como se muestra en la Figura 3, o en líneas pareadas (120 x 80 x 25 a 40 cm) como se presenta en la Figura 4.

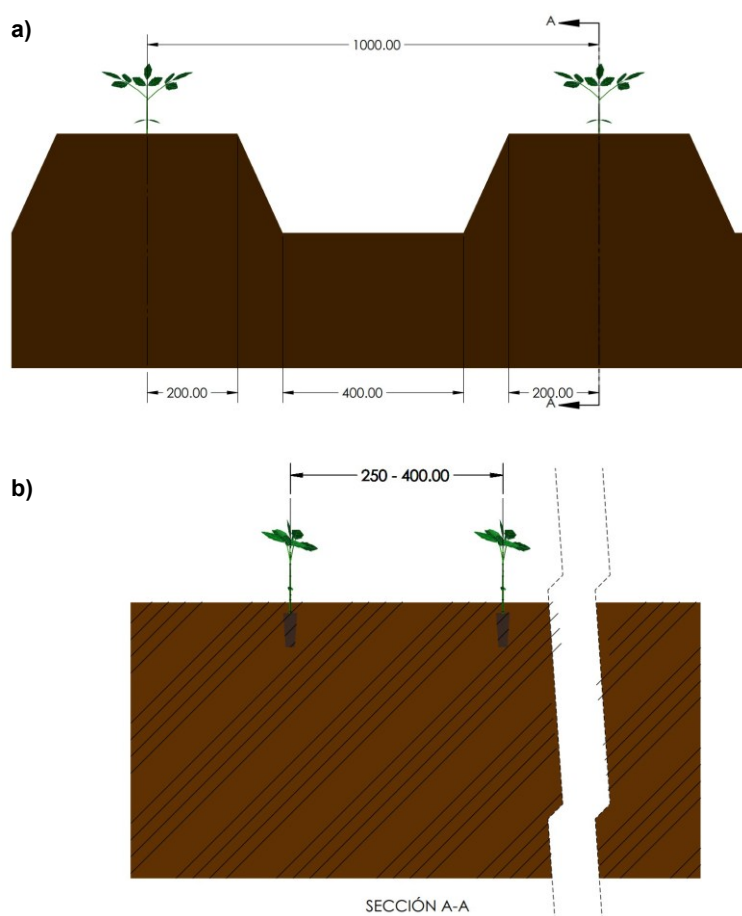


Figura 3. Arreglo topológico para el trasplante del jitomate a una sola hilera: **a)** vista frontal, **b)** corte longitudinal. Las dimensiones están en milímetros.

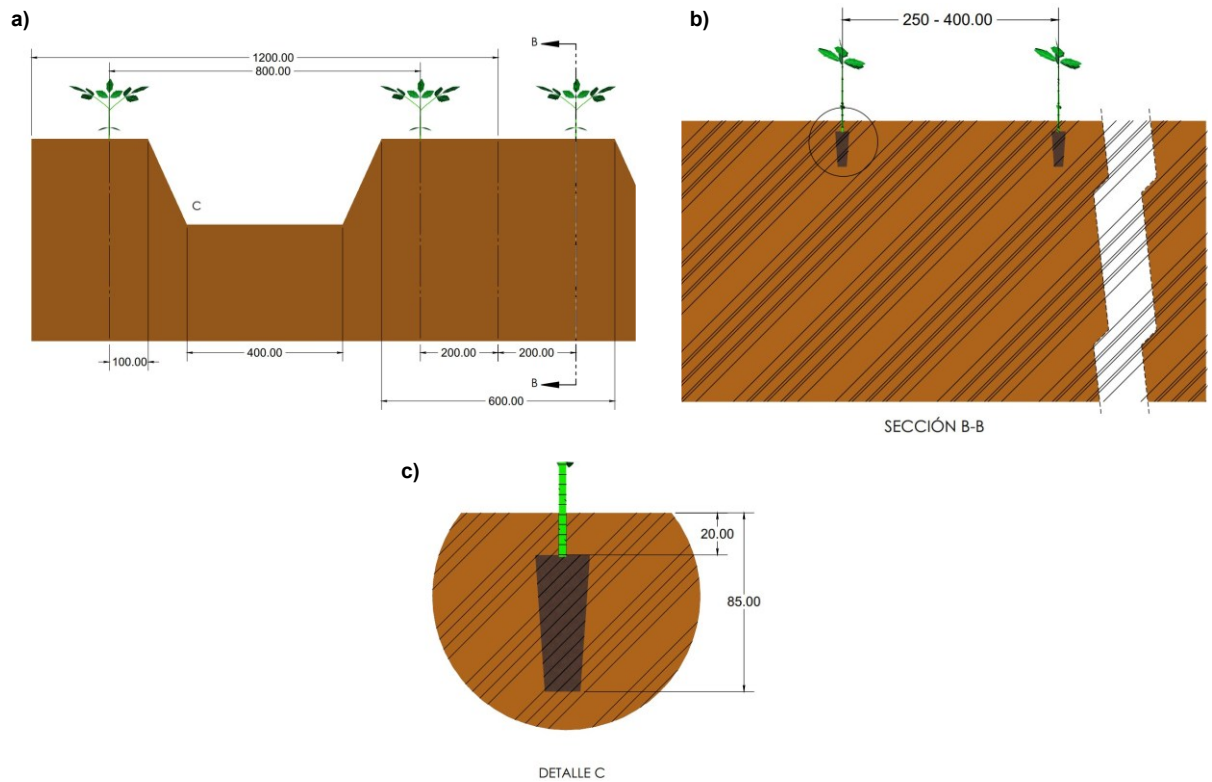


Figura 4. Arreglo topológico para el trasplante del jitomate a dos hileras: **a)** vista frontal, **b)** corte longitudinal y **c)** Profundidad a la que se depositarás las plántulas. Las dimensiones están en milímetros.

1.9 Sistemas de un trasplantador automático

De acuerdo con Nage et al. (2023), el trasplante de hortalizas se puede realizar de manera manual, con trasplantadoras semiautomáticas y automáticas (Figura 4). La diferencia entre estos equipos se encuentra en el nivel de intervención en el proceso de manipulación de las plántulas al extraerlas de las charolas germinadoras y colocarlas en el sistema de siembra. En las trasplantadoras semiautomáticas, la extracción de las plántulas de las charolas se realiza manualmente, mientras que en las automáticas es completamente automatizada (Hu et al., 2022; Zhou et al., 2024). A continuación, se describen algunos trabajos de los tres sistemas de las que se componen generalmente las trasplantadoras automáticas.

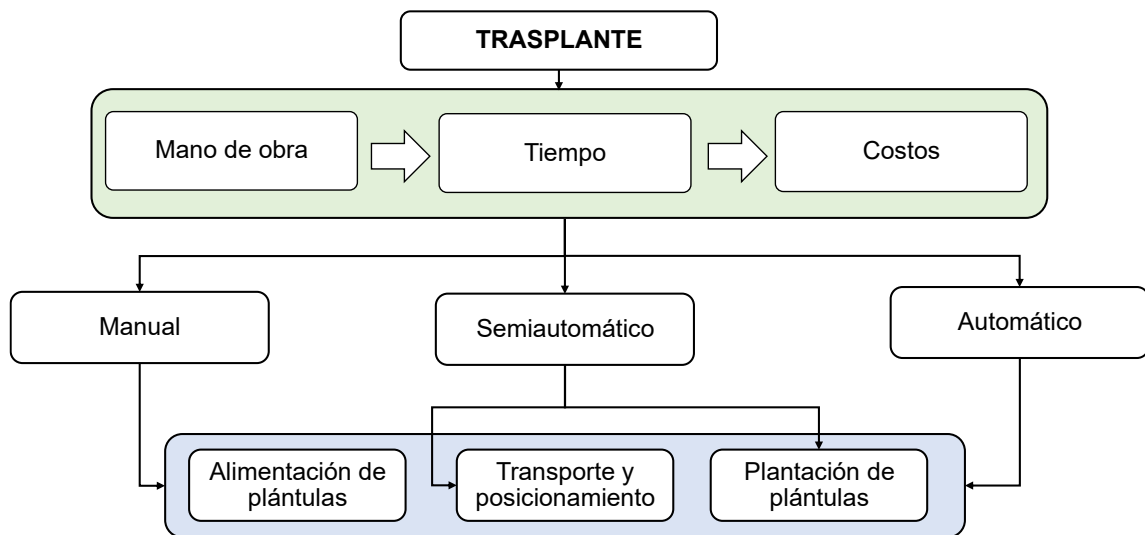


Figura 5. Tipos de trasplante según el nivel de automatización.

2.4.1 Extracción de plántulas

Este sistema está relacionado ampliamente con las propiedades físico-mecánicas de las plántulas y es por ello, que se requieren conocer los parámetros de la planta al ser manipulada durante el proceso. De manera conceptual, para la extracción de las plántulas de las charolas germinadoras, se tienen como alternativas: inserción en cepellones, sujeción de tallos, expulsión de las plántulas a través de los cepellones por medio de un vástago eyector o soplado (Cheng et al., 2024).

Sivakumar & Durairaj (2014) desarrollaron una investigación para extraer plántulas en bandejas de 98 cavidades, a través de su cepellón mediante un mecanismo de expulsión que consta de una garra que entra en la celda de la bandeja desde la parte superior y extrae la plántula de su celda, con una tasa de 15 a 20 plántulas*min⁻¹ y una tasa de éxito del 80% con plántulas de 20 días de edad.

De manera semejante, Ma et al. (2023) desarrollaron un dispositivo de recolección automática de plántulas de pepino en charolas germinadoras de 72 cavidades, combinando un efector final de tipo abrazadera y envoltura con una boquilla de 3.5 mm de diámetro con flujo de aire de 0.4 MPa.

Otra forma de extraer las plántulas de hortalizas se realiza por la parte superior del cepellón y sujeción a través de los tallos. En este sentido, Han et al. (2019) desarrollaron una pinza recogedora de plántulas de múltiples pines con la función de sujetar y extraerlas a través de sus cepellones con una tasa de integridad de siembra del 93.37%. Yue et al. (2022) diseñaron y optimizaron un dispositivo neumático con principio de garras para la recolección de plántulas en charolas germinadoras de plástico con 72 cavidades con una tasa de frecuencia de 120 plantas*min⁻¹, observando una tasa de daño del cepellón de 95.3% y una tasa promedio de recolección de 97.9%.

Además, Ma et al. (2020) trabajaron en un mecanismo neumático de 8 efectores finales que se insertan desde la parte superior del cepellón para recoger de una charola germinadora de 72 cavidades, plántulas de pepino (*Jingyou 1*) y su colocación automática en una trasplantadora. Los autores lograron una velocidad de trabajo de 0.54 m*s⁻¹, una frecuencia de recolección de 18 plántulas*garra*min⁻¹ y una tasa de éxito de 98.08%.

Por otro lado, Du et al. (2023) diseñaron un efector de trasplante basado en doble leva para la recolección de plántulas de charolas germinadoras de 72, 128 y 200 cavidades. Este efector estaba compuesto de agujas que se insertan en el cepellón con una aceleración de agarre de 0.28 m*s⁻¹ en los tres tipos de charolas; con un ángulo de penetración de 13°, 12° y 11°, respectivamente; las profundidades de inserción fueron 40, 36 y 32 mm, respectivamente. La menor tasa de rotura se presentó con las plántulas de la charola germinadora de 200 cavidades con 0.68%.

También, Islam et al. (2020) desarrollaron un dispositivo tipo pinza (un manipulador con 5 pinzas) para recoger plántulas de pimiento de charolas germinadoras con una velocidad de 150 plántulas*min⁻¹ y requirió una potencia de 18.59 W para su operación en campo.

Adicionalmente, para esta práctica, se han realizado investigaciones sobre el desarrollo de sensores, como es el caso de Ji et al. (2019), quienes desarrollaron

un sensor basado en una película piezoeléctrica de fluoruro de poli vinilideno (PVDF) para la sujeción de las plántulas a través de unas garras que se introducen en los cepellones. El sensor tiene una sensibilidad de fuerza de sujeción de 0.5264 V/N, una linealidad del 4.74%, una precisión de 6.51% y las fuerzas de sujeción estuvieron entre 3.25-3.70 N para una frecuencia de 45 plántulas*min⁻¹, 60 plántulas*min⁻¹ y 75 plántulas*min⁻¹.

Por otro lado, Zhou et al. (2024) desarrollaron un mecanismo de recolección de plántulas para una trasplantadora automática que las extrae a través de sus tallos. Los dedos de sujeción se controlan mediante válvulas solenoides de presión positiva y negativa que abren y cierran el paso del flujo de aire. Se obtuvo una tasa de extracción de 72 plantas*min⁻¹, una tasa de éxito del 94.90% y una tasa de lesiones del 1.95%.

Peng et al. (2025) desarrollaron un dispositivo para la extracción de plántulas de pimiento de 38 días de edad en charolas germinadoras de 72 cavidades. El principio de funcionamiento del dispositivo consiste en aflojar la parte inferior mediante una varilla eyectora y, posteriormente, sujetar el tallo de la plántula con una pinza para su extracción con ayuda de un cilindro neumático. La frecuencia de extracción es de 60 plántulas*min⁻¹, una tasa de éxito de 94.44%, una tasa de pérdida de sustrato de 6.07% y una tasa de daño de plántulas del 4.17%.

Además, Liu et al. (2024) desarrollaron un dispositivo automatizado para la recolección de plántulas de tomate de 40 días de edad, basado en el algoritmo YOLOv5 para la detección y estimación de la posición y configuración morfológica de los tallos. El sistema alcanzó una precisión de detección del 92.6% y un valor de mAP_{0.5} de 95.4%. En las pruebas experimentales, se registró una tasa de daño del 7.2%, mientras que la tasa de éxito en la recolección osciló entre 90-96%, lo que demuestra un desempeño favorable del sistema para la manipulación automatizada.

2.4.2 Transporte y manipulación de plántulas

Después de extraer las plántulas, lo siguiente es transportarlas y colocarlas al sistema de trasplante. Trabajos como el de Yao et al. (2024) abordan este sistema, quienes desarrollaron un prototipo para el trasplante automático de hortalizas, que incluye un sistema de transporte de plántulas mediante tubos guía para doble hilera, el cual conduce las plántulas al sistema de plantación. Los resultados mostraron una tasa de recolección exitosa del 95%, que, a medida que aumentaba la velocidad de la alimentación de las bandejas de plántulas, también aumentaron los errores de posicionamiento y el coeficiente de variación de las plántulas. Esto ocurre porque el sistema de plantación está estrechamente relacionado con el subsistema de recolección, y carece de un mecanismo de dosificación de plántulas para su posterior plantación.

Por otro lado, Jin et al. (2018) desarrollaron un dispositivo de transporte automático para plántulas de hortalizas mediante un sistema de circulación de vasos colgantes. El monitoreo se realiza mediante una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada) y control con un PCL (Controlador Lógico Programable). La imagen es procesada para determinar si hay pérdidas de plántulas.

También, Yang et al. (2021) desarrollaron un dispositivo para la alimentación de plántulas para una trasplantadora automática de hortalizas. Las copas para el transporte de las plántulas fueron diseñadas considerando sus parámetros físicos; estas se abren y cierran mediante un cable de freno de ciclo y un cilindro neumático. El dispositivo alimenta $60 \text{ plántulas} \cdot \text{min}^{-1}$ al trasplantador, con una frecuencia de pulso de 1500 Hz y una tasa de éxito de 95%.

Asimismo, Wen et al. (2021) trabajaron en un sistema de selección de plántulas para una trasplantadora automática. El trasplantador cuenta con un dispositivo transportador de plántulas que está compuesto por un motor paso a paso y una cinta transportadora. Esta cinta las coloca a un dispositivo de división de plántulas una por una a través de un embudo de lanzamiento de plántulas y ésta las coloca en el dispositivo de plantación de dos hileras.

2.4.3 Trasplante de plántulas

El sistema de trasplante de plántulas lo tienen los equipos semiautomáticos y automáticos. Este sistema tiene una gran importancia porque debe colocar las plántulas en el suelo sin dañarlas. Como en Sri et al. (2022), que analizaron la carga y seguridad del dispositivo de trasplante de una máquina automática para hortalizas. El dispositivo estudiado está compuesto por un mecanismo de enlace y una tolva. El mecanismo de enlace consta de 10 eslabones y 13 juntas giratorias. La tolva de trasplante tiene una forma de cono invertido que abre y cierra mediante dos resortes conectados al mecanismo de enlace del dispositivo de plantación. Los resultados mostraron que el dispositivo de plantación tiene una vida útil mínima por fatiga de 1928 años si se considera un uso anual de 25.5 h.

En otro trabajo, Hwang et al. (2020) optimizaron las longitudes de los eslabones principales mediante un algoritmo genético de un dispositivo de trasplante que componen una máquina trasplantadora semiautomática para hortalizas. El dispositivo está compuesto por una leva, 13 eslabones, un rodamiento, una tolva de trasplante y elementos de conexión. La potencia del motor se transmite a la manivela para accionar el dispositivo.

Por otro lado, Shi et al. (2024) diseñaron y evaluaron un mecanismo de siembra para una trasplantadora automática de hortalizas plantadas con múltiples hileras en densidades altas. El mecanismo de siembra diseñado se compone de un efector final con forma de pico de pato que es accionado por un motor y un cilindro. El dispositivo de siembra tiene una tasa de calificación de siembra de 96.62%, un coeficiente de variación del espaciamiento de siembra del 3.55% y un rendimiento operativo en siembra de 7135 plántulas $\cdot$ h⁻¹.

2.5 Parámetros de diseño para trasplantadoras automáticas

El diseño de máquinas y dispositivos para el trasplante de plántulas de hortalizas requieren de parámetros de las características de la plántula a manipular. El propósito es conocer la interacción plántula-máquina a diseñar para diferentes

entornos agrícolas (principalmente, invernadero y campo abierto) definiendo sus criterios de dimensionamiento y funcionamiento con el fin de eliminar los daños mecánicos de las mismas (W. Liu et al., 2023; Wang et al., 2025; Zhou et al., 2024). Por lo que, es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones que influyen en el diseño y desarrollo de los sistemas de una máquina de trasplante automático, estas se clasifican en socioeconómicas, técnicas y agronómicas. Aunque autores como Ranji et al. (2022) incorporan el criterio ambiental en el diseño de maquinaria, el presente trabajo se delimitará estrictamente a los criterios socioeconómicos, técnicos y agronómicos.

2.5.1 Consideraciones socioeconómicas

El diseño y desarrollo de una maquina agrícola no debe limitarse exclusivamente a los aspectos técnicos y funcionales, sino que también debe considerar los factores socioeconómicos que pueden influir en su adopción, operación y sostenibilidad. Entre los principales aspectos a evaluar se presentan en la Figura 6.

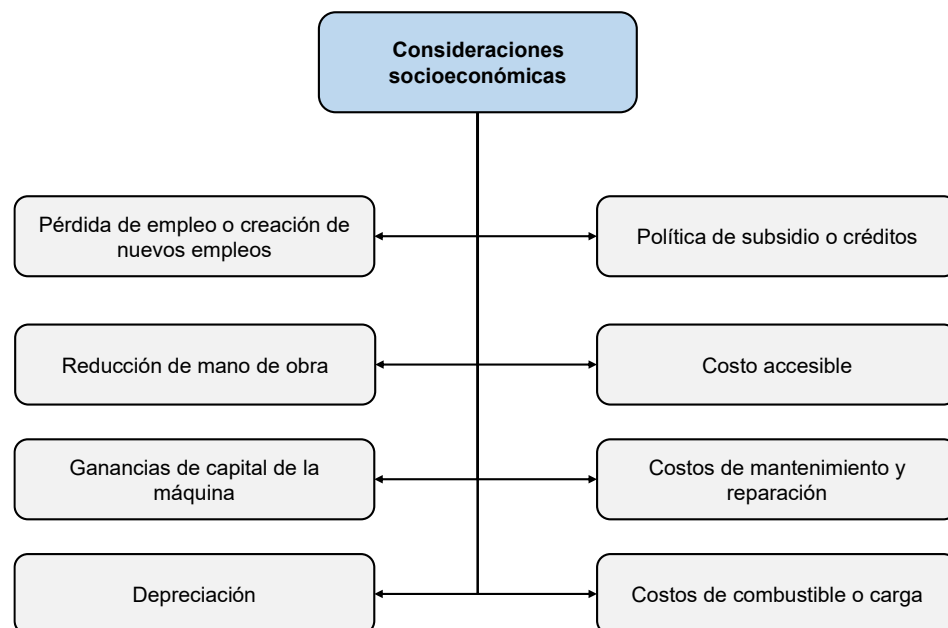


Figura 6. Consideraciones socioeconómicas para el desarrollo de un equipo de trasplante automático.

2.5.2 Consideraciones técnicas

Al desarrollar un prototipo de trasplante automático y sus tres sistemas que lo componen, es necesario identificar qué aspectos técnicos son importantes que sean atractivos y sobresalga con respecto a otros equipos existentes. En la Figura 7 se detallan las consideraciones técnicas que rigen el funcionamiento del equipo.

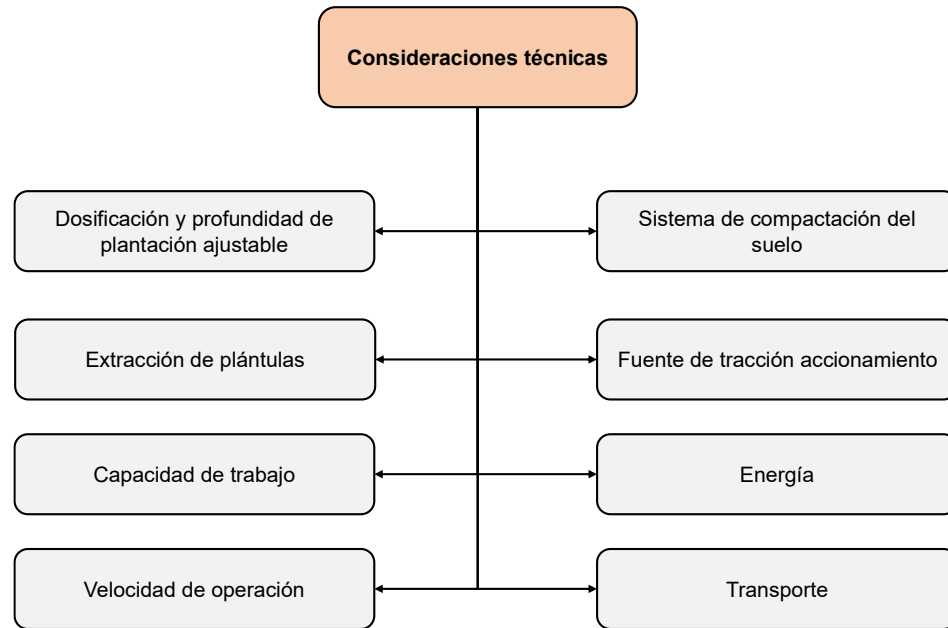


Figura 7. Consideraciones técnicas necesarias al desarrollar un prototipo de trasplante automático.

2.5.3 Consideraciones agronómicas

Además de los factores técnicos, se deben evaluar las condiciones agronómicas que definen el manejo del cultivo. Estas incluyen el tipo de plántula, el entorno de producción (invernadero o campo abierto) y el uso o ausencia de acolchado plástico, entre otras variables. Por su parte, la Figura 8 detalla los requerimientos generales para un equipo de trasplante automático junto con sus tres sistemas principales.

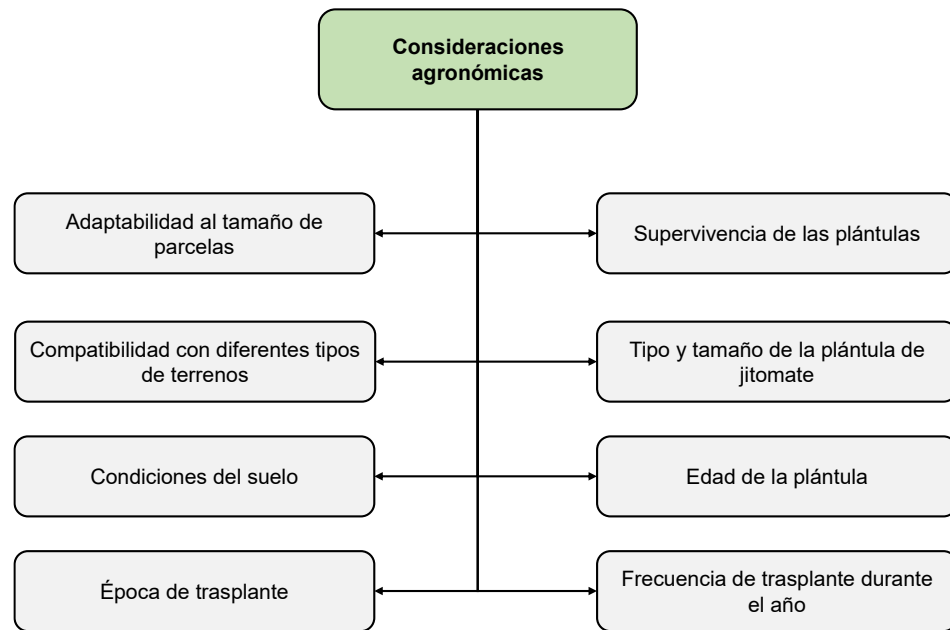


Figura 8. Consideraciones agronómicas sobresalientes para el desarrollo de trasplantadoras automáticas.

Las variables mencionadas involucran los tres sistemas mencionados anteriormente, estos son primordiales para que se lleve a cabo con éxito el trasplante automático. Sin embargo, existen variables intrínsecas que se deben tomar en cuenta y deben ser estudiadas, estas son denominadas propiedades físico-mecánicas de las plántulas de hortalizas que se van a trasplantar. Estas variables se profundizan a continuación, y en los tres próximos capítulos para el caso del jitomate.

2.6 Propiedades físico-mecánicas de las plántulas

Para la automatización de los diferentes sistemas que componen el trasplante, se requieren conocer las propiedades físico-mecánicas de las plántulas de jitomate. En el Cuadro 1, se enlistan algunas de las propiedades tomadas en cuenta para diferentes tipos de plántulas de hortalizas con cepellón y sin cepellón para el diseño y desarrollo de dispositivos y máquinas para el trasplante automático.

Cuadro 1. Propiedades físico-mecánicas de las plántulas en diferentes tipos de hortalizas de investigaciones realizadas.

Hortaliza	Propiedades físicas	Propiedades mecánicas	Autores
Cebolla	Edad, peso, diámetro del bulbo, diámetro del tallo, altura y contenido de humedad.	Prueba de compresión y coeficiente de fricción de estático	(Pandirwar et al., 2015)
Chile y jitomate	Edad, masa, diámetro del tallo, altura total, dosel, contenido de humedad.	Prueba de impacto, prueba de compresión de tallos y cepellón, y coeficiente de fricción estático.	(Khadatkar et al., 2020)
Jitomate	Edad, altura, masa, diámetro del tallo y diámetro de extensión.	Prueba de impacto, prueba de tensión y compresión del tallo, y ángulo y coeficiente de fricción estático.	(Abubakar et al., 2020)
Chile	Edad, diámetro promedio del tallo, altura, peso y número de hojas.	No se reportan	(Khadatkar et al., 2021)
Pimiento	Edad, altura, diámetro de la raíz y número de hojas.	No se reportan	(Han et al., 2021)

Cuadro 1. Continuación ...

Hortaliza	Propiedades físicas	Propiedades mecánicas	Autores
Col	Edad, altura y dimensiones del sustrato.	Resistencia a fallas del sustrato.	(Cui et al., 2021)
Calabaza, pimiento y jitomate	Edad, diámetro del tallo, contenido de humedad, y número de hojas.	Resistencia a la presión/N.	(Shao et al., 2021)
Jitomate	Altura y diámetro del tallo.	No se reportan	(Pérez-Ruiz & Slaughter, 2021)
Chile	Edad, altura y dosel.	No se reportan	(Chethan et al., 2022)
Pimiento morrón	Edad, altura de plántula y cepellón, diámetro del tallo, número de hojas, propagación de hojas/milímetro y masa.	Prueba de flexión, tracción y compresión del tallo y fuerza de sujeción del tallo hasta el arranque de charola	(Shuangyan et al., 2022)
Chile	Edad, altura, peso, diámetro del tallo y número de hojas.	Presión de rotura, fuerza de compresión y fuerza de rotura.	(Khadatkar et al., 2023)

Cuadro 1. Continuación ...

Hortaliza	Propiedades físicas	Propiedades mecánicas	Autores
Jitomate, berenjena y repollo	Edad, contenido de humedad, número de hojas, altura, diámetro del tallo, masa, densidad del cepellón y dosel.	Coeficiente de fricción, prueba de compresión del tallo y cepellón, y fuerza de penetración del cepellón	(Magar et al., 2023)
Jitomate, pepino y pimiento	Edad, altura, número de hojas, longitud y ancho de las hojas	Fuerza de extracción y fuerza de agarre	(L. Han et al., 2023)
Arroz	Edad, altura, diámetro de eje corto y diámetro de eje longitudinal	Prueba de flexión de tres puntos, carga de impacto en la separación de plántulas	(Xi et al., 2026)
Brócoli (tallos)	Edad, contenido de humedad y diámetro	Ensayo de compresión y cizallamiento, coeficiente de fricción estática, coeficiente de fricción de rodadura, coeficiente de restitución (prueba de colisión) y ángulo de reposo	(Qin et al., 2026)

Cuadro 1. Continuación ...

Hortaliza	Propiedades físicas	Propiedades mecánicas	Autores
Col china (<i>Bok Choy</i> de Shanghai)	Altura total, extensión foliar, masa, densidad, dimensiones del cepellón, altura del tallo, diámetro del vástago y dimensiones generales de las hojas y pecíolos.	Prueba de compresión de los cepellones, ensayo de tracción de hojas, prueba de compresión de cilindros de hojas, ensayo de flexión de tres puntos del pecíolo y vástago, coeficiente de fricción estática y dinámica y coeficiente de restitución por colisión.	(Shi et al., 2026)

La Figura 9 muestra las dimensiones morfológicas de una plántula de jitomate tomadas en cuenta a lo largo de esta investigación. Asimismo, algunas características físicas fueron retomadas de Paneque et al., (2017), como son el centro de masa, distancia “ d_e ” (dimensión que existe entre la base inferior del cepellón [b_{mi}] y el centro de masa), distancia “ d_p ” (dimensión que existe entre la b_{mi} y el punto de giro al realizar la prueba del periodo “T”). La prueba se realiza utilizando un péndulo simple, la muestra se sostiene de una hoja con un hilo delgado para disminuir al mínimo el peso, procurando que la h_t de la plántula esté a la misma altura que el punto de giro del péndulo, posteriormente, las plántulas se colocan a una inclinación de $\theta = 5^\circ$ (Muñoz et al., 2006).

Por otro lado, las propiedades mecánicas de las plántulas de jitomate se resumen en la Figura 10. Estas propiedades constituyen parámetros fundamentales para el diseño y desarrollo de los diferentes sistemas que integran una trasplantadora automática, particularmente aquellos relacionados con la sujeción, manipulación y colocación de plántulas.

En este contexto, se establece una estrecha relación entre las propiedades físicas y mecánicas de las plántulas y los requerimientos de diseño de los sistemas de una trasplantadora automática. Por lo tanto, la caracterización de estas propiedades resulta indispensable para definir condiciones adecuadas de manipulación y operación, así como para minimizar los esfuerzos mecánicos y, en consecuencia, reducir el riesgo de daño estructural durante las etapas de extracción, transporte y trasplante automatizado de plántulas.

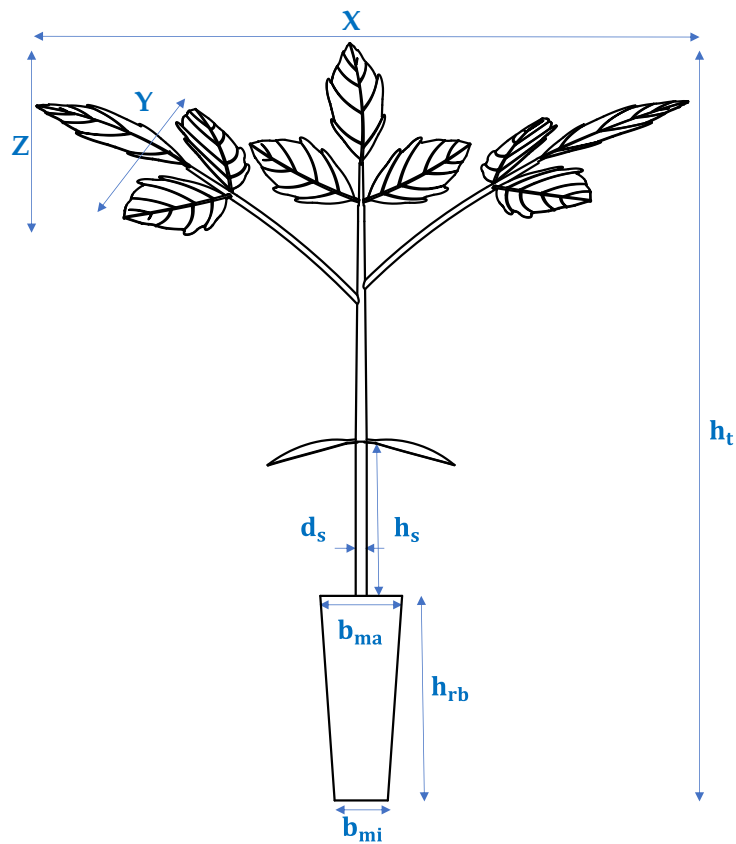


Figura 9. Diagrama esquemático de dimensiones morfológicas de una plántula de jitomate.

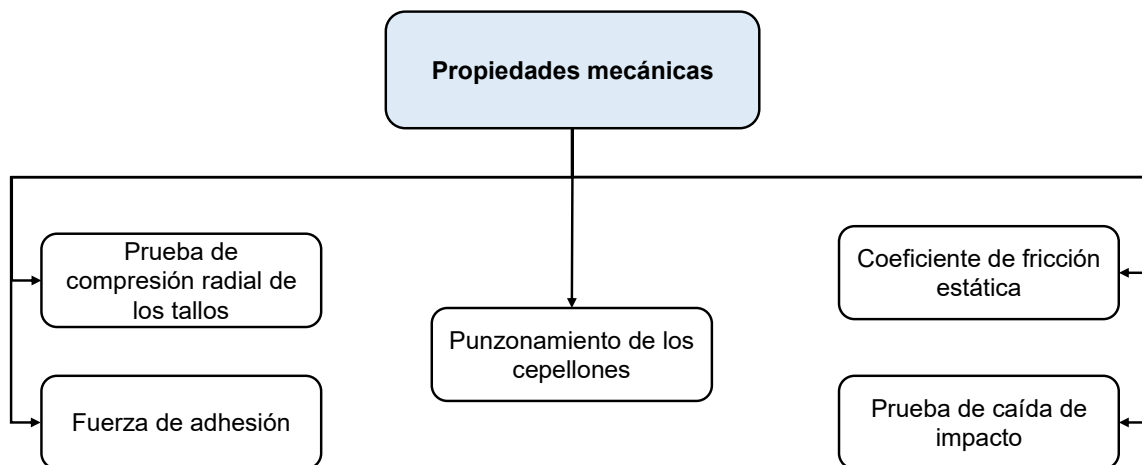


Figura 10. Propiedades mecánicas para diseño de máquinas trasplantadoras.

2.7 Importancia de las trasplantadoras automáticas en México

A pesar de que, en 2022, México fue el mayor exportador de hortalizas, plantas, raíces y tubérculos alimenticios con un valor de 9,692 millones de dólares (Secretaría de Economía, 2025). En el contexto nacional, la documentación científica y tecnológica indexada sobre el diseño de sistemas de trasplante automatizado específicos para variedades de jitomate cultivadas en el centro de México es limitada, sin embargo, se identificaron principalmente los trabajos de Gutiérrez, Serwatowski, Saldaña, et al. (2009) y Gutiérrez, Serwatowski, Gracia, et al., (2009), quienes estudiaron el trasplante mecanizado de estolones de fresas, aun cuando es un fruto agregado, esta comparte principios técnicos para su trasplante con las hortalizas (Lira y Ruiz, 2023). No obstante, en el ámbito de las hortalizas, la literatura científica sobre trasplante mecanizado continúa siendo limitada. Entre los estudios disponibles destaca el trabajo de Muñoz et al. (2006), que evaluaron el trasplante mecanizado de diferentes especies hortícolas, entre ellas brócoli, lechuga, chile, col morada, tomate de cáscara y coliflor. Estos antecedentes evidencian avances en la mecanización del trasplante de diversas hortalizas; sin embargo, para el caso del jitomate es limitada debido a las diferencias en las características físicas y mecánicas de las plántulas entre especies y sistemas de producción con variedades cultivadas en la región centro de México. Esta limitación resulta relevante debido a la importancia económica

del cultivo en el país, cuya producción representa el 23.2 % de la producción nacional de hortalizas (DGSIAP, 2025). En consecuencia, se identifica una brecha de conocimiento relacionada con la caracterización de las plántulas de jitomate y su integración en el diseño de sistemas de trasplante automatizado ya que por qué las propiedades físico-mecánicas de las plántulas evaluadas por los autores del Cuadro 1 no son extrapolables a las condiciones de sustrato y cultivares producidos en el país. Abordar esta brecha representa una oportunidad para generar conocimiento científico y contribuir al desarrollo de tecnologías de trasplante automático más eficientes, precisas y sostenibles, particularmente adaptadas a las condiciones de producción de la región centro de México.

2.8 Referencias

- Abubakar, A. J., Iya, S. A., Aliyu, B., & Tashiwa, Y. I. (2020). Determination of physico-mechanical properties of tomato seedlings for design of a tomato transplanter. *Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)*, 25(1), 106–122.
- Agustín-Oropeza, F., Torres-Beltran, A., Mendoza-Pérez, C., & Bernal-Alzate, J. C. (2025). Efecto de la edad de trasplante en el rendimiento de jitomate riñón silvestre. *Ciencia e Innovación Agroalimentaria de La Universidad de Guanajuato*, 6(Num. esp (2025)), 208–217. <https://doi.org/10.15174/cia.v6i6.137>
- Amundson, S., Deyton, D. E., Kopsell, D. A., Hitch, W., Moore, A., & Sams, C. E. (2012). Optimizing plant density and production systems to maximize yield of greenhouse-grown “Trust” tomatoes. *HortTechnology*, 22(1), 44–48. <https://doi.org/10.21273/horttech.22.1.44>
- Baudoin, W. (2002). El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo; Estudios, FAO. In *Serie Producción y Protección Vegetales*.
- Cheng, B., Wu, H., Zhu, H., Liang, J., Miao, Y., Cui, Y., & Song, W. (2024). Current Status and Analysis of Key Technologies in Automatic Transplanters for Vegetables in China. *Agriculture (Switzerland)*, 14(12), 2168. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>
- Chethan, S., Srinivasa, K., Madivalkar, J., Mahaboob, N., & Yathisha, N. (2022). Development of Economical Plant Transplanter. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 103(3), 339–345. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00802-8>
- Cih-Dzul, I. R., Jaramillo-Villanueva, J. L., Tornero-Campante, M. A., & Schwentesius-Rindermann, R. (2011). Caracterización de los sistemas de producción de tomate (*lycopersicum esculentum* mill.) en el estado de jalisco, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 501–512.

- Collins, E. J., Bowyer, C., Tsouza, A., & Chopra, M. (2022). Tomatoes : An Extensive Review of the Associated Health Their Cultivation. *Biology*, 11(2), 239. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Cui, Z., Guan, C., Xu, T., Fu, J., & Chen, Y. (2021). Design and Experiment of Transplanting Machine For Cabbage Substrate Block Seedlings. *INMATEH –Agricultural Engineering*, 64(2), 375–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.35633/inmateh-64-37>
- DGSIAP. (2025). *PANORAMA AGROALIMENTARIO 2025-Fortaleciendo la estadística agroalimentaria desde la raíz*. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Du, X., Yun, Z., Jin, X., Li, P., & Gao, K. (2023). Design and Experiment of Automatic Adjustable Transplanting End-Effector Based on Double-Cam. *Agriculture (Switzerland)*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture13050987>
- FAO. (2013). *EL cultivo de tomate con buenas prácticas agrícolas en la agricultura urbana y periurbana* (1st ed.). <http://www.fao.org/documents/card/en/c/21f8b940-15ed-5b99-a736-69611d777cef>
- FAO. (2023). *Crops and livestock products*. www.fao.org/faostat/
- FIRA. (2019). Tomate 2019. In *FIRA-Panorama Agroalimentario*. <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2022/11/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf>
- González, E., & Torres, C. I. (2014). La sustentabilidad agrícola de las chinampas en el valle de México: caso Xochimilco. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 34, 18. [file:///F:/Spec 2/Traffic Delay Model.pdf](file:///F:/Spec%20Traffic%20Delay%20Model.pdf)
- Gutiérrez, C., Serwatowski, R., Gracia, C., Cabrera, J. M., & Saldaña, N. (2009). *Design , building and testing of a transplanting mechanism for strawberry plants of bare root on mulched soil*. 7(4), 791–799.

- Gutiérrez, C., Serwatowski, R., Saldaña, N., Cabrera, J. M., Zavala, A., Saldaña, A., & Juárez, A. (2009). Desarrollo de una tecnología para trasplante mecanizado de la fresa (fragaria vesca). *Acta Universitaria*, 19(3), 9–16.
- Han, C., Hu, X., Zhang, J., You, J., & Li, H. (2021). Design and testing of the mechanical picking function of a high-speed seedling auto-transplanter. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 64–71.
- Han, L., Kumi, F., Mao, H., Hu, J., & Nether-, T. (2019). Design and tests of multi-pin flexible seedling pick-up gripper for automatic transplanting. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(6), 949–957. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/aea.13426> 949
- Han, L., Xiang, D., Xu, Q., Du, X., Ma, G., & Mao, H. (2023). Development of simplified seedling transplanting device for supporting efficient production of vegetable raw materials. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18), 10022. <https://doi.org/10.3390/app131810022>
- Hu, S., Hu, M., Yan, W., & Zhang, W. (2022). Design and Experiment of an Integrated Automatic Transplanting Mechanism for Picking and Planting Pepper Hole Tray Seedlings. *Agriculture*, 12, 557. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12040557>
- Hwang, S., Park, J., Lee, J., Shim, S., & Nam, J.-S. (2020). Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter. *Agronomy*, 10(12), 1938.
- Islam, M. N., Iqbal, M. Z., Ali, M., Chowdhury, M., Kabir, M. S. N., Park, T., Kim, Y. J., & Chung, S. O. (2020). Kinematic analysis of a clamp-type picking device for an automatic pepper transplanter. *Agriculture (Switzerland)*, 10(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120627>
- Javanmardi, J., & Moradiani, M. (2017). Tomato Transplant Production Method Affects Plant Development and Field Performance. *International Journal of Vegetable Science*, 23(1), 31–41.

<https://doi.org/10.1080/19315260.2016.1169240>

- Ji, J., Sun, J., Jin, X., Li, M., & Du, X. (2019). Development of a PVDF sensor for potted seedling clamping force of vegetable transplanting. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(5), 111–118. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.5094>
- Jin, X., Li, M., Li, D., Ji, J., Pang, J., Wang, J., & Peng, L. (2018). Development of automatic conveying system for vegetable seedlings. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1), 178. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1200-8>
- Khadatkar, A., Gaikwad, B., & Pandirwar, A. (2020). Biometric Properties of Plug Vegetable Seedlings Relevant to the Design of Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering*, 57(1), 16–24.
- Khadatkar, A., Mathur, S. M., Dubey, K., & Bhusanababu, V. (2021). Development of embedded automatic transplanting system in seedling transplanters for precision agriculture. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.08.001>
- Khadatkar, A., Pandirwar, A. P., & Paradkar, V. (2023). Design , development and application of a compact robotic transplanter with automatic seedling picking mechanism for plug - type seedlings. *Scientific Reports*, 13(1), 1883–1895. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28760-4>
- Lazcano-Bello, M. I., Sandoval-Castro, E., Tornero-Campante, M. A., Hernández-Hernández, B. N., Ocampo-Fletes, I., & Díaz-Ruíz, R. (2021). Evaluation of substrates, nutrient solution and rooting agent in tomato seedling production. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 12(1), 61–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450>
- Lira, R., & Ruiz, M. (2023). Producción de plantas de fresa con calidad genética, fisiológica y fitosanitaria. In *SADER-INIFAP-CIRPAC* (Vol. 37). INIFAP.
- Liu, W., Tian, S., & Wang, Q. (2023). Key Technologies of Plug Tray Seedling

- Transplanters in Protected Agriculture : A Review. *Agriculture*, 13, 1488–1507. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture13081488>
- Liu, Z., Shi, L., Liu, Z., Xing, J., Hu, C., Wang, X., & Wang, L. (2024). Design and Testing of a Seedling Pick-Up Device for a Facility Tomato Automatic Transplanting Machine. *Sensors*, 24(20), 6700. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24206700>
- Long, J. (1995). De Tomates Y Jitomates En El Siglo XVI. *Estudios de Cultura Náhuatl*, 239–252.
- Ma, G., Chen, X., Liu, Y., Han, L., Mao, H., & Hu, J. (2023). Airflow ejection-wrapped clamping type seedling picking method and parameter optimization. *Frontiers in Plant Science*, 13(January), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1084563>
- Ma, G., Mao, H., Han, L., Liu, Y., & Gao, F. (2020). Reciprocating mechanism for whole row automatic seedling picking and dropping on a transplanter. *Applied Engineering in Agriculture*, 36(5), 751–766. <https://doi.org/10.13031/AEA.13622>
- Magar, A. P., Nalawade, S. M., Walunj, A. A., Khadatkhar, A., Bhangare, S. C., Bhalekar, M. N., Nimbalkar, C. A., & Gaikwad, B. B. (2023). Engineering Properties of Some Plug-type Vegetable Seedlings for Development of Automatic Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 60(1), 1–13. <https://doi.org/10.52151/jae2023601.1792>
- Muñoz, F., Gaytán, J. G., Serwatowsky, R., & Gracia, C. (2006). Trasplante mecanizado de hortalizas Mechanized transplant of vegetables. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(1), 5–11.
- Nage, S. M., Mathur, S. M., & Meena, S. S. (2023). Vegetable Transplanters for India: A Review. *Agricultural Science Digest*, 43(2), 129–134. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5548.Submitted>
- Naika, S., De Jeude, J. van L., De Goffau, M., Hilmi, M., & van Dam, B. (2005).

Cultivation of tomato: production, processing and marketing (B. van Dam (ed.); Fourth, Issue 17). Agromisa Foundation and CTA. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/dafbb718-8923-43d5-a76e-d7037f86d531/content>

Pandirwar, A., Kumar, A., Mani, I., & Islam, S. (2015). Biometric properties of onion seedlings relevant to the development of onion seedling transplanter. *Journal of Applied and Natural Science*, 7(2), 768–773.

Paneque, P. P., López, G., Mayans, P. R., Muñoz, F., & Gaytán, J. G. (2017). *Fundamentos Teóricos y Análisis de Máquinas Agrícolas* (1ra.).

Pavani, K., Jena, C., Divya vani, V., & Mallikarjunarao, K. (2020). Cultivation Technology of Tomato in Greenhouse. *Protected Cultivation and Smart Agriculture, December*, 121–129. <https://doi.org/10.30954/ndp-pcsa.2020.12>

Peng, Z., Yang, F., Li, Y., Li, X., Li, B., & Xu, G. (2025). Design and Testing of a Whole-Row Top-Loosening Stem-Clamping Seedling Extraction Device for Hole Tray Seedlings. *Agriculture (Switzerland)*, 15(2), 165. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020165>

Pérez-Ruiz, M., & Slaughter, D. C. (2021). Development of a precision 3-row synchronised transplanter. *Biosystems Engineering*, 206, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.014>

Porcuna, J. L., Baixauli, C., Aguilar, J. M., Ignacio Marsal, J., del Carmen Rubio, M., Sarrio, J. Y., & Vegetal Generalitat Valenciana, S. (2012). El tomate, planteamiento sanitario de un cultivo muy vulnerable para el residuo cero. *Vida Rural*, 342(4), 52–57.

PROFECO. (2020). *Jitomate, versátil y nutritivo*. <https://www.gob.mx/profeco/articulos/jitomate-versatil-y-nutritivo?state=published>

Qin, L., Gong, Y., Zhang, K., Zhang, H., & Wang, D. (2026). Calibration of physical and mechanical property parameters of broccoli seedling stalks. *Scientific*

- Reports*, 16(8008), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39286-w>
- Ranji, A., Gholami, M., & Mohammad, D. (2022). Evaluation of agronomic , technical , economic , and environmental issues by analytic hierarchy process for rice weeding machine. *Energy Reports*, 8, 774–783. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.028>
- Saavedra, T. M., Figueroa, G. A., & Cauhi, J. G. D. (2017). Origen e evolução da produção de tomate *Lycopersicon esculentum* no México. *Ciencia Rural*, 47(3). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160526>
- SADER. (2022). *El jitomate, hortaliza mexicana de importancia mundial*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>
- SAGARPA. (2017). Planeación agrícola nacional (2017-2030) - Jitomate mexicano. In *Planeación agrícola nacional 2017-2030*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>
- Secretaría de Economía. (2025). *Hortalizas, plantas, raíces y tubérculos alimenticios*. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/vegetables-roots-and-tubers?timeNetTradeSelector=Year&sourceTradeBalance=inegiOption>
- Shao, Y., Han, X., Xuan, G., Liu, Y., Gao, C., Wang, G., & Hu, Z. (2021). Development of a multi-adaptive feeding device for automated plug seedling transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(2), 91–96. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211402.6003>
- Sharma, A., & Khar, S. (2024). Design and development of a vegetable plug seedling transplanting mechanism for a semi-automatic transplanter. *Scientia Horticulturae*, 326(September 2023), 112773. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112773>

- Shi, J., Hu, J., Li, J., Liu, W., Yue, R., Zhang, T., & Yao, M. (2024). Design and Experiment of Planting Mechanism of Automatic Transplanter for Densely Planted Vegetables. *Agriculture (Switzerland)*, 14(8), 1357. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081357>
- Shi, J., Hu, J., Liu, W., Chen, J., Wang, C., & Yao, M. (2026). Establishment and Parameter Calibration of a Discrete Element Model for Shanghai Bok Choy Plug Seedling. *Plants*, 15(12), 1–46. <https://doi.org/10.3390/plants15121882>
- Shuangyan, H., Minjuan, H., & Wenyi, Z. (2022). Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(3). <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2022.03.002>
- SIAP. (2024a). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Cierre de La Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- SIAP. (2024b). *Panorama Agroalimentario 2018-2024*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Sivakumar, S., & Durairaj, C. D. (2014). Development of A Seedling Ejection Mechanism for Pro - tray Seedling. *Trends in Biosciences*, 7(4), 621–624.
- Sri, M., Hwang, S. J., & Nam, J. S. (2022). Experimental Safety Analysis for Transplanting Device of the 4-Bar Link Type Semi-Automatic Vegetable Transplanter. *Agronomy*, 12(8), 1890. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081890>
- Tiwari, J. K., Behera, T. K., Rai, N., Yerasu, S. R., Singh, M. K., & Singh, P. M. (2022). Tomato breeding for processing in India: Current status and prospects. *Vegetable Science*, 49(02), 123–132. <https://doi.org/10.61180/vegsci.2022.v49.i2.01>
- Vázquez-Casarrubias, G., Alberto Escalante-Estrada, J. S., Teresa Rodríguez-González, M., Ramírez-Ayala, C., & Enrique Escalante-Estrada, L. (2011).

Edad al trasplante y su efecto en el crecimiento y rendimiento de chile apaxtleco. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 61–65.

- Wang, X., Tian, W., Qin, X., Liu, X., Feng, H., & Sun, G. (2025). Plant Type Suitable for Mechanized Transplanting of Broccoli in Ningxia. *Agronomy*, 15(12), 1–25. <https://doi.org/doi.org/10.3390/agronomy15122791>
- Wen, Y., Zhang, L., Huang, X., Yuan, T., Zhang, J., Tan, Y., & Feng, Z. (2021). Design of and experiment with seedling selection system for automatic Transplanter for vegetable plug seedlings. *Agronomy*, 11(10), 2031. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102031>
- Xi, D., Que, J., Shen, R., Kuang, F., Xiong, W., & Zhang, S. (2026). Quantitative assessment and predictive modelling of stem damage during seedling separation in mechanical rice transplanting. *Biosystems Engineering*, 263(December 2025). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104377>
- Yang, Q., Ahmad, I., Faheem, M., Siddique, B., Xu, H., & Addy, M. (2021). Development and assessment of belt-drive seedlings transmission device for fully-automatic vegetable transplanter. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105958>
- Yao, M., Lv, J., Wang, L., Yue, R., & Hu, J. (2024). Cooperative operation method of seedling conveying and picking by full-automatic transplanter based on multi-sensor combination. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225(August), 109311. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109311>
- Yue, R., Hu, J., Liu, Y., Yao, M., Zhang, T., & Shi, J. (2022). Design and Working Parameter Optimization of Pneumatic Reciprocating Seedling-Picking Device of Automatic Transplanter. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12), 1989. <https://doi.org/10.3390/agriculture12121989>
- Zhou, B., Miao, H., Guan, C., Ji, X., & Wang, X. (2024). Design and Test of Seedling-Picking Mechanism of Fully Automatic Transplanting Machine.

Applied Sciences (Switzerland), 14(20), 9235.
<https://doi.org/10.3390/app14209235>

3. EVOLUTION AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF AUTOMATIC TRANSPLANTERS FOR VEGETABLES: A REVIEW

Este capítulo presenta un artículo de revisión sobre la evolución y el desarrollo tecnológico de los equipos y mecanismos empleados en el trasplante automatizado de hortalizas. Se examina su evolución desde los primeros desarrollos orientados a mecanizar esta labor agrícola hasta los sistemas automáticos disponibles en la actualidad, destacando los principales avances tecnológicos que han contribuido a mejorar su diseño, funcionamiento, precisión y nivel de automatización. Asimismo, se describen las principales características, funciones y principios de operación de los sistemas que integran una trasplantadora automática, con especial atención a los mecanismos responsables de la alimentación, extracción, dosificación, conducción y establecimiento de las plántulas en el suelo. De manera complementaria, se analizan las propiedades físicas y mecánicas de las plántulas que deben considerarse durante el diseño y desarrollo de estos equipos, debido a su influencia en la manipulación, integridad y establecimiento adecuado del material vegetal durante el proceso de trasplante.

Este artículo se publicó en la revista *INMATEH - Agricultural Engineering* bajo la modalidad de acceso abierto (Open Access).

Forma de citar este artículo (APA 7° edición):

Grande, G., Hidalgo-Reyes, M., Cruz, P., & Velázquez, N. (2024). Evolution and technological development of automatic transplanters for vegetables: A review. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 72(1), 830–847. <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-74>

EVOLUTION AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF AUTOMATIC TRANSPLANTERS FOR VEGETABLES: A REVIEW / EVOLUCIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LAS TRASPLANTADORAS AUTOMÁTICAS PARA HORTALIZAS: UNA REVISIÓN

(Gaudencio GRANDE¹⁾; Martín HIDALGO-REYES^{*2)}; Pedro CRUZ²⁾; Noe VELÁZQUEZ³⁾ ¹)

¹⁾ Graduate Program of Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Universidad Autonoma Chapingo / Mexico;

^{*2)} Agricultural Mechanical Engineering Department, Universidad Autonoma Chapingo / Mexico;

³⁾ Irrigation Department, Universidad Autonoma Chapingo / Mexico;

Tel: +525951104405; E-mail: mhidalgor@

DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-74>

Keywords: automation, physical-mechanical properties, transplanting, transplant system, transplanting machine

ABSTRACT

The main purpose of technological progress is to enhance the quality of human life. In agriculture, there has been a trend towards automating all stages of production processes. Transplanting seedlings is no exception, as it involves a repetitive and laborious process that demands significant time, depending on the extension to be transplanted. The objective of this review article was to analyze the evolution and technological development of automated transplanter prototypes by bibliometric analysis and a detailed review. Results show that the technological progress in this equipment is based on two main characteristics: (1) physical-mechanical properties of seedlings, which play a crucial role in component design, and (2) control and automation development. This means that we can currently obtain efficiencies of over 90% and an error rate of less than 7.6% for automated transplanter.

RESUMEN

El avance tecnológico ha tenido como propósito principal mejorar la calidad de vida del ser humano. En la agricultura se ha optado por automatizar todas las fases de los procesos de producción. El trasplante de plántulas no es la excepción, debido a que es un proceso repetitivo y cansado, que requiere amplios periodos de tiempo según la extensión a trasplantar. El objetivo de este artículo de revisión fue analizar la evolución y desarrollo tecnológico de los prototipos de trasplante automático de plántulas, mediante un análisis bibliométrico y una revisión detallada. Los resultados muestran que el avance tecnológico desarrollado en estos equipos se basa en dos características principales: (1) las propiedades físico-mecánicas de las plántulas, como características sobresalientes en el diseño de los componentes y, (2) el desarrollo del control y la automatización, con lo cual, actualmente se pueden obtener eficiencias superiores a 90% y una tasa de error inferior al 7.6% en el trasplante automático de plántulas.

INTRODUCTION

The evolution and technological advancement of automatic transplanters for vegetable crops mark a significant milestone in modern agriculture. These machine designs serve as transformative tools, revolutionizing traditional transplanting methods by enhancing efficiency, cutting labor costs, and refining precision in the transplanting process (Ahmed et al., 2024). In recent decades, there has been remarkable

¹ Gaudencio GRANDE, *Doctoral Stud.*; Martín HIDALGO-REYES, *Professor, Ph.D.*; Pedro CRUZ, *Professor, Ph.D.*; Noe VELÁZQUEZ, *Professor, Ph.D.*

progress in both the design and functionality of automatic transplanters, propelled by advancements in engineering, robotics, and precision agriculture (Bazargani & Deemyad, 2024).

Vegetables comprise a group of greens and fruits such as tomatoes and grown in open fields and greenhouses, playing a crucial role in human nutrition. They serve as antioxidants, anticancer agents, antidiabetics, and aids in reducing cardiovascular diseases (Dias, 2019; Radovich, 2018). The most economically important vegetables in the world are tomatoes, bell peppers, melons and zucchinis, eggplants, cucumbers, watermelons and strawberries (Baudoin, 2002).

Transplanting is one of the tasks that requires high labor and time costs. Hence, mechanizing this task is essential for efficient operations and increased production (Nage *et al.*, 2023). Currently, the most advanced transplanting machines include both semi-automated and automated models.

In contemporary agriculture, applications of robots and automated transplanters are being employed to enhance the quality and efficiency of this operation. These technologies are based on different principles, such as visual processing, aiming to reduce the damage rate to stems, leaves, and substrates (Jin *et al.*, 2021).

Automated transplanters are commonly structured with three systems: supply, manipulation, and transplant (Jin *et al.*, 2018). However, the types vary based on the working environment. Some are stationary, like the one developed by Han *et al.* (2018) for potted seedlings in a greenhouse, while others are autonomous machines designed for transplanting in elevated greenhouse cultivation (Liu *et al.*, 2019). There are also autonomous machines specifically used for transplanting in open fields (Han *et al.*, 2019).

Furthermore, various review studies have delved into the advancement and progression of automatic vegetable transplanters. Syed *et al.* (2019) primarily delved into artificial vision technology's application in automatic transplantation, aiming to enhance time efficiency, quality, and overall effectiveness. Rasool *et al.* (2020) dissected the diverse mechanisms encompassing clamps, manipulators, and end effectors of mobile, semi-automatic, and automatic transplanters, focusing specifically on onion transplantation automation. Similarly, Habineza *et al.* (2023) undertook a comparable analysis, albeit for seedlings in a broader context. Sharma & Khar, (2022) conducted a comprehensive examination encompassing manual, mechanical, and automatic vegetable transplanters.

Moreover, several research endeavors have explored technology and robotics' integration in transplantation methodologies, emphasizing the significance of substrates, end effectors, vision systems, and route planning (Liu *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2023).

Researchers worldwide, including those mentioned above, publish their findings in various journals, which are indexed in different databases like Scopus and Web of Science (S&WoS). Consequently, research into automated vegetable transplanters follows this trend, being no exception. The process of searching for information in these databases relies on the use of keywords. The system then displays the located documents, which are subsequently filtered by adding more specific words. In this context, bibliometric analysis serves as a tool to condense and synthesize information. It facilitates the examination of key variables, including development trends over the years, emerging areas, and collaborations among authors from different countries (Chen *et al.*, 2021; Donthu *et al.*, 2021).

The S&WoS platforms are not designed for conducting bibliometric analyses. Therefore, extracting bibliometric information from these databases can pose a disadvantage as they may contain adverse conditions such as data duplication, and they do not analyze specific data from the study conducted in each research (Donthu *et al.*, 2021), therefore, it is necessary to complement the information with an additional review of articles obtained from other databases. In other words, a comprehensive analysis of the information is required, evaluating, discussing, and interpreting advancements and areas of opportunity related to prototypes developed for automated vegetable transplanting.

Finally, the development and evolution of automatic transplanting equipment for vegetables have proven to be highly advantageous for modern agriculture. These advancements offer a range of significant benefits, including increased efficiency and reduced labor costs, enhanced precision in seedling transplantation, minimized risk of plant damage, adaptability to diverse crops, resource optimization, and improved working conditions in the field. Clearly, these technological strides are driving a more productive,

sustainable, and profitable agricultural sector, poised to revolutionize the industry and bolster global food security. However, despite the notable progress in this research domain, there remain areas necessitating further analysis. Hence, the primary objective of this study is to analyze the evolution, technological development, and engineering characteristics of prototypes for automated vegetable transplanting over the years. The analysis of this research was carried out using two tools: bibliometric analysis and a detailed review.

MATERIALS AND METHODS

Search method

The search for original documents was performed using two databases (S&WoS), in June 2023. The search was restricted to “article title, abstract, keyword” to exclude information unrelated to the topic.

For Scopus, the search equation used was TITLE-ABS-KEY (transplanting OR development AND transplanter OR design AND transplanter AND seedlings, AND automatic AND transplanter) AND (EXCLUDE(DOCTYPE, "re")) AND (EXCLUDE (DOCTYPE, "cr")) AND (EXCLUDE (DOCTYPE, "bk")), aiming to exclude books, review articles, and conference reviews. Meanwhile, for Web of Science, the search equation used was Topic (transplanting OR development AND transplanter OR design AND transplanter AND seedlings, AND automatic AND transplanter) AND (Agricultural Engineering). Additionally, a filter was applied to exclude articles unrelated to the topic and review articles.

Bibliometric analysis

The data obtained from S&WoS was in Bibtex format with complete records and cited references. Subsequently, in the RStudio software version 2022.07.2, the two databases were merged, and information from 12 duplicate records was removed. An Excel® file was generated with a total of 243 records. Bibliometric analysis was conducted using the Biblioshiny tool in the RStudio Bibliometrix software (Aria & Cuccurullo, 2017). Fig. 1 shows the flowchart for data collection, analysis, and visualization.

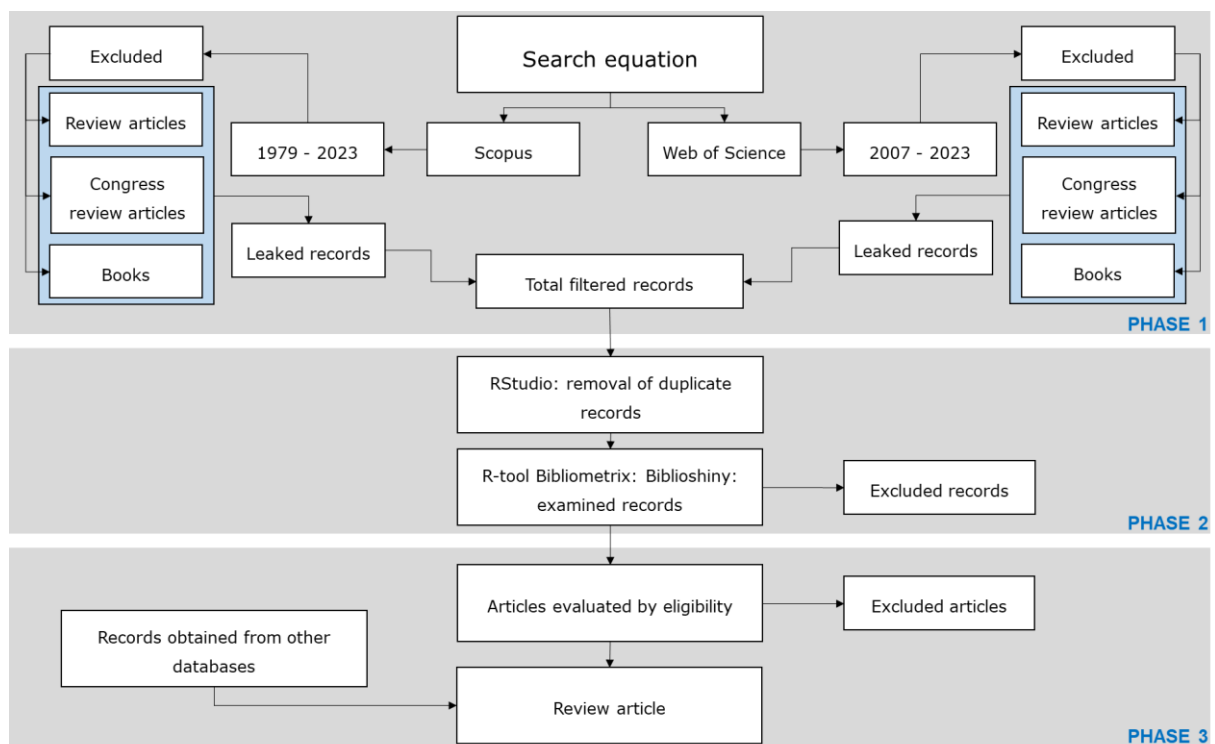


Fig. 1– Flowchart for data search and analysis

Detailed review

In the detailed review, articles obtained from the bibliometric analysis were examined. Additionally, we included documents from sources beyond those used in this study, as they were not found in the initial S&WoS search (Fig. 1). The specific review was carried out based on the following variables in the design of equipment for automated seedling transplanting: physical and mechanical properties of seedlings, functional systems of prototypes, general characteristics, technical parameters, mechanisms and algorithms, current situation in Mexico, manufacturing costs, and areas of opportunity.

RESULTS AND DISCUSSION

The records analyzed (Table 1) were published between 1979 and 2023. A total of 243 records were analyzed, comprising 220 scientific articles and 23 conference papers.

Table 1

General information of the analyzed articles

Description	Results
Documents	243
Annual growth rate (%)	5.81
Document average age	6.63
Average citations per document	10.6
References	5128
Keywords plus (ID)	1055
Author's Keywords	665
Authors	665
Authors of single-authored docs	10
Co-authors per document	4.69
International co-authorships (%)	3.292

Evolution of automated transplanting equipment

The first study related to automated transplanters was published in 1979, it refers to an automated feeder for transplanters developed by *Moden & Brewer, (1979)*. It wasn't until 1985 that the first automated transplanter for turf was recorded, achieving an efficiency of 97%. This prototype was developed by *Hauser, (1985)*.

The number of publications remained between zero and two articles per year for 28 years, totaling 13 articles. However, the boom in publications on automated transplanters began in 2008, reaching a total of five articles. This increase could be attributed to the global population growth and urbanization, leading to the need to enhance food production. For instance, by 2010, more than 50% of the population already lived in cities, and it is estimated that by 2050, two-thirds of the global population will reside in urban areas due to the migration from rural to urban areas in search of better opportunities (*Van Bavel, 2013*). One consequence of this mobility is the increased demand for food in cities, but at the same time the labor force in the countryside decreases. This situation has driven the need to automate agricultural activities to boost productivity in the fields (*FAO, 2022*).

The evolution of transplanters aligns with the advancement of automation and data processing algorithms that require significant computational power (*Tendulkar, 2014*). However, the rise of dual-core processors, allowing simultaneous task management, for mass consumption began in 2005 by the Intel Corporation (*Intel, 2005*). Additionally, the implementation of Artificial Intelligence (AI) as part of automation in agriculture necessitates Graphics Processing Unit (GPU) support for the neural networks used in machine learning by researchers in the last 12 years (*Xu et al., 2021*).

The peak in study production occurred in 2021, with a total of 35 articles. Despite the challenges the world faced due to the adversities caused by the COVID-19 pandemic, it appears that authors took advantage of the isolation period to concentrate on developing and presenting their findings on automated transplanting. The evolution of article production over the years is presented in Fig. 2.

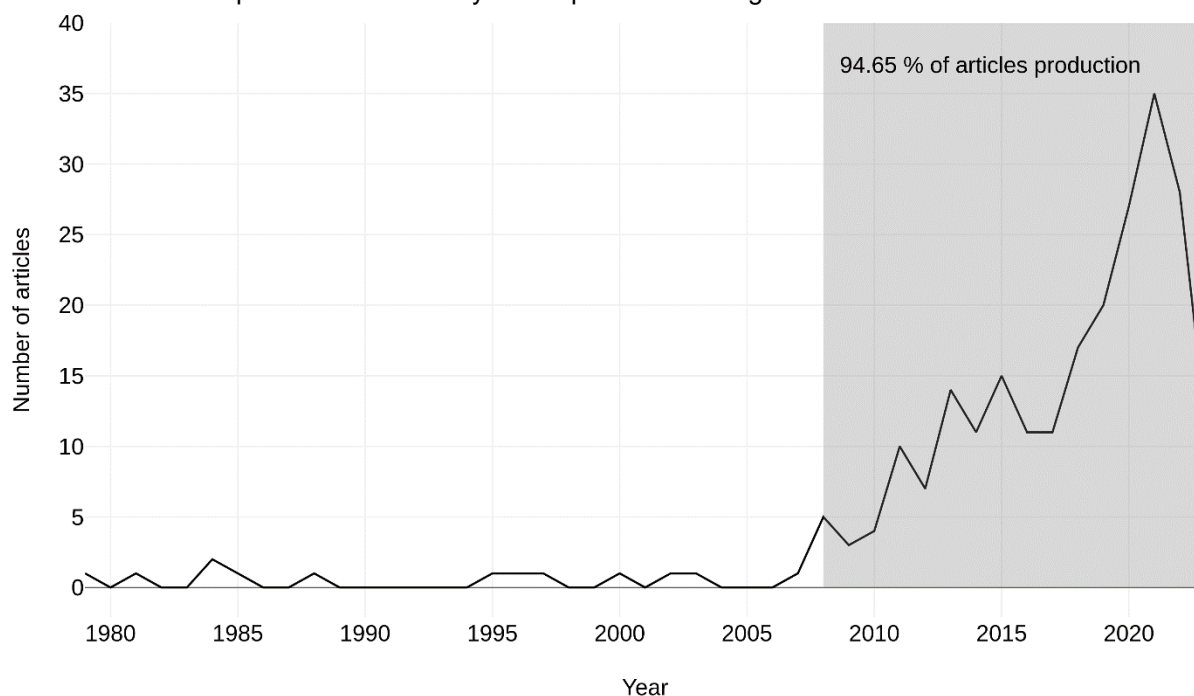


Fig. 2 – Origin and evolution of articles published between 1979 and 2023

Fig. 3 shows the 50 most frequently used keywords by the authors of the 243 analyzed documents. The term “*transplanter*” stands out as the most used, appearing in 14.4% of instances. “*agricultural machinery*” follows with a 13.1% occurrence, and “*plug seedling*” is noted in 9% of cases. The term “*automated transplanter*” appears in only 4.1% of instances, ranking tenth in frequency. Fig. 3 shows the most used words regarding automated transplanting of vegetables.

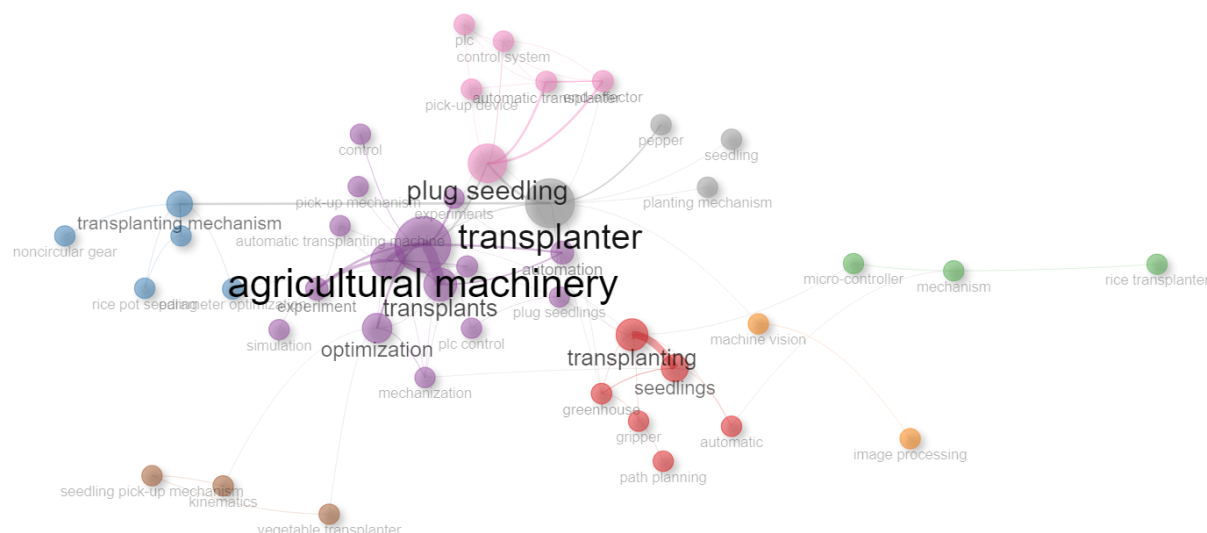


Fig. 3 – Co-occurrence network of authors' keywords

The evolution of automated transplanters is closely intertwined with technological advancements, as reflected in the keywords employed over the years. Notably, new terms such as *virtual simulation*, *machine vision* and *image processing* have emerged, signaling the influence of AI and its technological innovations in automated vegetable transplanting.

Fig. 4 shows the terms used in articles related to automated transplanters from 1979 to 2023. The parameters considered include a minimum word frequency and the number of words per year, set at five and three, respectively. The term *“transplanter”* stands out with the highest frequency, serving as the commonly used general term to describe automated transplanting in these articles.

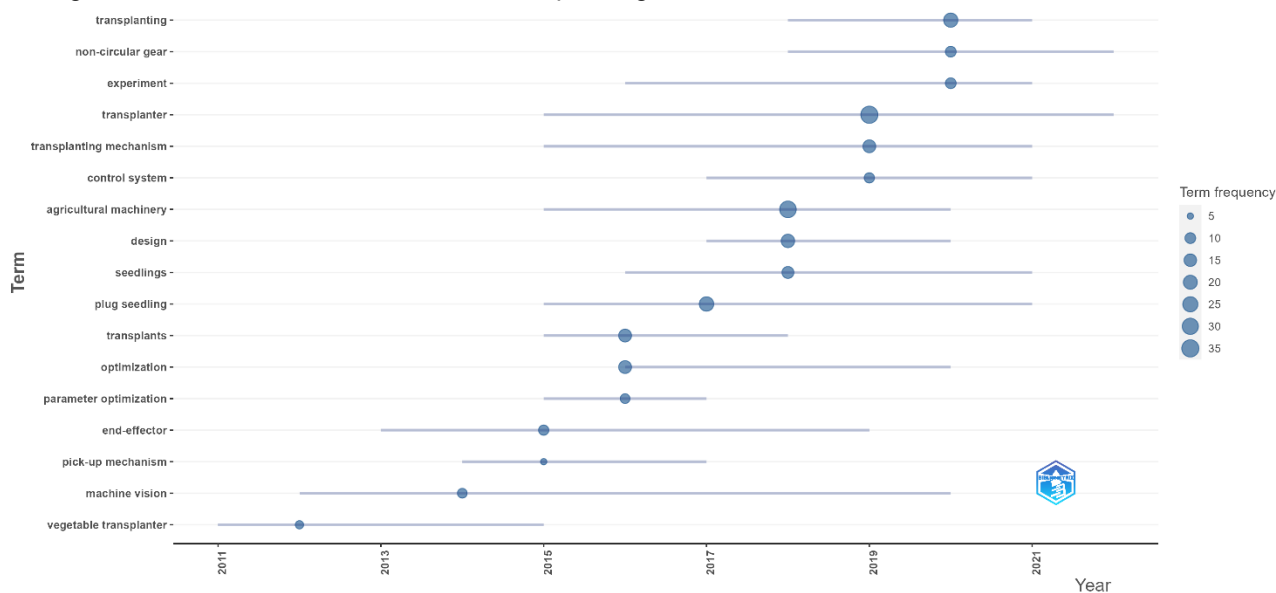


Fig. 4 – Current trends in automated transplanting-related topics

Scientific production on automated transplanters

The authors with the highest number of publications on the topic are as follows: in the first position, Hu J., Jin X., and Yu G., each with 18 published articles. The second position is held by Mao H., with a total of 17 published articles, and the third position is occupied by Han L., with 16 published articles. The most cited authors are in the first position Kumar G. and Raheman H., each with a total of 10 citations. The second position

is shared by Han L., Hu J., Kumi F., and Mao F., each with a total of seven citations, the third position is held by Ye B., with a total of five citations (Fig. 5).

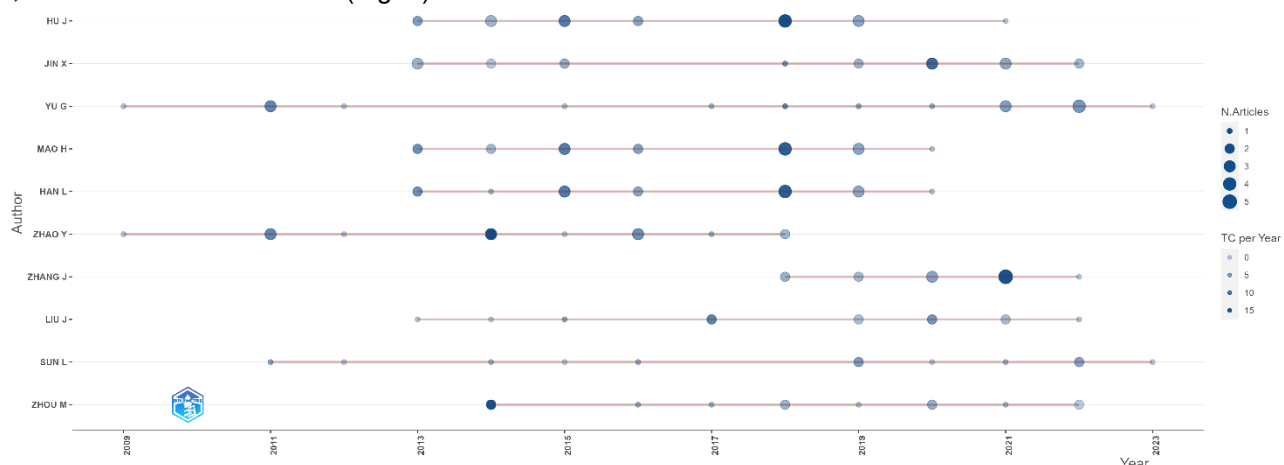


Fig. 5 – Authors' scientific production over time

The distribution of countries with the highest scientific production (Fig. 6) is indicated in blue. China, India, and the United States secure the top three positions. In the initial 28 years under analysis, the United States dominated scientific production. However, from 2007 onwards, India took the lead for six consecutive years. Yet, since 2013, China has been the leading country in scientific production on this topic. China has the highest number of citations (1645 citations), followed by India with 243 citations, and the United Kingdom in third place with 102 citations. The United States leads in collaborations, working with Spain, Bangladesh, and Korea, while China takes the second position, collaborating with Ghana and Japan. It's important to note that no information on this topic was found concerning Mexico.

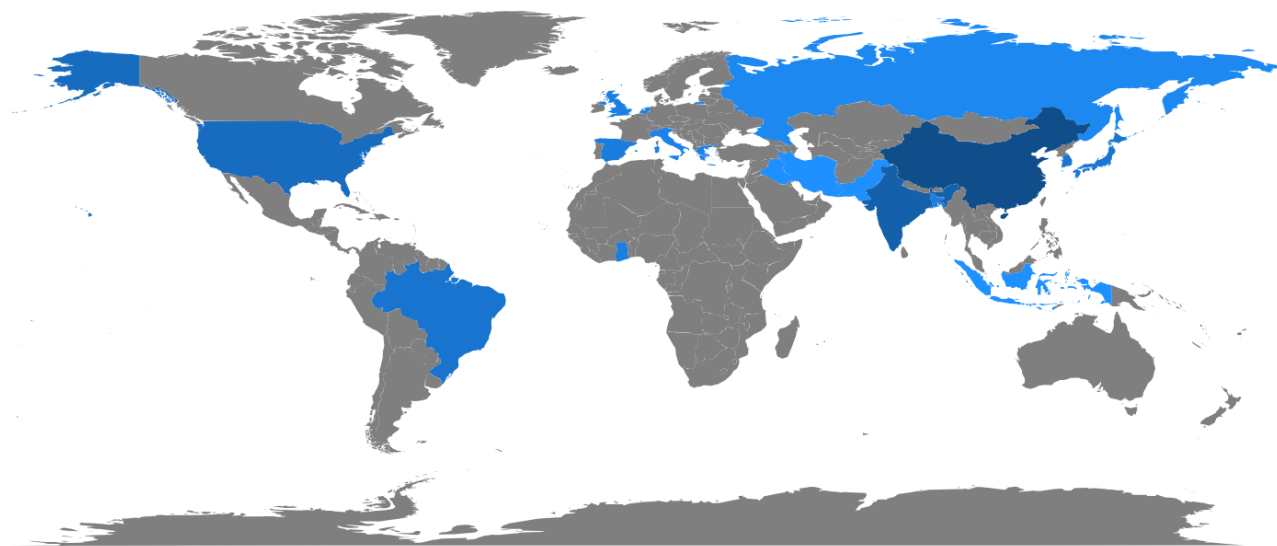


Fig. 6 – Leading countries in scientific production

Table 2 shows the most cited papers, these papers were published between 2008 and 2015, and the journals Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery and Biosystems Engineering stand out, with the most cited articles worldwide. These documents present solutions for the process and automation of seedling transplanting.

Table 2

Most cited articles globally

Article	Authors	TC	TC/year	TC normalized
Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision	(Tillett et al., 2008)	102	6.38	2.90
Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings	(Kumar & Raheman, 2011)	84	6.46	4.06
Co-robotic intra-row weed control system	(Pérez-Ruiz et al., 2014)	56	5.60	2.12
Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter	(Han et al., 2013)	53	4.82	2.65
Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear	(Ye et al., 2011)	51	3.92	2.46
Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings	(Han et al., 2015)	50	5.96	2.63
Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings	(Han et al., 2013)	42	3.82	2.10
Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling	(Feng et al., 2013)	41	3.73	2.05
Development of single row automatic transplanting device for potted vegetable seedlings	(Jin et al., 2018)	38	6.33	2.76
Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter	(Yang et al., 2018)	37	5.14	2.22

TC– Total citations

Morphological and mechanical characteristics of seedlings

The design of any device or mechanism for an agricultural machine requires fundamental input parameters. Therefore, it is crucial to base it on the physical and mechanical characteristics of agricultural materials (Mohsenin, 1986). In the specific case of designing and evaluating an automated transplanter for seedlings (Khadatkar et al., 2020), obtaining these parameters is essential to dimension the parts that make up the transplanting equipment. Not considering these variables would cause mechanical damage to the seedlings during transplanting and, subsequently, throughout the crop's development.

Khadatkar et al. (2021) used simulated seedlings for preliminary tests, replicating the ideal characteristics of pepper seedlings. In other words, homogeneous material was used to enhance efficiency in the prototype. Table 3 shows the physical and mechanical characteristics (seedling and root ball) used in the development and evaluation of transplanters designed by several authors.

Table 3

Characteristics of the studied seedlings and root ball

Specie name	Physical and mechanical characteristics	Age (days) and #H	Substrate	Authors
Onion	-	-	-	(Chowdhury et al., 2023)
Chili	Height, weight, stem diameter, burst pressure, compression force and breaking force	30; 4-5	Coco peat, vermiculite and perlite (3:1:1)	(Khadatkar et al., 2023)
Chili	Height, canopy, moisture content and bulk density	28, 35 y 42; -	-	(Chethan et al., 2022)
Tomato and chili	-	30; -	-	(Khadatkar et al., 2021)
Chili	-	-	-	(Wen et al., 2021)
Chili	Average stem diameter, height and weight	30; 4-5	Coco peat, vermiculite and perlite (3:1:1)	(Khadatkar et al., 2021)
Pepper	Height and root diameter	60; 6	-	(Han et al., 2021)
Cabbage	Height, failure resistance of the substrate and dimensions of the substrate	30; -	-	(Cui et al., 2021)
Pumpkin, pepper and tomato	Stem diameter, moisture content and pressure resistance/N	35, 30, 38; 3.5, 4.1, 5.6	-	(Shao et al., 2021)
Tomato	Stem height and diameter	-	-	(Pérez-Ruiz & Slaughter, 2021)

#H – Number of leaves

Due to the significance of the aforementioned characteristics, there are studies focused on determining specific values for these traits in a seedling based on its variety, as they are crucial for designing and evaluating automated transplanters (Table 4).

Table 4

Physical and mechanical properties studied in seedlings

Characteristics		Agricultural product (Variety)	Authors
Physical	Mechanical		
Age, mass, stem diameter, total height, canopy and moisture content	Impact test, stem and root ball compression test, and static friction coefficient	Chili (<i>Pusa Jwala</i>) and tomato (<i>Abhilash</i>)	(Khadatkar et al., 2020)
Age, height, mass, stem diameter and spreading diameter	Impact test, stem tension and compression test, and static friction angle and coefficient	Tomato (<i>Roma VF</i>)	(Abubakar et al., 2020)
Age, moisture content, number of leaves, height, stem diameter, mass, root ball and canopy density	Friction coefficient, stem and root ball compression test, and root ball penetration force	Tomato (<i>Ansal Hybrid</i> and <i>Seminis Company</i>), eggplant (<i>F1-Gaurav Hybrid</i> and <i>Pancha Ganga Seeds Company</i>) and	(Magar et al., 2023)

		cabbage (<i>Saint Hybrid and Seminis Company</i>)	
Age, height of seedling and root ball, stem diameter, number of leaves, spread of leaves/millimeter and mass	Stem bending, tensile and compression test and stem clamping force until tray removal.	Bell pepper (<i>Xiaoxin No. 19</i>)	(<i>Shuangyan et al., 2022</i>)
Age, weight, bulb diameter, stem diameter, height and moisture content	Compression test and static friction coefficient	Onion (<i>Pusa Red, Set-126 and Pusa Ridhi</i>)	(<i>Pandirwar et al., 2015</i>)

Obtaining the physical-mechanical parameters of each part of the seedling is crucial. Some authors focus on the stem, while others concentrate on the root ball (substrate characteristics), as demonstrated in the study conducted by *Han et al. (2013)*, who conducted mechanical tests on the root balls of pumpkin seedlings. The following are the physical and mechanical characteristics to consider for the design of an automated seedling transplanter (Fig. 7). Some physical characteristics (as e , D , T) were derived from *Paneque et al. (2017)*, and the remaining physical and mechanical characteristics were also used by the authors mentioned in Table 4.

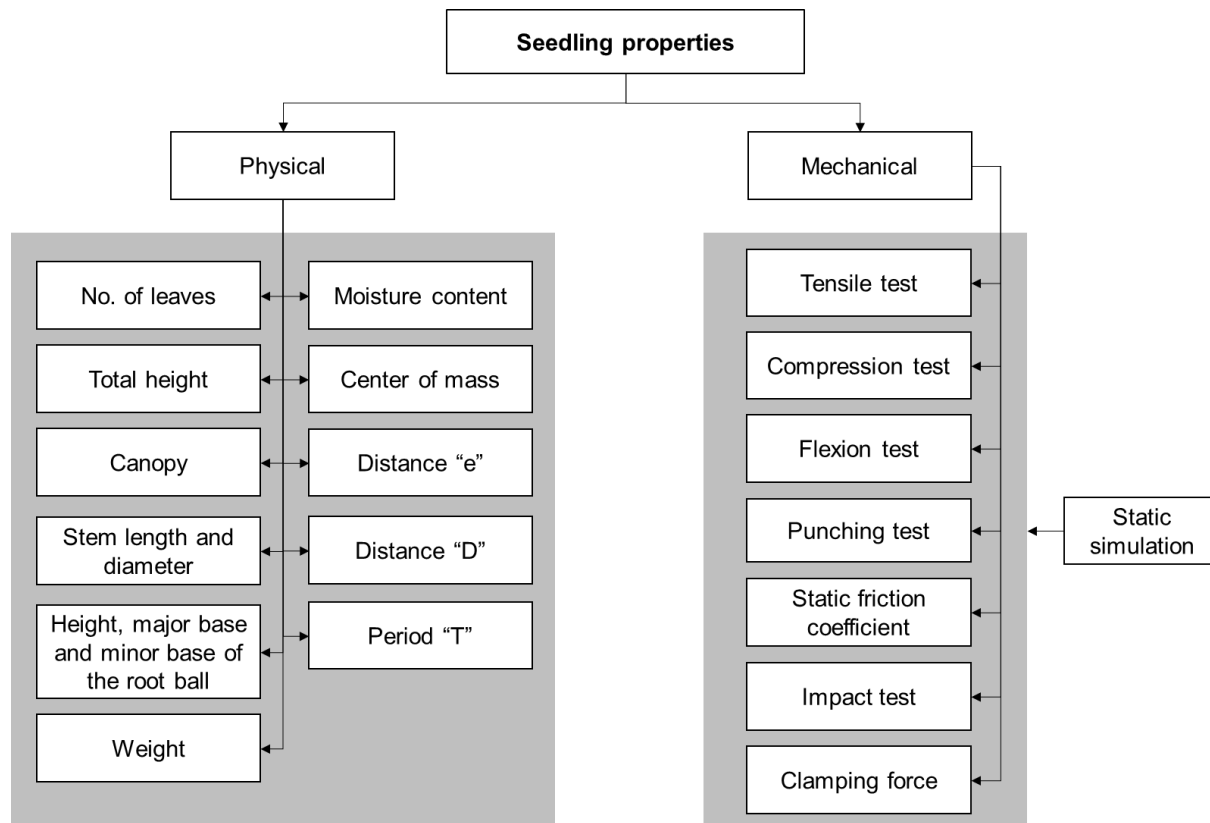


Fig. 7 – Physical and mechanical properties of seedlings included in the design and evaluation of an automated transplanter

Systems, features, and performance of transplanters

Fig. 8 shows the systems that comprise an automated transplanter. System one (Sis-1) covers the extraction of seedlings from germination trays, system two (Sis-2) handles the transportation of seedlings to the next system, and system three (Sis-3) has the function of seedling transplanting. The subfunctions of the

transplanter are shown in white boxes. As with any automated machine, there are input power and input signals; on the other hand, there are output power and output signals.

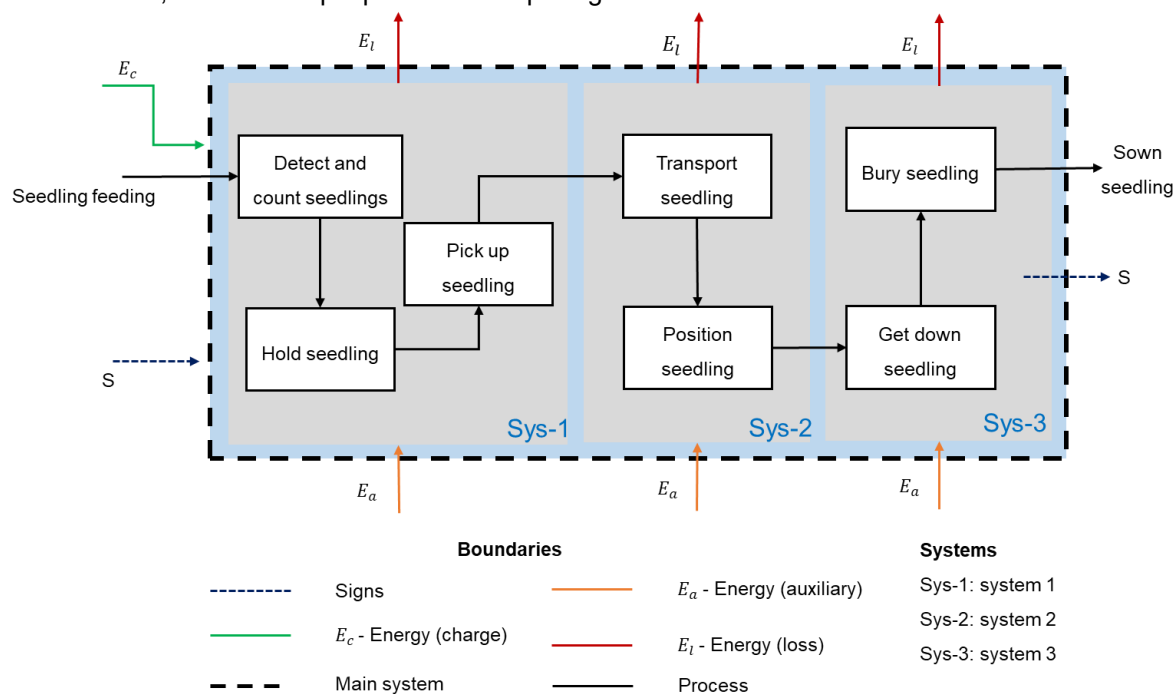


Fig. 8 – Sub-functions of a machine for automated vegetable transplanting

Table 5 shows the systems used by some authors in their research, revealing three general systems that comprising a transplanting machine. It is important to mention that all the studies shown in the table used plastic trays for germination due to their flexibility and durability, in contrast to polystyrene trays, which are more fragile and prone to break.

Table 5

Transplanter components				
Seedling feeding	Extraction system (mechanism)	Transport system	Transplant system	Authors
Black plastic tray	Automatic	Automatic	Mechanic	(Chowdhury et al., 2023)
Black plastic tray	Manipulator with effector	Manipulator with effector	Manipulator with effector	(Khadatkar et al., 2023)
Black plastic tray	Manual	Gravity fall	Automatic	(Chethan et al., 2022)
Black plastic tray	Conveyor belt	Hopper	Automatic	(Khadatkar et al., 2021)
Black plastic tray	Extractor cylinder	Dosing plate automatic	Automatic	(Wen et al., 2021)
Black plastic tray	Spinning fingers	Metering shaft automatic	Automatic electromechanical system	(Khadatkar et al., 2021)
Black plastic tray	Automatic collection system		Basket type planting (Automatic)	(Han et al., 2021)

Seedling feeding	Extraction system (mechanism)	Transport system	Transplant system	Authors
Black plastic tray	Conveyor belt and automatic device (mechanical arm)	Mechanical buckets	Automatic	(Cui et al., 2021)
Black plastic tray	Effector	Automatic chain cups	Automatic	(Shao et al., 2021)
Black plastic tray	Manual	Drum with 5 fingers (one seedling/finger)	Automatic	(Pérez-Ruiz & Slaughter, 2021)

There are several working environments in vegetable production, for example, open field with or without mulch, greenhouses with or without mulch, and greenhouses with pots. Each transplanter designed will always be focused on one or two working environments, depending on the region, production volumes and level of technology. Likewise, they have advantages and disadvantages, both in terms of production and profits. Furthermore, depending on the working environment, dimensions, weight, productivity and performance of the prototype are defined. Table 6 shows the characteristics of some transplanters developed with different working capacities.

Table 6

Properties of transplanters

Dimensions (<i>l</i> x <i>w</i> x <i>h</i> (mm))	Weight (kg)	NR	Work environment	Authors
875 x 1626 x 2036	690	6	Open field	(Chowdhury et al., 2023)
630 x 510 x 120	-	1	Open field	(Khadatkar et al., 2023)
940 x 680 x 890	-	1	Open field (with and without mulch)	(Chethan et al., 2022)
-	-	2	Open field (without mulch)	(Khadatkar et al., 2021)
2400 x 2200 x 1900	774	2	Open field (without mulch)	(Wen et al., 2021)
2030 x 1295 x 1015	210	2	Open field (laboratory experiment)	(Khadatkar et al., 2021)
-	-	2	Open field (without mulch)	(Han et al., 2021)
3100 x 3000 x 1600	-	4	Open field (without mulch)	(Cui et al., 2021)
-	-	-	Experimental in laboratory	(Shao et al., 2021)
-	-	3	Open field (without mulch)	(Pérez-Ruiz & Slaughter, 2021)

l- large, *w*- width, *h*- height, NR- number of rows

When testing and evaluating an automated transplanter, technical parameters such as speed and transplanting capacity are considered to determine if the prototype is efficient according to its intended working environment. These parameters, along with the number of seedlings successfully transplanted, serve as a benchmark for transplanting efficiency during a workday. Achieving a 100% success rate is challenging due to the influence of independent variables such as weight, shape, and physical dimensions of seedlings, which are inherently non-uniform. Moreover, they are susceptible to mechanical damage during extraction from germination trays, handling, and transplanting. Consequently, there is always a percentage of failure in the process. Table 7 outlines the technical parameters used in both the design and evaluation of the analyzed prototypes.

Table 7

Technical parameters of transplanters

Transplant speed (m/s)	Transplanting capacity	Successful transplant (%)	Failure (%)	Authors
0.24	-	-	-	(Chowdhury et al., 2023)
-	3 SG/min	90.3	7.6	(Khadatkar et al., 2023)
0.117-0.156	15 SG/min	-	-	(Chethan et al., 2022)
-	10.35 SG/min	90-92.6	4.5-5	(Khadatkar et al., 2021)
-	80 SG/(min*row)	92.08	3.61	(Wen et al., 2021)
0.556	-	90.3	2.1	(Khadatkar et al., 2021)
-	120 SG/min	97.5	3	(Han et al., 2021)
0.306	55 SG/min	93.31	3.42	(Cui et al., 2021)
-	6-12 SG/min	73.33-88	1-8.57	(Shao et al., 2021)
0.222 y 0.444	-	90	-	(Pérez-Ruiz & Slaughter, 2021)

SG – seedlings

There are machines designed for transplanting in greenhouses. *Hu et al., (2016)* developed and tested an automated transplanter for greenhouses, achieving a transplant success rate of 90.23%, a capacity of 120 seedlings per minute, and a planting precision within the range of 0.15-1.22 mm.

Manufacturing and operating costs

The cost of production and the selling price are features to consider in the development of automated transplanters; therefore, it is important and necessary to analyze both fixed and variable costs to justify the final cost of the prototype. It is also essential to compare the costs of manual transplanting against the costs of transplanting using an automated transplanter to determine if the prototype indeed reduces the cost of the transplanting phase.

In the analyzed works, only a few authors report the cost of their prototype. Of the total prototypes and mechanisms analyzed, 97.5% do not report the costs of the components used since they are more focused on research than on production. *Chethan et al., (2022)* mentioned that the prototype they developed does not require electricity and was constructed with locally available, inexpensive materials. They considered their prototype to be semi-automated and cost-effective.

When comparing transplanting capacities between automated and manual methods, the study found, according to *Khadatkar et al., (2021)*, that the average manual transplanting rate ranges from 2.5 to 4.5 seedlings per minute per person. Except for the prototype developed by *Khadatkar et al., (2023)*, whose capacity falls within the range of manual transplanting capacity, the prototypes presented by the authors listed in Table 6 surpass traditional capacities by more than 100%. In economic terms, as reported by *Khadatkar et al., (2021)*, there was a 30.55% cost reduction in mechanically transplanting tomatoes compared to manual operations. For pepper crops, a decrease of 6.39% was observed. Therefore, it is inferred that transplanting costs will consistently be lower in a mechanical process.

Functional systems in automated transplanters

Several studies focus on one or two systems, or the development of an innovative mechanism used in transplanters. Regardless of the number of systems, their efficiency is determined by evaluating the success rate of transplanting. It is also crucial to evaluate the percentage of seedlings that remain upright, as this significantly contributes to their survival. Some of these studies include:

Hu et al., (2022) developed an integrated automated transplanting mechanism for the collection and transplantation of pepper seedlings in trays with holes. The 3D model was designed using SolidWorks, and its dynamic trajectory was modeled in Matlab. They achieved a seedling selection success rate exceeding 91.1%, a planting success rate of 78.5%, a seedling erection rate of 94.9%, and a coefficient of variation in plant spacing below 14.1%. These results demonstrated its suitability for real-field transplanting.

The pressure applied during seedling gripping poses a challenge, as it can lead to issues such as tissue damage in the stems or root ball. For this reason, various authors have developed different types of grippers. *Li et al., (2022)* designed and tested a gripper (Force Feedback) for picking up seedlings in an automated transplanter. This gripper is based on the linear Hall element. The gripping force detection system exhibited a sensitivity of 0.0693 V/N, linearity of 3.21%, a medium coefficient of determination of 0.986, and a range of 10 N. It met the requirements for gripping force during transplanting, being stable and adaptable to seedlings.

Zhou et al., (2020) developed a mechanism with a punching device for transplanting cayenne pepper seedlings into pots. The results obtained showed that the specific trajectory and transplanting mechanism met the required transplanting standards, and the success rate of seedling collection was 92.4%, confirming the correctness and feasibility of the transplanting mechanism.

On the other hand, *Chen et al., (2023)* designed a mechanism to pick up seedlings from an ejector belt, it was based on the discrete element method by using EDEM simulation software. They conducted substrate studies to determine the best variant of the proposed designs and found that when using the optimal combination of working parameters for seedling collection, they achieved a qualified seedling rate exceeding 90%, with a clod fragmentation rate of less than 20%. The seedling extraction system is effective for a transplanter in dry soil.

Modeling vegetables is a complex task that requires high computational resources. *Francis et al., (2014)* carried out a study to mathematically model the behavior of vegetables when extracting them from the root, using the Godwin and O'Dogherty equation for soil penetration tools as a foundation. They initially performed experiments with strain gauges to understand the force-time relationship of the device, indicating an initial force value of 1.1319 N. In the model under similar conditions, the force was determined to be 1.1389 N. They concluded that with this research, it is possible to optimize and design seedling collection devices for transplanting.

It is essential to consider the mechanical damage suffered by seedlings; typically, the stems and the root ball are the most affected, affecting production. *Wen et al., (2021)* reported that in the test conducted on their prototype, only 0.28% of the total used seedlings were damaged. This is considered very acceptable, as at large scales, there are minimal losses in seedlings and production costs. For instance, out of 1000 seedlings, only 3 of them are lost.

In recent years, part of the design of transplantation machines has been focused on strategies that help to optimize transplantation times. Consequently, several authors have developed algorithms to address this issue, and some of them are mentioned below. *Tong et al., (2022)* optimized the transplanting route of seedlings with multi-end effectors using an enhanced algorithm. The average calculation times they obtained for the common sequence method (CSM), greedy algorithm (GRA), greedy genetic algorithm (GGA), and improved greedy simulated annealing algorithm (IGSA) were 0.002, 0.007, 6.94, and 3.49 seconds in MATLAB (R2019a), respectively. They commented that these algorithms can meet real-time operation requirements except for GGA. This research can be adapted to accommodate new numbers and arrangements of effectors.

He et al., (2022) designed and tested a control system for a sweet potato feeding and planting device, which consists of a pre-treatment seedling conveyor belt. According to the results obtained in the test, the

average error of the seedling feeding motor speed was 4.04%, and for the planting motor speed was 3.28%. The lowest coefficient of variation (7.42%) in seedling spacing was achieved during tests at a low speed. They concluded that the system meets the control requirements for the automated seedling feeding and planting device in transplanting.

Furthermore, *Jin et al.*, (2021) employed Kinect visual processing to obtain and process information about seedling height and leaf edge. They established and applied the working coordinate system of transplanting manipulator in route planning to avoid obstacles. Combining this with the inclined manipulator, they proposed the obstacle avoidance transplanting method. With this manipulator, they achieved a 4.70% leaf damage rate, a 16.67% stem bending rate, an 83.45% substrate integrity, and an 87.36% transplant quality. The transplanting time for a seedling was 8.32 seconds. The authors ensure the reduction of damage to the seedlings.

On the other hand, *Li et al.*, (2022) optimized the transplant route in seedling germination trays using the improved A* algorithm for replanting. This algorithm reduced the time by 10.15 seconds compared to the Common Sequence Method (CSM) for each seedling tray. It was used to replant the cavities where the seedlings did not germinate or were defective with healthy seedlings. Additionally, it can be used for transplant route planning.

Current situation on prototype development in Mexico

In Mexico, the equipment developed for automated transplanting is scarce, with most machines being imported. However, in the course of the present research, a prototype developed in Mexico was identified. *Gutiérrez et al.* (2009) designed and built a transplanting mechanism (module) as the main component of a bare-root strawberry seedling transplanter on mulched soil. The operating principle is based on a module that remains in contact with the soil for a determined period. It features mechanisms for plastic cutting (including hiding it) and automated plant insertion into the soil. The plastic cutting had a 100% success rate; the plastic concealing activity had an efficiency of 95%; the success rate for plant placement with tweezers was 95%, and the efficiency in the verticality of the seedlings was 85%.

There is a limited amount of technology and information available on automated vegetable transplanting equipment in Mexico, although there is evidence of research work that has not been formally published. The equipment currently sold and used in the country is designed for different working conditions and focused on large growers. Therefore, there is an area of study that should be addressed, since there is a need for equipment with specifications suitable for small and medium-sized growers, who represent the majority, but have fewer possibilities of accessing automation technology because of the cost and capability.

Areas of opportunity for future research

Liu et al., (2021) conducted a design for a sweet potato transplanter based on a robotic arm. They found that the adjustment of the arm is complex as it cannot adapt to all planting terrains, negatively impacting the crop quality on ridges. Additionally, the target detection algorithm heavily relies on the quantity and quality of training images. When the transplanting environment changes, such as from a sunny day to a cloudy day, the detection results are affected. While the transplanter achieves various sweet potato transplanting methods, the single-ridge operation mode limits the efficiency of the transplanting process.

Tong et al., (2022) conducted research on optimizing the transplanting route of seedlings with multi-end effectors using the Improved Greedy Simulated Annealing (IGSA) algorithm. They proposed that, to enhance transplanting efficiency, increasing the number of end effectors would be beneficial, particularly when performing transplanting operations in dense seedling trays.

Meanwhile, *Shao et al.*, (2021) developed a multi-adaptive feeding device for automated seedling plugs for a multi-seedling transplanter with six grippers. They noted that the success rate needs further improvement

to meet the practical application of high-speed transplantation. They also commented that as future research, the automated feeding device could be manufactured by professionals to achieve high precision and stability.

In agriculture, the germination percentage is not 100% due to different situations such as seed quality, temperature conditions, seedbed humidity, etc. Therefore, if there were tray cavities without seedlings, the transplanting process would not be 100% complete in the furrows.

On the other hand, *Hu et al.*, (2022) found issues related to the rotation speed of the mechanism they designed, as it generated vibrations that affected the transplant quality. They recommended further research into mechanisms to avoid generating vibrations when placing the plant on the ground and keeping it in a vertical position.

Paradkar et al., (2021) developed a dosing mechanism consisting of a serial robotic arm for handling seedlings in paper pots using a vegetable transplanter. They mentioned that the sources of reduced efficiencies from the ideal (100%) were due to inclinations caused by seedling transport due to friction and the operating speed of the conveyor and the damage occurred to the seedlings due to the robot arm's higher gripping force. Therefore, studying the physical-mechanical properties of seedlings is crucial for later use in the design of mechanisms used for transplanting.

Yongwei et al., (2018) recommended that, when designing the final gripper, it is crucial to consider the cultural practices specific to vegetable seedlings in the country where the mechanism will be utilized.

For the design of an automated transplanter, it's essential to define its parameters as no single machine adapts to all work scenarios. Therefore, it should be considered the cultural practices of the country, region, and the targeted type of growers, soil conditions, climate, type of germination tray, and the seedbed where the seedlings are produced. This approach aims to achieve germination rates exceeding 95% in trays, thereby optimizing the trajectories of the seedling extraction mechanism. Furthermore, the design should be accessible to small growers. Currently, most of the existing transplanters are designed for growers with large cultivation areas.

CONCLUSIONS

Automated transplanters have become very important in vegetable production because they reduce time, labor and, therefore, costs by up to 31% compared to manual transplanting; however, although this technology is expensive when developing a new prototype, it's essential not to disregard the limited availability of labor and the associated costs. Moreover, uncertainties in the quality of field operations performed by agricultural workers should be considered. Therefore, automation proves to be a favorable alternative.

The bibliometric analysis and detailed review indicate that technological progress on automated transplanters have evolved with the help of computational development. Researchers have created new prototypes for different crops, considering the conditions of their countries. However, there was limited progress in automatic transplanting (a total of 13 articles related to the topic) over 28 years, experiencing a surge in 2008 and a substantial increase in 2021 with a total of 35 published articles. Nowadays, databases of scientific articles across all fields, including automatic transplanting, are updated daily, in contrast to the previous practice of annual updates until 2007.

Several critical variables must be considered when designing an automated transplanter, such as physical and mechanical properties of seedlings. These parameters are essential for sizing and calculating the characteristics of the machine's components, ensuring they align with the intended functionality and preventing potential mechanical damage. It is also essential to test and evaluate the developed prototypes to determine the working speed, quantity of seedlings transplanted within a specified timeframe, efficiency, and percentage of failure during transplanting. Furthermore, it's important to consider the costs associated with the design, analysis, and construction time of the prototype.

Technological progress plays a pivotal role in the advancement of diverse sectors, notably in agriculture for food production and its broader economic impact. In the specific case of Mexico, it is

necessary to take up the advances achieved so far in this area and develop prototypes for the automated vegetable transplanter, aligning with the unique conditions and characteristics of the country. By doing so, these transplanters can become valuable tools for small and medium-sized growers, aiding in cost reduction and integrating technology akin to that used by larger growers. This approach not only fosters competitiveness with potential producing countries and may even contribute to achieving food sovereignty.

This review article aims to show the scientific community the evolution and technological development of automatic transplanters, as well as the importance and impact of the development of technology to improve the quality, time and costs of vegetable transplanting. Limitations of this review on the development and evolution of automatic transplanters include possible study selection biases that might favor certain types of technologies or outcomes, lack of comparative studies evaluating different transplanters under various conditions, difficulties in generalizing findings due to variability of settings and technologies, possible conflicts of interest on the part of the authors reviewed, scarcity of data on long-term performance, environmental impact, potential conflicts of interest on the part of the authors analyzed, scarcity of data on long-term performance, environmental impact, lack of long-term follow-up on durability and total cost of transplanters, as well as limitations in access to the literature that could lead to a partial view of the available evidence.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors of the present study thank the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) for the funding support. They also thank the Universidad Autónoma Chapingo and the Graduate Program in Agricultural Engineering and Integral Water Use for the funding support and facilities provided for the completion of this review article.

REFERENCES

- [1] Abubakar, A. J., Iya, S. A., Aliyu, B., & Tashiwa, Y. I., (2020). Determination of physico-mechanical properties of tomato seedlings for design of a tomato transplanter. *Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)*, vol. 25, no.1, pp.106–122.
- [2] Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P., (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation : a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation — a review. *Frontiers in Plant Science*, vol.15, no.4, pp.1–26.
- [3] Aria, M., & Cuccurullo, C., (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, vol.11, no.4, pp. 959–975.
- [4] Baudoin, W. (2002). El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo; Estudios, FAO. In *Serie Producción y Protección Vegetales*.
- [5] Bazargani, K., & Deemyad, T., (2024). Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects. *Robotics*, vol.13, no.2, pp.33–57.
- [6] Chen, J., Zhou, H., Che, H., Liu, Y., & Li, P., (2023). Optimal design of ejector belt seedling collecting mechanism based on EDEM. *INMATEH - Agricultural Engineering*, vol.69, no.1, pp.109–120.
- [7] Chen, W., Ahmed, M. M., Sofiah, W. I., Isa, N. A. M., Ebrahim, N. A., & Hai, T., (2021). A Bibliometric Statistical Analysis of the Fuzzy Inference System - Based Classifiers. *IEEE Access*, vol.9, pp.77811–77829.
- [8] Chethan, S., Srinivasa, K., Madivalkar, J., Mahaboob, N., & Yathisha, N., (2022). Development of Economical Plant Transplanter. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol.103, no.3, pp.339–345.
- [9] Chowdhury, M., Reza, M. N., Ali, M., Kabir, M. S. N., Kiraga, S., Lim, S. J., Choi, I. S., & Chung, S. O., (2023). Vibration Assessment of a 12-kW Self-Propelled Riding-Type Automatic Onion Transplanter for Transplanting Performance and Operator Comfort. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol.13, no.3,

- pp. 1927.
- [10] Cui, Z., Guan, C., Xu, T., Fu, J., & Chen, Y., (2021). Design and Experiment of Transplanting Machine For Cabbage Substrate Block Seedlings. *INMATEH –Agricultural Engineering*, vol.64, no.2, pp.375–384.
 - [11] Dias, J. S., (2019). Nutritional Quality and Effect on Disease Prevention of Vegetables. *Food and Nutrition Sciences*, vol.10, no.4, 369–402.
 - [12] Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M., (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, vol.133, no.3, pp.285–296.
 - [13] FAO., (2022). *The State of Food and Agriculture 2022. Leveraging Automation in Agriculture for Transforming Agrifood Systems*.
 - [14] Feng, Q., Wang, X., Jiang, K., Zhou, J., Zhang, R., & Ma, W., (2013). Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol.29, pp.21–27.
 - [15] Francis, K., Mao, H., & Hu, J., (2014). Mathematical modeling of vegetable seedling root lump under pick-up force. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014, ASABE 2014*, vol.5, pp.3452–3458.
 - [16] Gutiérrez, C., Serwatowski, R., Gracia, C., Cabrera, J. M., & Saldaña, N., (2009). Design, building and testing of a transplanting mechanism for strawberry plants of bare root on mulched soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol.7, no.4, pp.791–799.
 - [17] Habineza, E., Ali, M., & Chung, S., (2023). Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms : a review. *Korean Journal of Agricultural Science*, vol.50, no.1, pp.113–129.
 - [18] Han, C., Hu, X., Zhang, J., You, J., & Li, H., (2021). Design and testing of the mechanical picking function of a high-speed seedling auto-transplanter. *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol.5, pp.64–71.
 - [19] Han, C., Yang, W., Zhang, X., Guo, H., & Yin, W., (2013). Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol.29, no.8, pp.51–61.
 - [20] Han, L. H., Mao, H. P., Hu, J. P., & Kumi, F., (2019). Development of a riding-type fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings. *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol.17, no.3.
 - [21] Han, L., Mao, H., Hu, J., Miao, X., Tian, K., & Yang, X., (2013). Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol.29, no.2, pp.24–29.
 - [22] Han, L., Mao, H., Kumi, F., & Hu, J., (2018). Development of a multi-task robotic transplanting workcell for greenhouse seedlings. *Applied Engineering in Agriculture*, vol.34, no.2, pp.335–342.
 - [23] Han, L., Mao, H., Miao, X., Hu, J., & Yang, X., (2013). Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol.44, no.11, pp.260–265.
 - [24] Han, L., Mao, H., Yan, L., Hu, J., Huang, W., & Dong, L., (2015). Pincette-type End-effector Using Two Fingers and Four Pins for Picking Up Seedlings. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol.46, no.7, pp.23–30.
 - [25] Hauser, V. L., (1985). Automatic grass transplanting machine. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol.28, no.6, pp.1777–1782.
 - [26] He, Y., Zhu, Q., Fu, W., Luo, C., Cong, Y., Qin, W., Meng, Z., Chen, L., Zhao, C., & Wu, G., (2022). Design and experiment of a control system for sweet potato seedling-feeding and planting device based on a pre-treatment seedling belt. *Journal of Agricultural Engineering*, vol.53, pp.1261.
 - [27] Hu, J., Zhang, C., Wang, L., & Han, L., (2016). Design and experiment on automatic greenhouse seedling transplanting machine. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol.47, pp.149–154.
 - [28] Hu, S., Hu, M., Yan, W., & Zhang, W., (2022). Design and Experiment of an Integrated Automatic

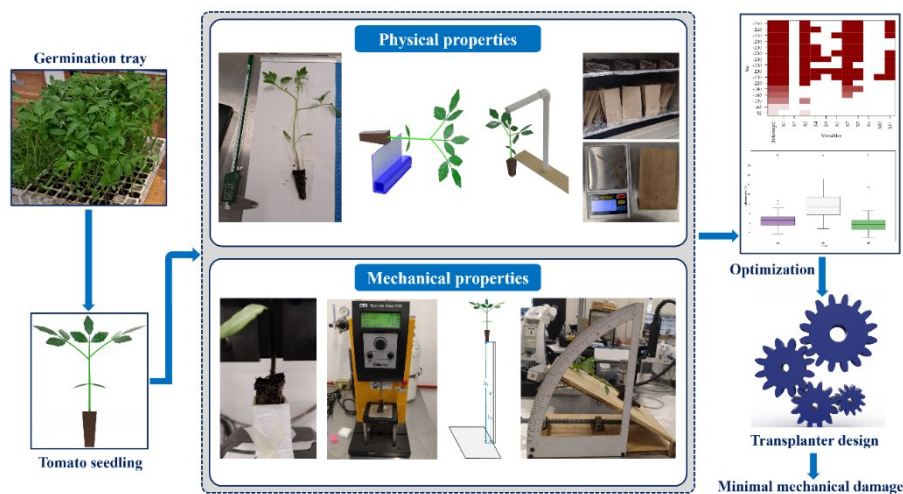
- Transplanting Mechanism for Picking and Planting Pepper Hole Tray Seedlings. *Agriculture*, vol.12, pp.557.
- [29] Intel. (2005). *Dual Core Era Begins, PC Makers Start Selling Intel-Based PCs*. Intel News Release. <https://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2005/20050418comp.htm>
- [30] Jin, X., Li, D. Y., Ma, H., Ji, J. T., Zhao, K. X., & Pang, J., (2018). Development of single row automatic transplanting device for potted vegetable seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol.11, no.3, pp. 67–75.
- [31] Jin, X., Li, R., Ji, J., Yuan, Y., & Li, M., (2021). Obstacle avoidance transplanting method on kinect visual processing. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol.14, no.5, pp.72–78.
- [32] Khadatkhar, A., Gaikwad, B., & Pandirwar, A., (2020). Biometric Properties of Plug Vegetable Seedlings Relevant to the Design of Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering*, vol.57, no.1, pag.16–24.
- [33] Khadatkhar, A., Mathur, S. M., Dubey, K., & Bhusanababu, V. (2021). Development of embedded automatic transplanting system in seedling transplanters for precision agriculture. *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol.5, pp.175–184.
- [34] Khadatkhar, A., Mathur, S. M., Dubey, K., & Magar, A. P., (2021). Automatic Ejection of Plug-type Seedlings using Embedded System for use in Automatic Vegetable Transplanter. *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol.80, no.12, pp. 1042–1048.
- [35] Khadatkhar, A., Mathur, S. M., Rao, K. V. R., Babu, V. B., & Chaurasia, L., (2021). Comparative Performance of Automatic Transplanter with Manual Transplanting of Plug-type Vegetable Seedlings using Time-motion. *Indian Journal of Extension Education*, vol.57, no.4, pp.95–101.
- [36] Khadatkhar, A., Pandirwar, A. P., & Paradkar, V., (2023). Design , development and application of a compact robotic transplanter with automatic seedling picking mechanism for plug - type seedlings. *Scientific Reports*, vol.13, no.1, pp.1883–1895.
- [37] Kumar, G. V. P., & Raheman, H., (2011). Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings. *Biosystems Engineering*, vol.110, no.2, pp.189–197.
- [38] Li, P., Yun, Z., Gao, K., Si, L., & Du, X., (2022). Design and Test of a Force Feedback Seedling Pick-Up Gripper for an Automatic Transplanter. *Agriculture*, vol.12, pp.1–17.
- [39] Li, X., Wang, W., Liu, G., Li, R., & Li, F., (2022). Optimizing the Path of Plug Tray Seedling Transplanting by Using the Improved A* Algorithm. *Agriculture (Switzerland)*, vol.12, no.9, pp.1–23.
- [40] Liu, J. Z., Zhao, S. Y., Li, N., Faheem, M., Zhou, T., Cai, W. J., Zhao, M. Z., Zhu, X. Y., & Li, P. P., (2019). Development and Field Test of an Autonomous Strawberry Plug Seeding Transplanter for Use in Elevated Cultivation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol.35, no.6, pp.1067–1078.
- [41] Liu, W., Tian, S., & Wang, Q., (2023). Key Technologies of Plug Tray Seedling Transplanters in Protected Agriculture : A Review. *Agriculture*, vol.13, pp.1488–1507.
- [42] Liu, Z., Wang, X., Zheng, W., Lv, Z., & Zhang, W., (2021). Design of a Sweet Potato Transplanter Based on a Robot Arm. *Applied Sciences*, vol.11, pp.1–16.
- [43] Magar, A. P., Nalawade, S. M., Walunj, A. A., Khadatkhar, A., Bhangare, S. C., Bhalekar, M. N., Nimbalkar, C. A., & Gaikwad, B. B., (2023). Engineering Properties of Some Plug-type Vegetable Seedlings for Development of Automatic Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, vol.60, no.1, pp.1–13.
- [44] Moden, W. L., & Brewer, H. L., (1979). Automatic Bandoleer Feeder For Transplanters. *Paper - American Society of Agricultural Engineers*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069338174&partnerID=40&md5=a76eb6762bbb3ca6b07ce327fcf7409a>
- [45] Mohsenin, N. N., (1986). *Physical properties of plant and animal materials* (Second Rev). Gordon and Breach Science Publishers, Inc.
- [46] Nage, S. M., Mathur, S. M., & Meena, S. S., (2023). Vegetable Transplanters for India : A Review.

- Agricultural Science Digest*, vol.43, no.2, pp.129–134.
- [47] Pandirwar, A., Kumar, A., Mani, I., & Islam, S., (2015). Biometric properties of onion seedlings relevant to the development of onion seedling transplanter. *Journal of Applied and Natural Science*, vol.7, no.2, pp.768–773.
- [48] Paneque, P. P., López, G., Mayans, P. R., Muñoz, F., & Gaytán, J. G., (2017). Fundamentos Teóricos y Análisis de Máquinas Agrícolas, vol. 1, Departamento de Publicaciones de la UACH, ISBN: 978-607-12-0532-2
- [49] Paradkar, V., Raheman, H., & Rahul, K., (2021). Development of a metering mechanism with serial robotic arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter. *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol.5, pp.52–63.
- [50] Pérez-Ruiz, M., & Slaughter, D. C., (2021). Development of a precision 3-row synchronised transplanter. *Biosystems Engineering*, vol.206, pp.67–78.
- [51] Pérez-Ruiz, M., Slaughter, D. C., Fathallah, F. A., Gliever, C. J., & Miller, B. J., (2014). Co-robotic intra-row weed control system. *Biosystems Engineering*, vol.126, pp.45–55.
- [52] Radovich, T. J. K., (2018). Biology and Classification of Vegetables - Biology and Classification of Vegetables. In M. Siddiq & M. A. Uebersax (Eds.), *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*, vol. 1 (Second, Issue Jeffery 1990, pp. 1–23). John Wiley & Sons Ltd.
- [53] Rasool, K., Ali, M., & Jang, B., (2020). Onion transplanting mechanisms : A review Onion transplanting mechanisms : A review. *Precision Agriculture Science and Technology*, vol.2, no.4.
- [54] Shao, Y., Han, X., Xuan, G., Liu, Y., Gao, C., Wang, G., & Hu, Z., (2021). Development of a multi-adaptive feeding device for automated plug seedling transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol.14, no.2, pp.91–96.
- [55] Sharma, A., & Khar, S., (2022). Current developments in vegetable transplanters in developing countries: a comprehensive review. *International Journal of Vegetable Science*, vol.28, no.5, pp.417–440.
- [56] Sharma, A., Kumawat, L., & Singh, A., (2023). Development of robotics in vegetable seedling transplantation: a future research direction. *International Journal of Vegetable Science*, vol.29, no.6, pp.577–591.
- [57] Shuangyan, H., Minjuan, H., & Wenyi, Z., (2022). Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, vol.43, no.3.
- [58] Syed, T. N., Lakhari, I. A., & Chandio, F. A. (2019). Machine vision technology in agriculture : A review on the automatic seedling transplanters Machine vision technology in agriculture : A review on the automatic seedling transplanters. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development International*, vol.6, no.12, pp.79–88.
- [59] Tendulkar, P., (2014). *Mapping and Scheduling on Multi-core Processors using SMT Solvers* (Issue November) [Universite de Grenoble I - Joseph Fourier]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01087271>
- [60] Tillet, N. D., Hague, T., Grundy, A. C., & Dedousis, A. P., (2008). Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, vol.99, no.2, pp.171–178.
- [61] Tong, J., Qiu, Z., Zhou, H., Khawar, M., Yu, G., Wu, C., & Du, X., (2022). Optimizing the path of seedling transplanting with multi-end effectors by using an improved greedy annealing algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.201, no.8, pp.107276.
- [62] Van Bavel, J. (2013). The world population explosion: causes, backgrounds and -projections for the future. *Facts, Views & Vision in ObGyn*, vol.5, no.4, pp.281–291.
- [63] Wen, Y., Zhang, J., Tian, J., Duan, D., & Zhang, Y. (2021). Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.182, no.6, pp.106017.
- [64] Xu, Y., Liu, X., Cao, X., Huang, C., Liu, E., Qian, S., Liu, X., Wu, Y., Dong, F., Qiu, C. W., Qiu, J., Hua, K., Su, W., Wu, J., Xu, H., Han, Y., Fu, C., Yin, Z., Liu, M., ... Zhang, J., (2021). Artificial intelligence:

- A powerful paradigm for scientific research. *Innovation*, vol.2, no.4.
- [65] Yang, Q., Xu, L., Shi, X., Ibrar, A., Mao, H., Hu, J., & Han, L., (2018). Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.147, no.8, pp.131–145.
- [66] Ye, B., Yu, G., Chen, Z., & Zhao, Y., (2011). Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol.27, no.12, pp.7–12.
- [67] Yongwei, W., Zhuoliang, H., Jun, W., Chuanyu, W., Gaohong, Y., & Yanhai, T. (2018). Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, vol.34, no.3, pp.19–25.
- [68] Zhou, M., Shan, Y., Xue, X., & Yin, D. (2020). Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol.13, no.4, pp.85–92.

4. PHYSICAL–MECHANICAL PROPERTIES OF TOMATO SEEDLINGS FOR THE DESIGN AND OPTIMIZATION OF AUTOMATIC TRANSPLANTERS

Este capítulo presenta un estudio sobre las propiedades físico-mecánicas de plántulas de jitomate correspondientes a tres híbridos comerciales F1: *Natalie*, *CID* y *Gavilán*. El análisis se orienta a generar información técnica relevante para el diseño y optimización de sistemas automáticos de trasplante. Entre las variables evaluadas se incluyen la altura total de la plántula, el contenido de humedad, la altura y el diámetro del tallo, la fuerza de adhesión y el coeficiente de fricción estático. Los resultados permiten caracterizar el comportamiento físico y mecánico de las plántulas y establecer parámetros fundamentales para su manipulación eficiente mediante mecanismos automatizados de trasplante.



Este artículo se publicó en la revista *AgriEngineering* bajo la modalidad de acceso abierto (Open Access).

Forma de citar este artículo (APA 7° edición):

Grande, G., Hidalgo-Reyes, M., Cruz, P., & Velázquez-López, N. (2025). Physical–Mechanical Properties of Tomato Seedlings for the Design and Optimization of Automatic Transplanters. *AgriEngineering*, 7(5), 138. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050138>



Article

Physical–Mechanical Properties of Tomato Seedlings for the Design and Optimization of Automatic Transplanters

Gaudencio Grande ¹, Martín Hidalgo-Reyes ^{2,*}, Pedro Cruz ² and Noé Velázquez-López ³

¹ Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de Texcoco 56230, Estado de México, Mexico; gaussgam@gmail.com

² Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, Estado de México, Mexico; pcruz@chapingo.mx

³ Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, Estado de México, Mexico; nvelazquezl@chapingo.mx

* Correspondence: mhidalgor@chapingo.mx

Abstract: This study was based on the hypothesis that the hybrid type and its physical–mechanical properties significantly influence the operational efficiency of transplanting systems. Understanding these properties is essential for optimizing the performance of semi-automatic and automatic transplanters. To test this hypothesis, a completely randomized design was implemented to evaluate the physical–mechanical properties of tomato seedlings. A total of 1350 seedlings from three F1 hybrids—Natalie (H1), CID (H2), and Gavilán (H3)—cultivated in central Mexico, were analyzed. The statistical analyses included mean comparisons using Tukey’s test and multiple linear regression to estimate the center of mass (CM). The results indicate that H2 was notable for its total height ($h_t = 311.76$ mm), canopy development in X, Y, and Z axes (170.24 mm, 106.84 mm, and 98.14 mm, respectively), stem diameter ($d_s = 3.65$ mm), total weight ($w_t = 11.92$ g), d_e (78.36 mm) and d_p (233.40 mm) distances, and oscillation period ($T = 0.88$ s). H1 had the highest stem height ($h_s = 53.18$ mm), $w_t = 11.76$ g, and root ball (RB) moisture content (MC) (77.36%). H3 had the largest $d_s = 3.70$ mm, as well as the highest MC in the stem (94.51%) and the remaining foliage (92.92%). Regarding mechanical properties, the average adhesion force (AF) was 4.606 N (H1), 7.470 N (H2), and 3.815 N (H3). The average root ball punching force (RBPF) was 0.36, 0.48, and 0.25 N, respectively. The lowest static friction coefficient (SFC) on a galvanized steel sheet was 0.936. The drop test (DT) revealed an average residual substrate mass of 0.148 g at a height of 500 mm. It can be concluded that the interaction between hybrid type, transplanting age, and MC plays a critical role in the efficient design of semi-automatic and automatic transplanting equipment. This interaction enables process optimization, ensures operational quality, reduces seedling damage, and ultimately enhances and increases the long-term profitability and sustainability of the equipment.

Keywords: adhesion force; F1 hybrids; germination tray; moisture content; punching force; root ball; static friction coefficient

Academic Editor: Simone Pascuzzi

Received: 27 March 2025

Revised: 16 April 2025

Accepted: 22 April 2025

Published: date

Citation: Grande, G.; Hidalgo-Reyes, M.; Cruz, P.; Velázquez-López, N. Physical–Mechanical Properties of Tomato Seedlings for the Design and Optimization of Automatic Transplanters. *AgriEngineering* **2025**, *7*, 138. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050138>

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most important vegetables worldwide in terms of production and consumption, with a global volume of 182 million tons, accounting for 17% of the total vegetable production in 2017. By 2022, this figure increased to 186.11 million tons [1–4]. In 2023, Mexico's total tomato production reached 3.64 million tons, accounting for 21.1% of the country's total vegetable production. Furthermore, tomatoes played a significant role in Mexico's agricultural exports, comprising 25.7% of the 7.1 million tons exported [5].

The importance and economic impact of this crop makes it essential to study and improve production techniques. Among the different stages of cultivation, seedling transplantation stands out for its significant effect on yield. Compared to direct seeding, semi-automatic and automatic transplantation increases yields by enabling additional harvest cycles [6]. Seedling transplantation can be performed manually, semi-automatically, or fully automatically [7]. The transition toward these transplantation systems requires a comprehensive understanding of the physical and mechanical properties of seedlings, as these properties influence the design of machinery capable of handling them without causing damage during the process [8–10].

Several studies explored the physical and mechanical properties of seedlings from different agricultural crops, including onion [9,11], chili pepper [12], bell pepper [13], as well as eggplant and cabbage [14]. For tomato seedlings, research has been carried out on varieties such as Abhilash [12], Roma VF [15], Ansal Hybrid and Seminis Company [14], and Himsona [16]. These studies examined various physical properties, including overall dimensions, canopy development, and total weight (w_t), as well as mechanical characteristics such as the static friction coefficient (SFC), stem compression, and root ball (RB) resistance, among others.

Additionally, there are specific studies focused on the mechanical properties of different agricultural products. Han et al. [17] conducted a study on the mechanical properties of cucumber seedling root balls. Similarly, Tian et al. [18] studied the mechanical properties of bell pepper seedlings at different growth stages, combining the data with neural networks. Furthermore, there are studies that analyze drop tests (DT) on sunflower seedlings by simulating their interaction with the soil [19,20], as well as mechanical damage to the RB, applying Hertzian contact theory to model the collision process [10,21].

However, there is limited information on certain physical properties, such as stem height (h_s) and diameter (d_s), center of mass (CM), distance d_e , distance d_p , and oscillation period (T). Furthermore, information is scarce on variable mechanical properties such as the adhesion force (AF) of seedlings and root ball punching force (RBPF). Additionally, there is little information on these properties, especially for F1 hybrid varieties adapted to the central region of Mexico. This study provides novel and previously undocumented data of the significant relevance for the mechanical design and performance optimization of agricultural machinery used in seedling transplanting. The physical and mechanical properties characterized herein are critical design parameters that contribute to improving both operational efficiency and overall productivity. In contrast to previous studies, which typically rely on the mechanical properties of seedling varieties not representative of those cultivated in Mexico, the present research offers specific data on F1 hybrid seedlings commonly used in central Mexico—varieties for which no prior values have been reported in the available scientific literature. Therefore, this study aims to evaluate the physical and mechanical properties of three F1 hybrid varieties to generate data that can be used as a foundation for the design of automatic transplanters adapted to the specific conditions of these varieties.

2. Materials and Methods

The methodology used to determine physical and mechanical properties in this research is shown in Figure 1.

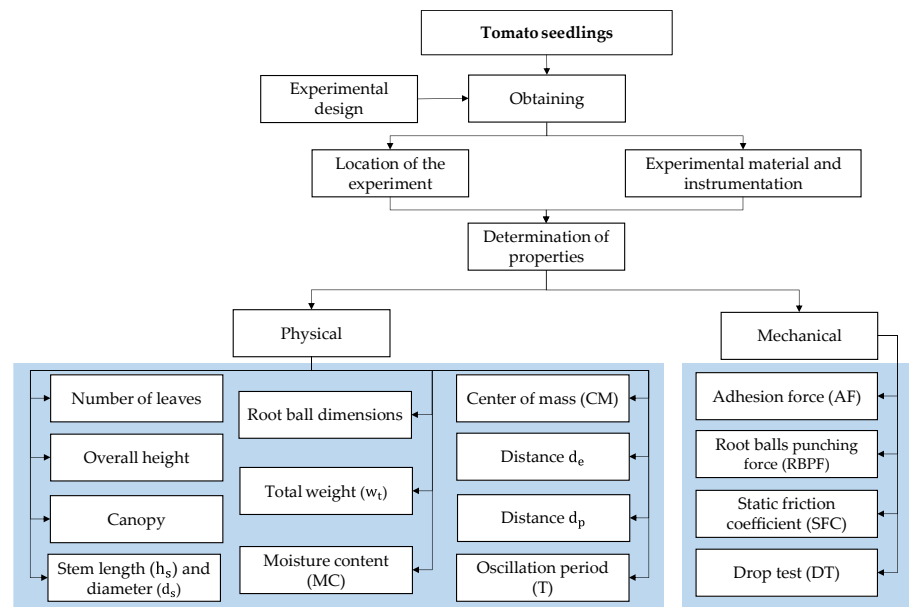


Figure 1. Flowchart for determining physical and mechanical properties of tomato seedlings.

2.1. Location and Experimental Material

Tomato seeds were sown during the summer of 2024, between July and August, in Texcoco de Mora, Estado de México (19.5060° N, 98.8832° W). In the experimental phase, 2100 tomato seedlings, 30 days old, were obtained, with 700 seedlings from each of the three F1 hybrid varieties: Natalie (H1), CID (H2), and Gavilán (H3). Of these, 450 seedlings were randomly selected for each variety. The tomato seeds were sown at a depth of 10 mm in the substrate. A total of 12 Frigocel germination trays, made of white polystyrene, measuring 664 mm × 335 mm × 67 mm with 200 conical cavities of 31 × 31 mm and 5 mm drainage, were used. The substrate was composed of 80% Peat Moss Sunshine, 10% agrolite, and 10% medium-grade vermiculite. The seedlings were kept under temperature and relative humidity conditions of 25 °C and 90%, respectively.

2.2. Determination of Physical Characteristics

To determine the physical properties, 50 seedlings were randomly selected from each hybrid. These seedlings served as replicates for each physical test.

2.2.1. Number of Leaves, Total Height, and Canopy

A visual count was performed to determine the number of compound leaves (with 3 petiolate leaflets) on each seedling. This parameter acts as an indicator of the seedlings' age, helping to plan and ensure effective transplantation.

Total height of seedlings (h_t) was measured from the base of the root ball (RB) to the tip of the seedling, following the method described by ASNS [22]. For the measurements, a digital vernier caliper Insize (0–300 mm, Model 1108–300) with a precision of 0.01 mm was used. In cases where the seedling height exceeded 300 mm, a Stanley FatMax tape measure

(3 m) was utilized. Additionally, the canopy dimensions of the seedlings were determined along the X, Y, and Z axes (Figure 2).

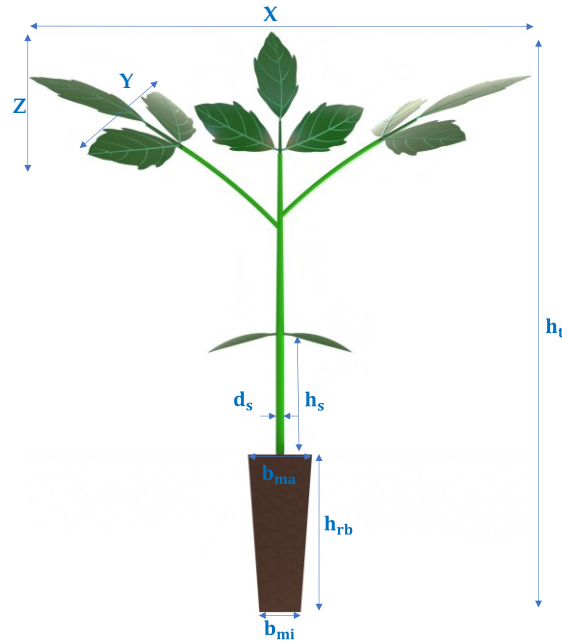


Figure 2. Physical dimensions of tomato seedling.

2.2.2. Root Ball and Stem Dimensions

General dimensions of the seedling's RB were measured (Figure 2): RB height (h_{rb}), major base (b_{ma}), and minor base (b_{mi}).

The stem was measured from the surface of the b_{ma} to the first leaves of the seedling [13]. The stem height (h_s) and diameter (d_s) were measured at a distance (d_{se}) of 10 mm from the RB surface, as shown in Figure 2.

2.2.3. Weight and Moisture Content

Total weight of seedlings (w_t), RB weight along with roots (w_{rc}), stem weight (w_s), and remaining foliage weight (w_f) were determined using an electronic balance Rhino Precision (0–100 g, Model Babol-100) with a graduation of 0.01 g. The moisture content (MC) of seedlings was determined following the ASAE [23]. The seedlings were placed in a RIOSSA convection oven (Model H-33, México City, Mexico) at 103 °C for 24 h. The root balls were placed on trays (lined with aluminum foil) inside the oven, and the foliage of each seedling was placed in a Kraft paper bag. The MC of seedlings was determined using Equation (1):

$$MC = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100,$$

where w_i is the initial weight of seedlings in g and w_f is final weight of the seedlings in g after drying.

2.2.4. Center of Mass and Oscillation Period

Following the methodology outlined by Paneque et al. [24], the location of the center of mass (CM) of the seedling was determined through its equilibrium point, and the distance d_e corresponding to the magnitude from the minor base of the RB (b_{mi}) to the seedling's equilibrium point was measured (Figure 3a).

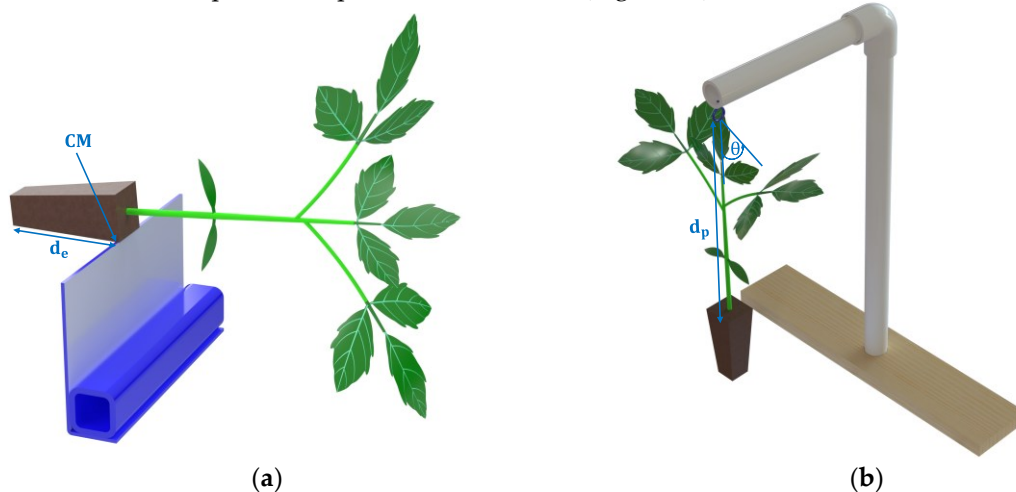


Figure 3. Device for determining (a) the center of mass (CM) of the seedling; (b) distance d_p and oscillation of the seedlings.

CM is primarily influenced by h_t and the weight of the root balls. Therefore, a multiple linear regression model was developed to estimate the location of the seedlings CM based on the values of distance d_e . The multiple linear regression model is presented in Equation (2) as follows:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in}$$

where Y_i is the distance d_e in mm, β_0 is the intercept, $\beta_1 - \beta_n$ are the coefficients of the estimators, and $X_{i1} - X_{in}$ are the regressor variables used to estimate the center of mass (CM) of the seedling, and $i = 1, \dots, 150$ is the number of seedling samples (all hybrids) and n number of variables involved in estimating the center of mass (CM) of the seedling.

Distance d_p was determined based on CM, which is located from the equilibrium point to the pivot point of the simple pendulum (Figure 3a). The oscillation period (T) of the seedling was determined using a simple pendulum. The device was constructed with a treated wood base (500 mm × 300 mm × 12 mm) and a rigid PVC vertical support ($\varnothing = 12$ mm, height = 500 mm) secured with high-strength structural adhesive. A 300 mm horizontal extension supports a metal eyelet, from which a lightweight hemp rope with a low oscillating mass was suspended to minimize energy transfer. The seedling was held by the first compound leaf. The upper seedling part was aligned at the same height as the pendulum's pivot point, which also coincided with the upper part of h_t . Angular calibration was performed using a wooden template with a fixed $\theta = 5^\circ$ inclination, which was used in each test to standardize the initial position. The time required to complete ten oscillations was recorded, with three replicates conducted for each seedling [25] (Figure 3b).

2.3. Mechanical Test

2.3.1. Adhesion Force

The methodology described by the authors of ref [14] was used as a starting point for testing seedling adhesion force (AF). Seedlings were extracted from germination trays and tested using an Instron machine (Model 3382, Norwood, MA, USA). The tests were conducted at a loading speed of 100 mm min^{-1} with a sensitivity of 40%. The seedlings were held by their stems at $d_{se} = 10 \text{ mm}$ from the b_{ma} of the RB (Figure 4a). Prior to this test, samples of cavities with seedlings and substrates from germination trays were randomly cut using a 9 mm-wide cutter. The cavities were then secured with 12 mm JANEL masking tape to fully fix them and prevent the use of other devices, which could introduce noise in the force detection data (sensing) of the testing machine.

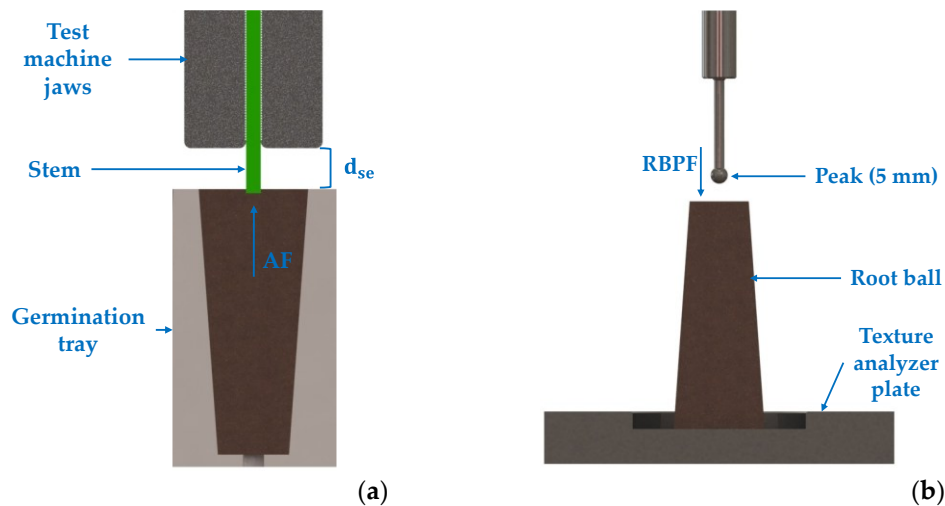


Figure 4. (a) AF test of seedlings attached by their stems to the germination tray, (b) RBPF.

2.3.2. Root Ball Punching Force

Root ball punching force (RBPF) was performed using an AMETEK Brookfield CT3 texture analyzer at a speed of 1.4 mm s^{-1} . The foliage of each seedling was cut from the b_{ma} , leaving only the root ball. The samples were then placed on the b_{ma} (Figure 4b).

2.3.3. Static Friction Coefficient

A device was designed and manufactured to determine the static friction coefficient (SFC) (Figure 5a) based on the designs proposed by authors of refs [26,27]. The device has a resolution of 0.25° . For SFC determination, a total of 600 seedlings were randomly selected, with 200 of each hybrid. Fifty repetitions were performed for each of the interchangeable surfaces, which showed different roughness values (R_a), measured using a Mitutoyo SJ-201 roughness tester: plywood ($R_{aP} = 3.11 \pm 0.34 \mu\text{m}$), plastic ($R_{aPl} = 3.06 \pm 0.23 \mu\text{m}$), commercial neoprene (SBR) ($R_{aSBR} = 1.66 \pm 0.33 \mu\text{m}$), and a galvanized steel sheet (GSS) ($R_{aGSS} = 0.35 \pm 0.13 \mu\text{m}$). Equation (3) was used to calculate SFC [28].

$$\text{SFC} = \tan(\theta_s) \quad (3)$$

where θ_s is the inclination angle when seedlings begin to slide over the material ($^\circ$).

2.3.4. Drop Test

Drop tests (DT) were conducted by dropping tomato seedlings from heights of $h_1 = 250$ mm and $h_2 = 500$ mm (Figure 5b) to assess potential mechanical damage during handling in the transplanting process on GSS. After each test, the residual substrate remaining on the surface was weighed. A total of 300 seedlings were randomly selected, 100 of each hybrid. Fifty repetitions were performed for each height.

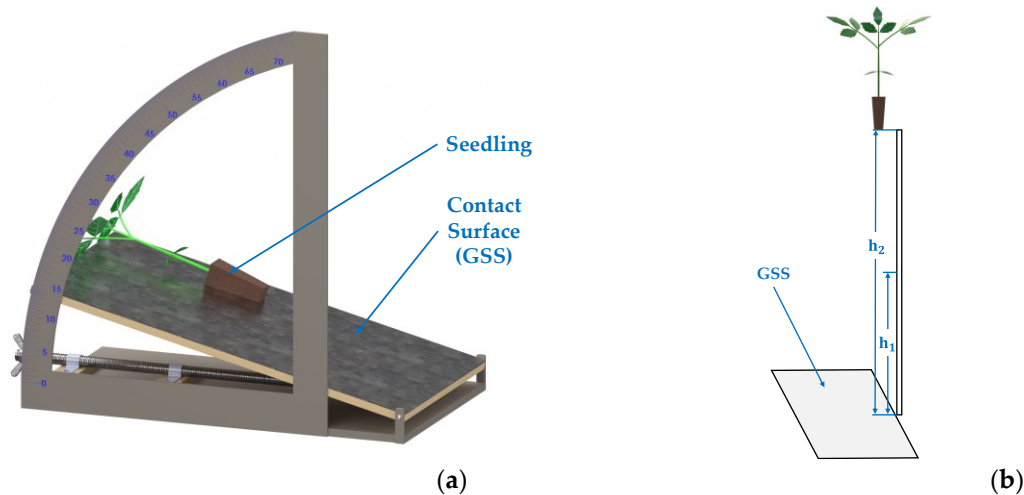


Figure 5. (a) Device for testing the SFC of seedlings, (b) diagram of the DT at two heights.

2.4. Statistical Analysis

A completely randomized design was employed in the experiment. For each test conducted (except for SFC and DT), 50 experimental units (seedlings) were randomly selected per hybrid. The sample size of 50 seedlings per hybrid was determined through a priori power analysis, assuming an effect size (Cohen's $f = 0.26$), a statistical power of 81%, and a significance level of 0.05. An analysis of variance (ANOVA) was conducted, followed by a mean comparison using the Tukey test to determine the statistical significance of the results. The selection of the best multiple linear regression model was based on the Bayesian Information Criterion (BIC) and the adjusted coefficient of determination (R_a^2). Additionally, the results of the sum of squares error, p -value, and variance inflation factors (VIF) were considered as complementary criteria. Data analysis and presentation were carried out using RStudio 2024.09.1 statistical software.

3. Results

3.1. Physical Characteristics

3.1.1. Number of Leaves, Total Height, and Canopy

The average number of compound leaves per seedling was 4.26, 4.08, and 3.96 for H1, H2, and H3, respectively. The minimum and maximum number of compound leaves were the same for all three hybrids, ranging between 3 and 5.

The seedling h_t is shown in Table 1. It was observed that the foliage accounted for the majority of this height, representing 77.13%, 81.22%, and 74.67% of the total for H1, H2, and H3, respectively. Notably, H2 had an average h_t 16.42% greater than H1 and 29.09% greater than H3, despite all hybrids being of the same age.

The dimensions of the seedling canopy are also presented in Table 1. No significant differences were observed between H1 and H3, whereas H2 had a significantly larger canopy in all three axes. Compared to the other two hybrids, the canopy of H2 was 16.58% wider along the X-axis, 12.82% in the Y-axis, and 14.6% in the Z-axis.

Table 1. General seedling dimensions.

Hybrid		Total Height (h_t) (mm)	Canopy (mm)		
			X	Y	Z
H1	Max.	336	232	231	147
	Min.	180	91	22	32
	$\bar{x} \pm SD$	260.58 ± 36.88^b	142.01 ± 26.93^b	91.34 ± 28.74^b	75.28 ± 23.08^b
	CV	0.14	0.19	0.31	0.31
H2	Max.	358	229	188	174
	Min.	234	114	48	56
	$\bar{x} \pm SD$	311.76 ± 26.80^a	170.24 ± 29.74^a	106.84 ± 23.66^a	98.14 ± 27.39^a
	CV	0.08	0.17	0.22	0.28
H3	Max.	302	208	174	144
	Min.	185	60	47	29
	$\bar{x} \pm SD$	233.52 ± 26.05^c	141.18 ± 31.61^b	93.14 ± 25.24^b	83.46 ± 24.93^b
	CV	0.11	0.22	0.27	0.30
<i>p</i> -value		$<2 \times 10^{-16}^{***}$	$6.45 \times 10^{-7}^{***}$	0.00584**	$5.16 \times 10^{-5}^{***}$

$\bar{x}$ —mean, SD—standard deviation, CV—coefficient of variation, and (***, **)—significance levels. Superscript letters (^a, ^b, and ^c) indicate significant groups according to Tukey's test of each variable.

3.1.2. Stem and Root Ball Dimensions

The general RB dimensions are shown in Table 2. h_{rb} showed no significant differences among the three hybrids, as the cavities used for growing were identical, and irrigation and seedling management were carefully controlled to prevent RB deterioration. However, two distinct groups were observed regarding b_{ma} and b_{mi} dimensions: Group 1 (H2) had the highest values for both b_{ma} and b_{mi} , while Group 2 (H1 and H3) had lower values.

Table 2. Dimensions of the seedling root ball (RB) and stem.

Hybrid		RB (mm)			Stem (mm)	
		Height (h_{rb})	Major Base (b_{ma})	Minor Base (b_{mi})	Height (h_s)	Diameter (d_s)
H1	Max.	62.73	25.98	12.61	86.23	3.78
	Min.	54.10	23.8	10.44	36.81	2.73
	$\bar{x} \pm SD$	59.58 ± 1.87^a	24.94 ± 0.57^{ab}	11.66 ± 0.41^{ab}	53.18 ± 8.23^a	3.26 ± 0.25^b
	CV	0.03	0.02	0.03	0.15	0.08
H2	Max.	64.06	26.55	14.61	63.53	4.62
	Min.	51.9	23.35	10.61	35.48	2.95
	$\bar{x} \pm SD$	58.56 ± 2.70^a	25.03 ± 0.76^a	11.97 ± 0.75^a	47.41 ± 6.31^b	3.65 ± 0.38^a
	CV	0.04	0.03	0.06	0.13	0.10
H3	Max.	62.39	26.41	12.62	75.36	4.49
	Min.	54.45	23.35	8.77	39.30	2.70
	$\bar{x} \pm SD$	59.15 ± 1.89^a	24.65 ± 0.59^b	11.42 ± 0.79^b	49.51 ± 7.70^b	3.70 ± 0.42^a
	CV	0.03	0.02	0.07	0.16	0.11

<i>p</i> -value	0.0684 ·	0.00931 **	0.000353 ***	0.000687 ***	2.35×10^{-9} ***
-----------------	----------	------------	--------------	--------------	---------------------------

$\bar{x}$ —mean, SD—standard deviation, CV—coefficient of variation, and (***, **, and ·)—significance levels. Superscript letters (^a, ^b and ^c) indicate significant groups according to Tukey's test of each variable.

Table 2 also shows h_s and d_s of the seedling stem. H1 stood out among the three hybrids, although H2 had a higher h_t . However, h_s of H2 showed no significant statistical differences compared to H3. Regarding d_s , H2 and H3 had statistically similar values, while H1 had smaller d_s values.

3.1.3. Mass and Moisture Content

Table 3 shows the average w_t of the seedlings and MC of the evaluated hybrids. Although H1 and H2 differ in h_t , with H2 being taller, statistical analyses indicate that their w_t values are similar. This is because H1 has a higher average MC in RB. In fact, the MC in the RB accounted for more than 70% of w_t of the seedlings, with H1 exhibiting the highest percentage, reaching 82.75% of w_t .

The average MC in the total foliage of the seedlings ranged from 91.59% to 93.39%, while in the entirety of the seedlings, it varied between 79.34% and 80.21% across the three hybrids. H3 exhibited the highest MC percentage in stems. In contrast, the MC in the remaining foliage was statistically similar to that of H2.

Table 3. Total weight (w_t) and moisture content (MC) of seedlings.

Hybrid		w_t (g)	MC (%)		
			RB	Stem	Remaining Foliage
H1	Max.	16.14	83.99	95.83	93.75
	Min.	6.37	58.26	86.21	85.22
	$\bar{x} \pm$ SD	11.76 ± 2.00 ^a	77.37 ± 6.84 ^a	91.94 ± 2.34 ^c	91.40 ± 1.58 ^b
	CV	0.17	0.09	0.03	0.02
H2	Max.	18.14	83.02	95.83	94.97
	Min.	7.85	55.92	90.00	91.76
	$\bar{x} \pm$ SD	11.92 ± 2.12 ^a	74.31 ± 6.68 ^b	93.24 ± 1.36 ^b	93.41 ± 1.20 ^a
	CV	0.18	0.09	0.01	0.01
H3	Max.	13.7	81.45	98.04	94.95
	Min.	7.19	57.92	90.91	90.53
	$\bar{x} \pm$ SD	10.71 ± 1.58 ^b	74.75 ± 5.34 ^{ab}	94.51 ± 1.39 ^a	92.92 ± 0.93 ^a
	CV	0.15	0.07	0.01	0.01
<i>p</i> -value		0.00322 **	0.0351 *	1.25×10^{-10} ***	4.6×10^{-15} ***

$\bar{x}$ —mean, SD—standard deviation, CV—coefficient of variation, and (***, **, and *)—significance levels. Superscript letters (^a, ^b, and ^c) indicate significant groups according to Tukey's test of each variable.

3.1.4. Center of Mass and Oscillation Period

The results for d_e , d_p , and T of seedlings for the three hybrids are shown in Table 4. H2 had the highest values for d_e , d_p , and T , compared to the other hybrids, these differences were statistically significant. In contrast, H3 showed the lowest values for these variables, which can be attributed to the fact that their seedlings had lower h_t and w_t .

The multiple linear regression model constructed to estimate the center of mass (CM) of tomato seedlings is presented in Equation (4).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \beta_4 X_{i4} + \beta_5 X_{i5} + \beta_6 X_{i6} + \beta_7 X_{i7} + \beta_8 X_{i8} + \beta_9 X_{i9} + \beta_{10} X_{i10} + \beta_{11} X_{i11} \quad (4)$$

where Y_i is the distance d_e in mm, β_0 is the intercept, $\beta_1 - \beta_{11}$ are the coefficients of the estimators, X_{i1} is the total height of the seedlings (h_t) in mm, X_{i2} is the stem height (h_s) in mm, X_{i3} is the stem diameter (d_s) in mm, X_{i4} is the RB height (h_{rb}) in mm, X_{i5} is the RB major base (b_{ma}) in mm, X_{i6} is the RB minor base (b_{mi}) in mm, X_{i7} is the RB weight in g, X_{i8} is the seedling canopy in the X-axis in mm, X_{i9} is the seedling canopy in the Y-axis in mm, X_{i10} is the seedling canopy in the Z-axis in mm, and X_{i11} is the percentage of moisture content (MC) in total foliage.

Table 4. Location of the center of mass (CM) and oscillation period (T) of seedlings.

Hybrid		d_e (mm)	d_p (mm)	T (s)
H1	Max.	88	265.4	0.95
	Min.	50	125.48	0.72
	$\bar{x} \pm SD$	64.20 ± 8.56^b	196.38 ± 34.02^b	0.85 ± 0.06^b
	CV	0.13	0.17	0.07
H2	Max.	110	279	0.96
	Min.	61	169	0.73
	$\bar{x} \pm SD$	78.36 ± 10.87^a	233.4 ± 23.72^a	0.88 ± 0.04^a
	CV	0.14	0.10	0.05
H3	Max.	93	210	0.86
	Min.	45	125	0.62
	$\bar{x} \pm SD$	66.48 ± 10.48^b	167.04 ± 20.84^c	0.78 ± 0.04^c
	CV	0.16	0.12	0.06
p-value		$2.85 \times 10^{-11} ***$	$< 2 \times 10^{-16} ***$	$< 2 \times 10^{-16} ***$

$\bar{x}$ —mean, SD—standard deviation, CV—coefficient of variation, and ***—significance levels. Superscript letters (a, b, and c) indicate significant groups according to Tukey's test of each variable.

The selection of the optimal multiple linear regression model, based on Equation (4), was carried out using the BIC criterion and R_a^2 . The results of this analysis are shown in Figure 6. The details from the ANOVA and VIF analysis for the best-fitting model are presented in Table 5. The selected multiple linear regression model was the one that achieved $R_a^2 = 0.83$, with all estimators being statistically significant (p -value $< 0.0375 - 2.2 \times 10^{-16}$), RMSE = 4.73 and diagnostics are presented in Figure 7. The Equation (5) corresponds to the best model obtained.

$$Y_i = 84.6128 + 0.1497X_1 + 9.9924X_3 + 0.2512X_4 - 2.5576X_7 + 0.0541X_8 - 0.9789X_{11} \quad (5)$$

where Y_i is the distance d_e in mm, X_1 is the total height of the seedlings (h_t) in mm, X_3 is the stem diameter (d_s) in mm, X_4 is the RB height (h_{rb}) in mm, X_7 is the RB weight in g, X_8 is the seedling canopy in the X-axis in mm, and X_{11} is the percentage of moisture content (MC) in total foliage.

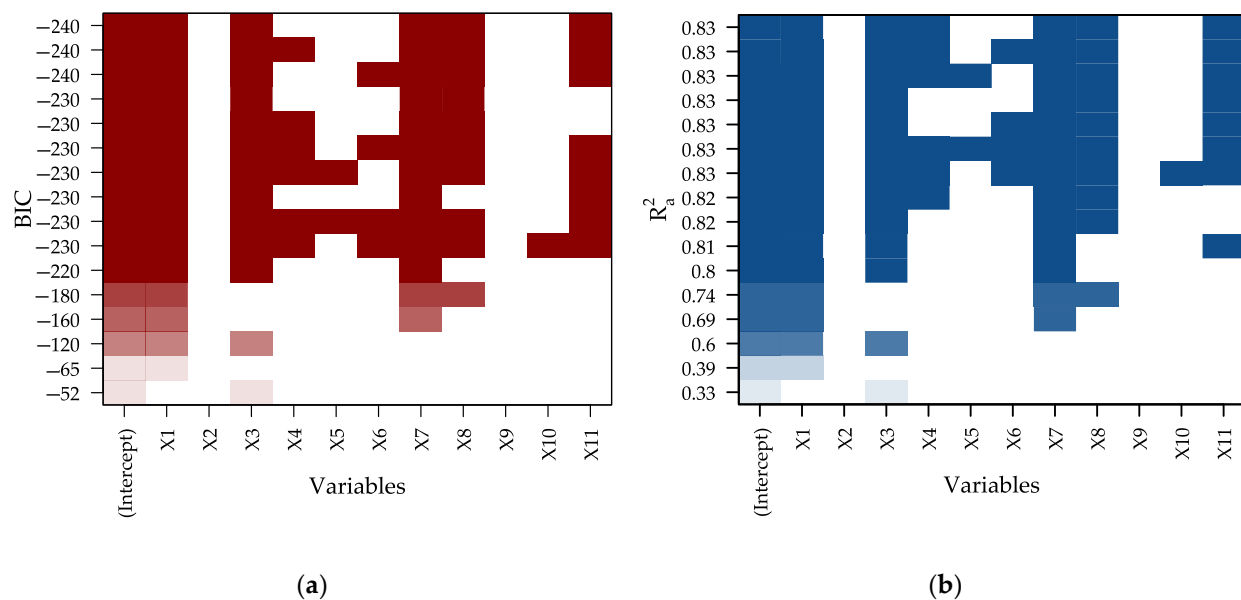


Figure 6. Selection of the best model using the criteria: (a) Bayesian Information Criterion (BIC) and (b) adjusted coefficient of determination (R_a^2). The optimal model was identified based on the lowest BIC and the highest R_a^2 on the Y-axis. These metrics indicate the most suitable model among those incorporating different combinations of variables (X1 to X11), as highlighted in the shaded area.

Table 5. Summary of the ANOVA and VIF for the best model obtained.

Variable	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	p-Value	VIF
X ₁	1	8094.7	8094.7	344.8738	$<2.2 \times 10^{-16}$ ***	1.2716
X ₃	1	4362.1	4362.1	185.8451	$<2.2 \times 10^{-16}$ ***	1.3485
X ₄	1	103.5	103.5	4.4089	0.037509 *	1.0451
X ₇	1	4050.8	4050.8	172.5820	$<2.2 \times 10^{-16}$ ***	1.1268
X ₈	1	378.3	378.3	16.1171	9.574×10^{-5} ***	1.3473
X ₁₁	1	200.9	200.9	8.5596	0.003999 **	1.2198
Residuals	143	3356.4	23.5			

(***, **, and *)—significance levels.

Based on the results obtained from the BIC and R_a^2 , the variables included in Equation (5) were identified as the most representative for estimating seedling CM. This selection simplifies the multiple linear regression model, making it more interpretable and improving the understanding of how these variables affect CM. In addition to improving interpretability and reducing multicollinearity (by ensuring that the included variables are linearly independent) the selection process also helps prevent potential overfitting. By limiting the number of predictors to those that significantly contribute to the model's explanatory power, we reduce the risk of tailoring the model too closely to the sample data, thereby enhancing its generalizability to new observations. This balance between complexity and predictive performance was a key consideration in finalizing the model.

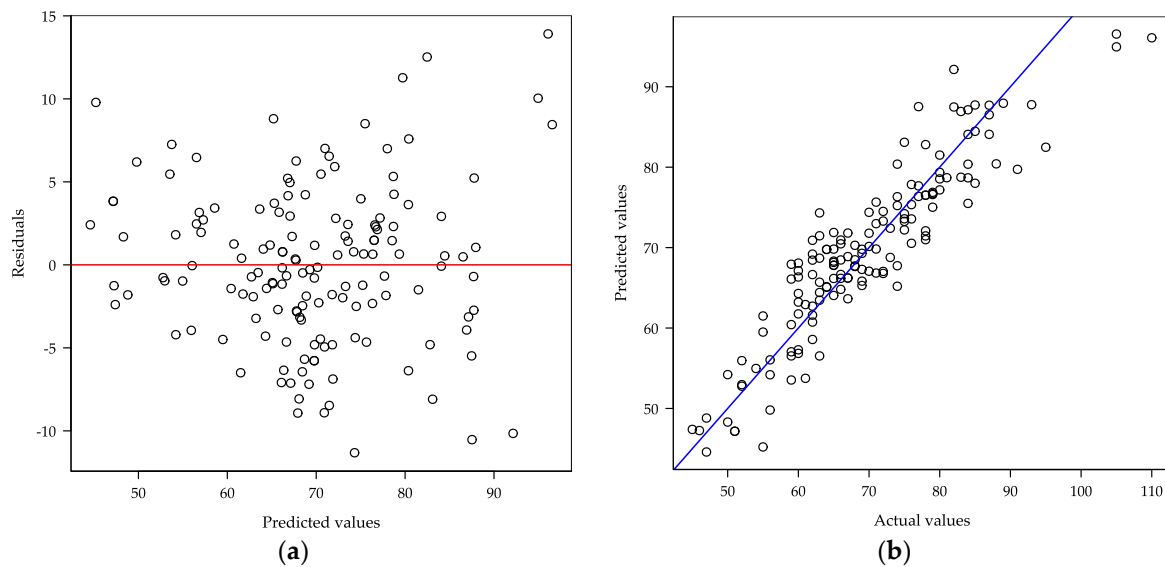


Figure 7. Model diagnostics for seedlings CM: (a) residuals vs. predicted values and (b) actual values vs. predicted values.

3.2. Mechanical Tests

3.2.1. Adhesion Force

Figure 8 presents the mean AF required to extract the seedlings from the germination trays for the three tomato hybrids evaluated. The lowest AF values recorded were 1.698 N for H1, 2.841 N for H2, and 0.978 N for H3. Conversely, the highest values reached 8.571 N, 13.178 N, and 11.443 N for H1, H2, and H3, respectively.

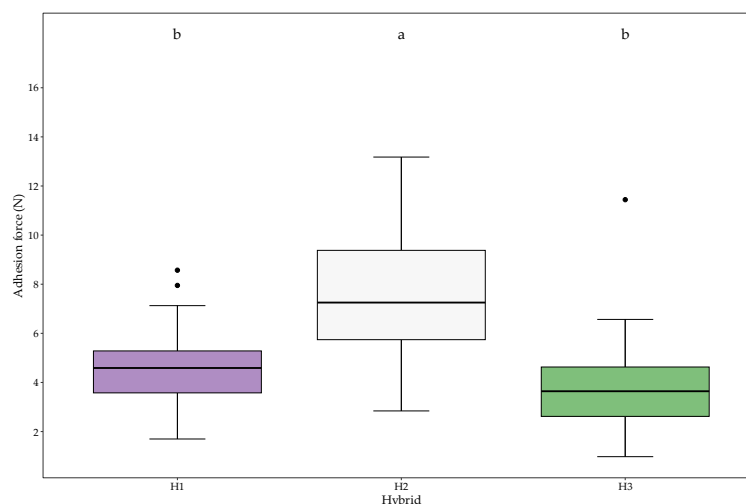


Figure 8. AF of tomato seedlings in cavities of germination trays. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences (p -value $< 2 \times 10^{-16}$) among hybrids according to Tukey's test.

Figure 9 illustrates the types of damage observed during the AF test. Out of the 150 seedlings evaluated, 2% exhibited some form of damage across all three hybrids. Figure 9a shows damage caused by the RB breaking in half. Figure 9b displays damage resulting from an inadequate distribution of the substrate within the RB cavity, which adversely affected

proper seedling development. Lastly, Figure 9c depicts a seedling that, despite being the same chronological age as the others, exhibited below-average dimensions and an underdeveloped root system, which failed to fully occupy and stabilize the substrate within the cavity.

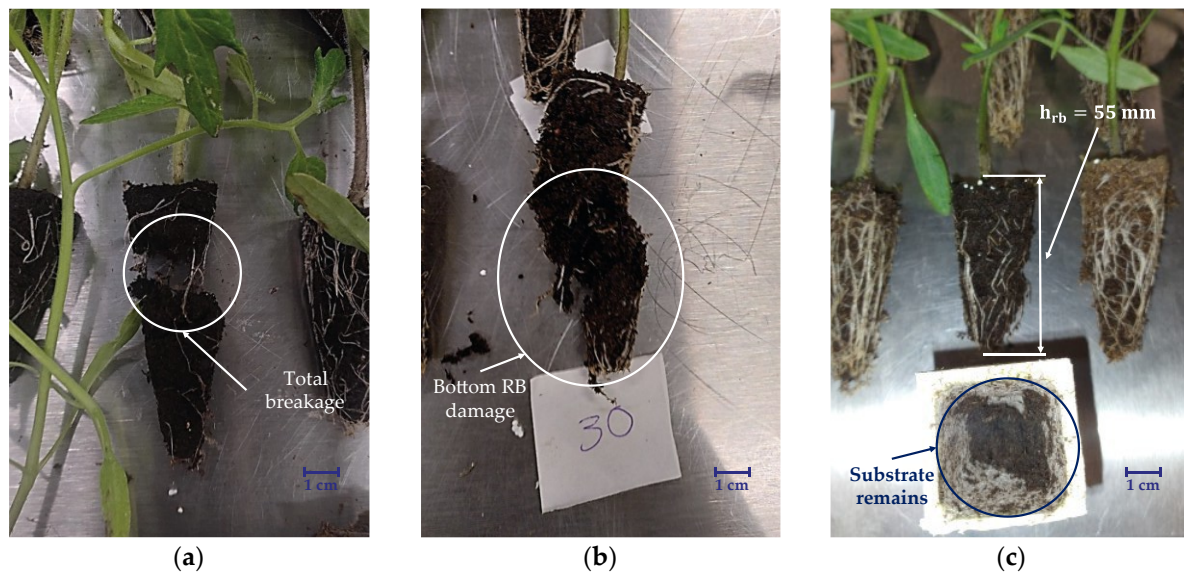


Figure 9. Damage observed in seedlings subjected to the AF test: (a) RB breakage in an H1 seedling, (b) RB damage in an H2 seedling, and (c) residual substrate in the cavity due to an incomplete root system in an H3 seedling.

3.2.2. Root Ball Punching Force

The results of the RBPF test are shown in Figure 10. Regarding the minimum final load values, the following results were obtained: 0.18 N for H1, 0.16 N for H2, and 0.10 N for H3. On the other hand, atypical maximum values were recorded: 0.80 N for H1, 1.06 N for H2, and 0.59 N for H3.

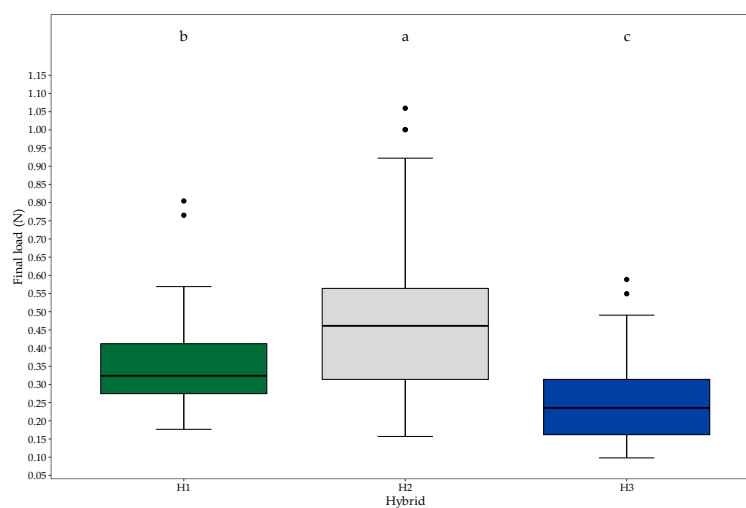


Figure 10. Average final loads from the RBPF test on seedlings. Different lowercase letters (a, b, and c) indicate statistically significant differences between hybrids (p -value $< 6.66 \times 10^{-10}$) according to Tukey's test.

3.2.3. Static Friction Coefficient

Figure 11 shows the static friction coefficient (SFC) results for seedlings of the three hybrids on four different materials. No significant difference ($p < 0.725$ and $p < 0.959$) was observed in the SFC among the three hybrids on GSS and SBR. However, a significant difference (p -value < 0.0455 * y p -value < 0.000964 **), was recorded in the SFC between H1 and H2 on the plastic surface and plywood (Figure 11a).

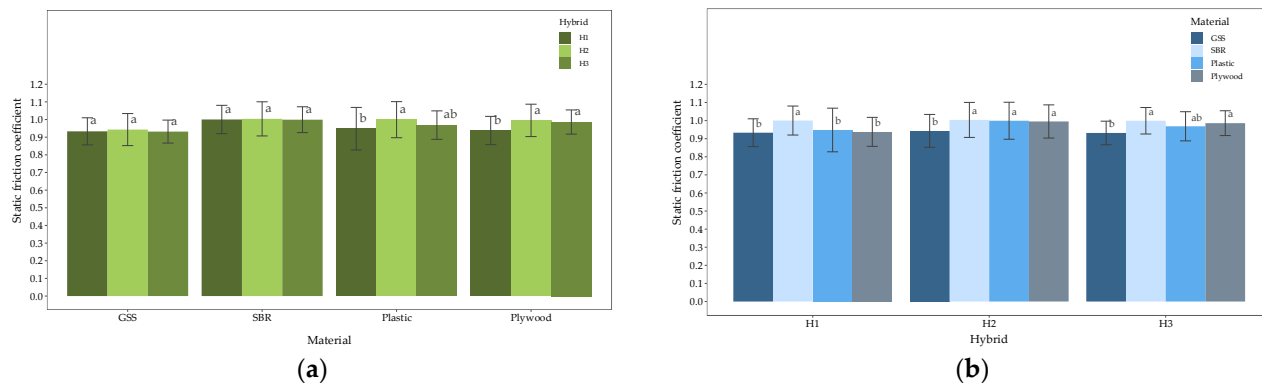


Figure 11. Mean comparison of SFC values using Tukey's test: (a) by hybrid on each material and (b) by material for each hybrid. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences.

On the other hand, Figure 11b shows the SFC results for each material and each hybrid. In the case of SBR, the highest static friction coefficients were recorded, with values ranging from 1.25 to 1.27 for the three hybrids.

3.2.4. Drop Test

Figure 12 shows the results of the residual substrate remaining on the GSS during the seedling DT. In this test, conducted from a height of 250 mm, the minimum residual substrate values were 0.0, 0.01, and 0.01 g for H1, H2, and H3, respectively. In contrast, the maximum residual substrate values were 0.45, 0.21, and 0.56 g for H1, H2, and H3, respectively.

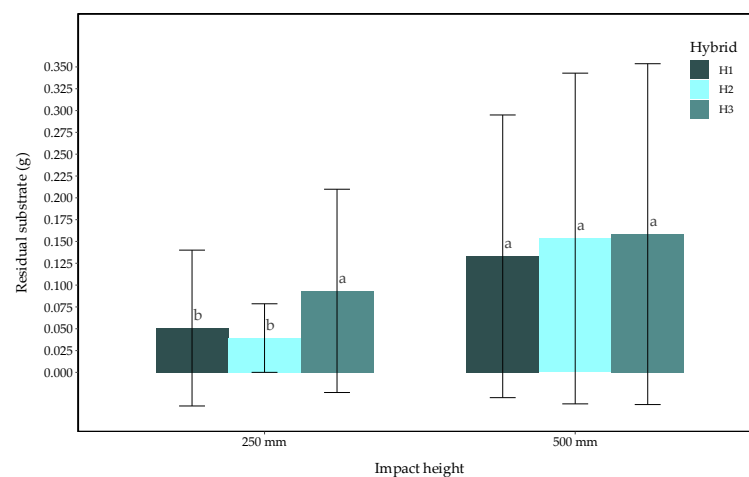


Figure 12. Residual substrate amount left on the galvanized steel sheet (GSS) during the DT. Different lowercase letters (a and b) indicate significant differences among the F1 hybrids studied.

When the test was conducted from a height of 500 mm, the minimum residual substrate values were 0.01, 0.02, and 0.01 g for H1, H2, and H3, respectively, while the maximum residual substrate values were 0.80, 0.75, and 0.98 g for H1, H2, and H3, respectively. The maximum residual substrate values at 500 mm accounted for 8.22%, 8.60%, and 11.96% of the average RB weight for H1, H2, and H3, respectively.

On the other hand, mechanical damage was considered when the RB of the seedling was deformed by more than 50% of its h_{rb} and when there was detachment of the substrate from the root system. At a height of 250 mm, no significant damage was observed in the seedlings. However, at a height of 500 mm, damage was recorded in the seedlings of all three evaluated hybrids: seven from H1, nine from H2, and nine from H3.

4. Discussion

4.1. Physical Characteristics

4.1.1. Number of Leaves, Total Height and Canopy

It was observed that h_t and the canopy dimension along the X-axis of the seedling varied depending on the location of its cavity in the germination tray. Seedlings located on the edges had a larger canopy in relation to h_t , while seedlings in the center showed a higher h_t with a smaller canopy. This phenomenon showed the edge effect among the seedlings, indicating competition for space. Gallegos-Cedillo et al. [29] and Xu et al. [30] documented the occurrence of edge effects in multicell tray propagation systems, attributing growth variability to the distinct microenvironment experienced by seedlings in peripheral cavities—characterized by increased light exposure, enhanced aeration, and reduced lateral competition. Notably, seedlings located at the edges tend to develop a broader canopy with relatively shorter height, whereas those positioned centrally often exhibit greater stem elongation, possibly as an adaptive response to shading and higher competition for light [31–33]. Although statistical stratification based on cavity position was not conducted in the present work, the growth patterns observed are aligned with those reported in the literature, thereby providing a solid theoretical foundation to acknowledge edge effects as a relevant factor influencing early seedling morphology.

Given this variability, it is essential to know the minimum and maximum canopy dimensions when designing a transplanter. This information is crucial for developing the holding mechanisms and other prototype components needed to handle the seedlings during transplantation without compromising their physical integrity. Special attention must be given to the leaves, as they extend around the main body of the seedling, and sufficient clearance is required to prevent damage. Injuring the leaves can increase post-transplant stress, delaying the seedling's adaptation and growth.

4.1.2. Stem and Root Ball Dimensions

The root balls of the seedlings showed a tendency to crumble when extracted from germination trays. This behavior is influenced by several factors, including the percentage and properties of the substrate components, the degree of compaction of the substrate, the development of the root system, and the MC. The composition of the substrate primarily influences the mechanical properties of the RB during seedling extraction, handling, and transplanting. The specific components and their proportions in RB vary depending on the substrate selected, for instance, in the substrate formulation of 80% peat moss, 10% agrolite, and 10% vermiculite. Peat moss contributes to the substrate's water retention capacity.

Agrolite improves aeration and drainage, which can reduce compaction and enhance root development. Vermiculite is known for its moisture retention properties. Together, these components interact to influence the RB's integrity, affecting its performance during transplanting. Therefore, the different substrates can alter water retention, aeration, and root growth dynamics.

On the other hand, the average diameter obtained for H2 and H3 is similar to that reported by Abubakar et al. [15] for the Roma VF variety. In contrast, the authors of refs [16] and [14] reported significantly lower average diameters of 2.65 mm for the Hinsona variety and 2.64 mm for the Ansal hybrid, respectively.

4.1.3. Weight and Moisture Content

Several studies reported w_t values higher than those found in this study. For example, Khadatkar et al. [12] and Magar et al. [14] reported average w_t values of 13.1 g and 14.41 g for the Abhilash tomato variety and the Ansal hybrid, respectively. In contrast, other authors, such as Abubakar et al. [15] and Sharma et al. [16], reported lower w_t values, with 6.28 g and 10.47 g, respectively.

Regarding MC, Magar et al. [14] found that the root balls and complete seedlings studied had a higher average MC, with values of 83.89% and 84.26%, respectively. This higher MC in the root balls could be related to the time and volume of water used for irrigation before the experiment. To optimize irrigation and ensure uniform water distribution in each cavity, the implementation of an irrigator is suggested to guarantee that the substrates are fully moist, as recommended by Maynard et al. [34].

4.1.4. Center of Mass and Oscillation Period

In this study, a significant difference was observed in the center of mass (CM) location among hybrids, determined through d_c . This difference is closely related to two main factors: h_t of the seedling and RB weight. The RB weight, in turn, directly depends on its MC: the higher the MC, the greater the RB weight, which affects the location of the seedling's CM. However, the multiple linear regression model used in this study also considered other important variables to estimate the CM.

Oscillation tests on seedlings have been conducted, with Muñoz et al. [25] reporting results similar to those of this study, with a T of 0.86 s for purple cabbage and 0.94 s for *Physalis philadelphica*. It was found that d_p and T of the seedlings are strongly correlated: the greater the d_p , the longer the T. This period is also influenced by the w_t and h_t of the seedlings, highlighting the interrelationship between these variables in the dynamic behavior of seedlings.

4.2. Mechanical Tests

4.2.1. Adhesion Force

AF obtained in this study was higher than that reported by other authors in previous research. For example, Han et al. [35] had an AF of 2.19 N for 38-day-old tomato seedlings; the author of ref [14] reported an AF of 1.43 N for 30-day-old tomato seedlings; Jin et al. [36] recorded an AF of 2.7 N for 40-day-old tomato seedlings; and Han et al. [37] evaluated seedlings of other species, with AF values of 1.89 N for cucumber, 2.06 N for bell pepper, and 1.87 N for cauliflower seedlings. The higher AF values observed in this study, compared to those reported by previous authors, may be attributed to differences in substrate composition,

the physical properties of the seedlings, and the tray materials used. While previous studies employed plastic germination trays, this investigation utilized polystyrene trays, which exhibit distinct physical–mechanical characteristics such as density, surface roughness, and thermal conductivity—factors that can significantly influence fermentation dynamics and microbial development. Additionally, the physical attributes of the root plug—including its moisture content, age, root system architecture, and substrate composition—can alter its internal structure and mechanical resistance, thereby directly impacting AF outcomes. A thorough characterization of these factors is essential to elucidate the mechanisms underlying the differences in AF values across studies.

However, some studies report results similar to those in this study. For instance, Ji et al. [38] reported an average AF of 5.724 N for 30-day-old tomato seedlings. According to Jiang et al. [39], AF involves variables such as MC of the substrate, components of substrate used for RB, and root system development of seedlings. Additionally, the material of the germination tray could also influence the AF. In this study, Styrofoam germination trays were used, with cavities that are not completely smooth, unlike plastic germination tray cavities. With these types of trays, seedlings with more developed root systems had higher AF values than the average.

The damage to the root balls was minimal, affecting only three seedlings, even though no prior treatment had been applied. It is important to highlight that, as a common practice, trays are usually tapped at the bottom to facilitate seedling extraction; however, in this case, it was not necessary to loosen them.

4.2.2. Root Ball Punching Force

H2 stood out in the study, followed by H1, and in third place, H3. This could be attributed to the fact that H2 seedlings showed greater h_t compared to the other hybrids, which promoted a more robust development of the root system. This root system requires a higher RBPF to penetrate the RB during these tests.

A key factor influencing the variation in RBPF is the MC and the extent of root system development within the RB of each hybrid's seedlings, as these parameters significantly affect RBPF values. Surpassing the RBPF thresholds illustrated in Figure 10 may lead to seedling damage, particularly to the root structure. This risk is notably affected by the drainage hole diameter (5 mm) in the germination tray cavities; consequently, the ejector's diameter must not exceed this size, as doing so could impair the tray's drainage system. It is recommended that the ejector be constructed from a deformable material capable of absorbing part of the impact force, thereby preserving RB integrity and minimizing mechanical damage to the seedlings.

The ejector rod's design plays a critical role in mitigating RB damage. As emphasized by Chen et al. [40], an effective ejector rod design incorporates a rounded geometry, appropriate diameter, and controlled movement speed to reduce injury during seedling extraction. These design considerations contribute to higher post-transplant survival rates and enhance seedling development by maintaining the integrity of the root system.

From a practical perspective, this study provides valuable insights into the design of transplanting machinery. Understanding the relationship between RBPF and RB characteristics supports the development of adjustable ejector systems tailored to varying seedling conditions. Such innovations have the potential to enhance the efficiency of transplanting operations and reduce seedling damage.

Future research should focus on the development of advanced extraction systems, considering the variables analyzed in this section. Such efforts will facilitate the creation of more efficient, reliable, and sustainable transplanting solutions, ultimately contributing to advancements in agricultural mechanization.

4.2.3. Static Friction Coefficient

Based on the results in Figure 11a, no significant differences in SFC were found between GSS and SBR materials, primarily due to the homogeneity of MC in the seedlings' root balls and the surface properties of the evaluated materials. However, the variability of SFC in plastic and plywood (Figure 11a) can be attributed to the lack of uniformity in the MC of the root balls, which leads to uneven interaction with the surfaces. Additionally, the plywood surface showed irregularities, contrasting with the uniformity observed in GSS and SBR. On the other hand, as shown in Figure 11b, the higher SFC values in SBR material can be explained by the interaction of MC in the root balls, which enhances adhesion between the RB and the SBR surface. Meanwhile, GSS exhibited the lowest SFC among the four materials evaluated, which is advantageous for seedling sliding during mechanized handling and transplantation. A lower SFC reduces the resistance between the root plug and the contact surface, allowing seedlings to slide more readily under the influence of gravity or minimal external force. This, in turn, decreases the angle or mechanical input required to initiate movement, thereby improving operational efficiency, minimizing mechanical stress on the seedlings, and enabling more reliable and gentle transplantation procedures.

There are previous studies that reported SFC values with certain similarities and differences compared to those obtained in this research. For example, Khadatkar et al. [12] and Magar et al. [14] reported average SFC values of 0.79 and 0.73, respectively, for GSS. In contrast, the average SFC for GSS in this study was 0.94 for the three hybrids, showing consistency with the findings of Abubakar et al. [15], who reported an average SFC of 0.96 for GSS.

4.2.4. Drop Test

The results shown in Figure 12 reveal significant variability, which can be attributed to multiple factors. One of the main factors is the MC of root balls, which affects the consistency of the substrate as well as the development of the seedlings' root systems. These factors contribute to the heterogeneity of the seedlings, both in their distribution within germination trays and in their natural variations. Moreover, the position of the seedlings within the tray also plays a role. Regarding the influence of drop height, it was observed that as the height increased, seedlings became more susceptible to mechanical damage to root balls. This damage was primarily caused by increased deformation of the RB upon impact with the collision surface, resulting in a larger impact area. This phenomenon aligns with the findings of Bai et al. [41], who reported that greater drop heights intensify contact with the collision surface, increasing the likelihood of damage. A total of 16.66% of the seedlings subjected to the drop test from height h_2 exhibited measurable deformation in the dimensions of the RB. In this study, mechanical damage was classified as unacceptable when deformation exceeded 50% of the RB's original height (h_{rb}), as such structural compromise prevents successful transplanting. Excessive deformation exposes the root system, leading to transplant shock and physiological stress in the seedling—effects comparable to those observed when the substrate becomes dislodged or fragmented.

In this study, which focused exclusively on the physical and mechanical properties of seedlings at 30 days of age from sowing, germination time was not specifically monitored or analyzed. However, we recognize that the germination phase plays a critical role in determining seedling vigor and subsequent uniformity. Therefore, it is necessary to conduct a complementary study to evaluate germination dynamics, including metrics such as germination rate, mean germination time, and synchronization, to better understand their influence on early morphological development and transplant performance. Variability in germination time affects the seedlings' initial growth and is closely related to the sowing date, which is a critical factor due to Mexico's marked seasonality.

Additionally, the location of the cavities in germination trays should be considered, as their physical properties may vary depending on their position, thereby influencing their mechanical properties. These differences can impact root development and affect the mechanical properties of the seedlings, highlighting the importance of proper management during the initial growth phase. Another key aspect is irrigation management. It is crucial to regulate the applied water layer and ensure uniform moisture distribution in the RB, regardless of the cavity's position in the germination tray. These measures are essential for ensuring uniform seedling growth, promoting successful transplant adaptation, and optimizing agronomic performance in later stages.

5. Conclusions

Tomato seedlings are susceptible to mechanical damage during automatic transplanting, which can lead to economic losses. Therefore, analyzing and understanding their physical-mechanical properties is essential, as these properties determine their behavior under the forces applied during handling. Not only do these properties help predict the seedlings' response to mechanical stress, but they also serve as key parameters for the design, construction, and evaluation of semi-automatic and automatic transplanters.

Physical properties of seedlings play a crucial role in the different developmental phases of an automatic transplanter. Among these, the overall dimensions of the seedling are essential for prototype design. The most relevant variables include h_t , canopy dimensions, and stem dimensions, which vary depending on their position within the germination tray. In this study, H2 seedlings had the largest dimensions, followed by H1, and lastly, H3. Additionally, seedling's w_t showed a direct correlation with MC: as the MC of root balls decreased, w_t of seedlings also decreased, because the foliage accounts for only 30% of w_t . Furthermore, MC significantly influences the determination of RB weight, CM, stem diameter, distance d_e , and the oscillation period (T) of seedlings, regardless of the hybrid analyzed.

Regarding mechanical properties, they were primarily influenced by MC, h_t , the interaction between the seedling and the material type, and the seedling's position within the germination tray. The AF required to extract seedlings from the tray was directly related to the MC and root system development, the latter being associated with the seedling's h_t . H2 seedlings had the highest AF values, followed by H1, and finally H3. As for SFC, no significant differences were found between GSS and SBR materials. However, in plywood, H2 and H3 showed higher values, while GSS recorded the lowest SFC values among the four materials evaluated, with no significant differences between hybrids. Moreover, in the DT from height h_2 , mechanical damage to root balls was influenced by MC, root development, and w_t of seedlings, which are key factors in evaluating seedling resistance during handling and adaptation to automatic transplanting.

Knowledge of these variables is critical for the design and engineering of the prototype, including the definition of its dimensions, selection of suitable materials, and execution of the calculations required for the seedling extraction and gripping mechanism, the feeding system, the power transmission unit, the speed control module, and the positioning and placement mechanism at the transplanting site. Accurate knowledge of these parameters enhances mechanical design, equipment efficiency, and contributes to reducing both operational complexity and production costs.

This study provides a solid foundation for future research on the automatic transplanting of tomato seedlings in Central Mexico. Its approach contributes to the development of new prototypes aimed at enhancing efficiency and productivity, particularly for small- and medium-sized producers, driving technological innovation in the agricultural sector.

Author Contributions: Conceptualization, G.G., M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; methodology, G.G., M.H.-R. and P.C.; software, G.G.; validation, M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; formal analysis, G.G., M.H.-R. and P.C.; investigation, G.G., M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; resources, G.G., M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; data curation, G.G. and M.H.-R.; writing—original draft preparation, G.G. and M.H.-R.; writing—review and editing, G.G., M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; visualization, G.G.; supervision, M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; project administration, M.H.-R., P.C. and N.V.-L.; funding acquisition, M.H.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding. The first author received from the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) the grant number 83853. The APC was funded for the Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) at Universidad Autónoma Chapingo.

Data Availability Statement: The datasets used and analyzed during this research study are available upon request from the corresponding author.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for the doctoral scholarship granted with support number 83853. They also thank the Universidad Autónoma Chapingo and the Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua for the facilities provided for this research article. They also thank the Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, as well as the people in charge of the Biological Materials Laboratory, Carlos Alberto Villaseñor and Ma. del Rosario Venegas for the facilities and access they provided for the experimental tests of this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

AF	Adhesion force
ANOVA	Analysis of variance
ASNS	American Standard for Nursery Stock
ASAE	American Society of Association Executives
BIC	Bayesian Information Criterion
CM	Center of mass
SECIHTI	Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CV	Coefficient of variation
DT	Drop test
GSS	Galvanized steel sheet
H1	Natalie F1 hybrid
H2	CID F1 hybrid
H3	Gavilán F1 hybrid
MA	Massachusetts
MC	Moisture content
R_a^2	Adjusted coefficient of determination
RB	Root ball
RBPF	Root ball punching force
SBR	Commercial neoprene
SD	Standard Deviation
SFC	Static friction coefficient
T	Oscillation period
USA	United States American
VIF	Variance inflation factors
$\bar{x}$	Mean

References

1. Global Alliance for Improved Nutrition (GAIN). *Tomatoes: The World's Most Popular Vegetable*. Available online: <https://www.gainhealth.org/resources/reports-and-publications/tomatoes-worlds-most-popular-vegetable> (accessed on 3 October 2024).
2. Akotowanou, O.; Adjou, E.; Olubi, A.; Kougblenou, S.; Ahoussi, E.; Sohounhloué, D. The Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Community Development: An Overview Focused on Nutritional Properties, Agronomic Constraints, Recent Achievements and Future Prospective. *Int. J. Front. Biol. Pharm. Res.* **2022**, *3*, 8–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.53294/ijfbpr.2022.3.2.0061>.
3. Padmanabhan, P.; Cheema, A.; Paliyath, G. Solanaceous Fruits Including Tomato, Eggplant, and Peppers. In *Encyclopedia of Food and Health*; Caballero, B., Finglas, P.M., Toldrá, F., Eds.; Academic Press: Oxford, UK, 2016; pp. 24–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00696-6>.
4. Shahbandeh, M. *Global Production of Vegetables in 2022, by Type*; Statista: Hamburg, Germany, 2022.
5. SIAP. *Panorama Agroalimentario 2018–2024*; SIAP: Ciudad de México, Mexico, 2024. Available online: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035> (accessed on 5 October 2024).
6. Javanmardi, J.; Moradiani, M. Tomato Transplant Production Method Affects Plant Development and Field Performance. *Int. J. Veg. Sci.* **2017**, *23*, 31–41. <https://doi.org/10.1080/19315260.2016.1169240>.
7. Nage, S.M.; Mathur, S.M.; Meena, S.S. Vegetable Transplanters for India: A Review. *Agric. Sci. Dig.* **2023**, *43*, 129–134. <https://doi.org/10.18805/ag.d-5548>.
8. Grande, G.; Hidalgo-Reyes, M.; Cruz, P.; Velázquez, N. Evolution and Technological Development of Automatic Transplanters for Vegetables: A Review. *INMATEH-Agric. Eng.* **2024**, *72*, 830–847. <https://doi.org/https://doi.org/10.35633/inmateh-72-74>.
9. Pandirwar, A.; Kumar, A.; Mani, I.; Islam, S. Biometric Properties of Onion Seedlings Relevant to the Development of Onion Seedling Transplanter. *J. Appl. Nat. Sci.* **2015**, *7*, 768–773.
10. Zeng, F.; Li, X.; Bai, H.; Cui, J.; Liu, X.; Zhang, Y. Experimental Study on Pot Damage and Contact Stress Distribution Characteristics of Oil Sunflower Plug Seedlings. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 10889. <https://doi.org/10.3390/app122110889>.
11. Pagare, V.; Din, M.; Mehta, C.R.; Nandede, B.M.; Kumar, M. Morphological and Mechanical Characteristics of Onion Seedlings Insight to Mechanized Transplantation. *Indian J. Agric. Res.* **2022**, *58* (6), 1235–1243. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-5844>.
12. Khadatkhar, A.; Gaikwad, B.; Pandirwar, A. Biometric Properties of Plug Vegetable Seedlings Relevant to the Design of Vegetable Transplanter. *J. Agric. Eng.* **2020**, *57*, 16–24.
13. Shuangyan, H.; Minjuan, H.; Wenyi, Z. Experimental and Simulation Study on Mechanical Properties of Stem of Pepper Hole Seedlings. *J. Chin. Agric. Mech.* **2022**, *43*, 9–18. <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2022.03.002>.

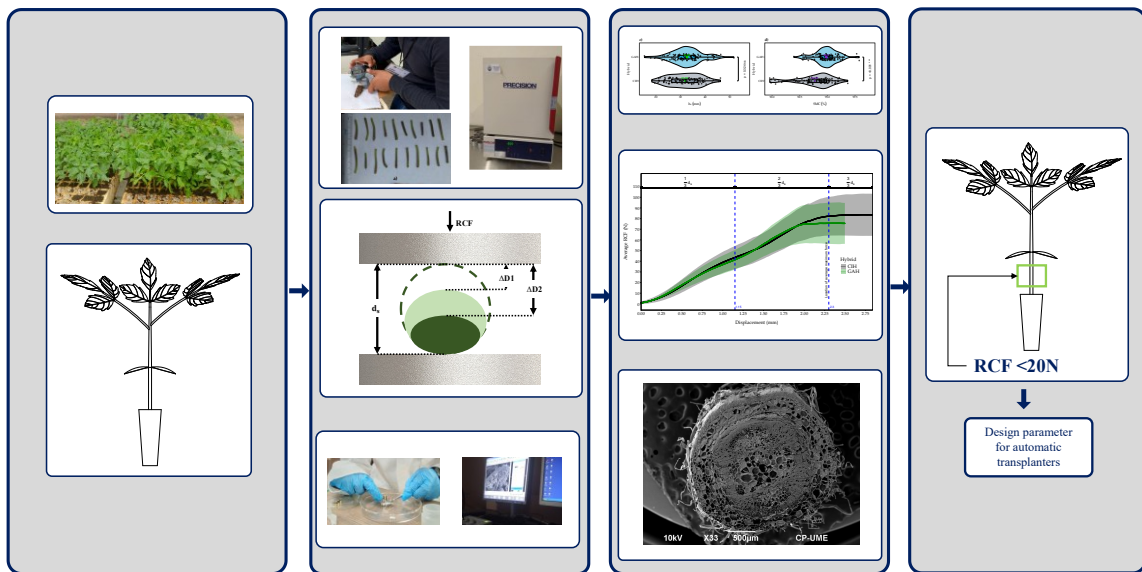
14. Magar, A.P.; Nalawade, S.M.; Walunj, A.A.; Khadatkhar, A.; Bhangare, S.C.; Bhalekar, M.N.; Nimbalkar, C.A.; Gaikwad, B.B. Engineering Properties of Some Plug-Type Vegetable Seedlings for Development of Automatic Vegetable Transplanter. *J. Agric. Eng.* **2023**, *60*, 1–13. <https://doi.org/10.52151/jae2023601.1792>.
15. Abubakar, A.J.; Iya, S.A.; Aliyu, B.; Tashiwa, Y.I. Determination of Physico-Mechanical Properties of Tomato Seedlings for Design of a Tomato Transplanter. *J. Agric. Eng. Technol.* **2020**, *25*, 106–122.
16. Sharma, A.; Khar, S.; Chaudhary, D.; Thakur, P. Study of Biometric Attributes of Plug Type Tomato Seedlings Pertinent to Transplanter Design. *Indian J. Ecol.* **2023**, *50*, 503–507. <https://doi.org/10.55362/IJE/2023/3926>.
17. Han, L.; Mao, H.; Hu, J.; Miao, X.; Tian, K.; Yang, X. Experiment on Mechanical Property of Seedling Pot for Automatic Transplanter. *Nongye Gongcheng Xuebao/Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* **2013**, *29*, 24–29.
18. Tian, Z.; Gao, A.; Ma, W.; Jiang, H.; Cao, D.; Wang, W.; Qian, J.; Xu, L. Modeling the Mechanical Properties of Root–Substrate Interaction with a Transplanter Using Artificial Neural Networks. *Agriculture* **2024**, *14*, 651. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050651>.
19. Cui, J.; Li, X.; Zeng, F.; Bai, H. Study on Contact Stress Distribution Characteristics and Damage of Plug Seedlings Based on Flexible Pressure Sensor. *Sensors* **2023**, *23*, 8175. <https://doi.org/10.3390/s23198175>.
20. Zeng, F.; Cui, J.; Li, X.; Bai, H. Establishment of the Interaction Simulation Model between Plug Seedlings and Soil. *Agronomy* **2024**, *14*, 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010004>.
21. Cui, J.; Li, X.; Zeng, F.; Bai, H.; Zhang, Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 6278. <https://doi.org/10.3390/app13106278>.
22. American Horticultural Industry Association d/b/a American Hort an ANSI Accredited Standard Developing Organization. *American Standard for Nursery Stock (ANS)*; AmericanHort: Stella Court, Columbus, OH, USA, 2014.
23. ASAE S358.3. Moisture Measurement Forages; American Society and Biological Engineers Standards: St. Joseph, MI, USA, 2012.
24. Paneque, P.P.; López, G.; Mayans, P.R.; Muñoz, F.; Gaytán, J.G. *Fundamentos Teóricos y Análisis de Máquinas Agrícolas*, 1st ed.; Universidad Autónoma Chapingo: **Texcoco**, Mexico, 2017.
25. Muñoz, F.; Gaytán, J.G.; Serwatowsky, R.; Gracia, C. Trasplante Mecanizado de Hortalizas Mechanized Transplant of Vegetables. *Rev. Cienc. Técnicas Agropecu.* **2006**, *15*, 5–11.
26. Cruz, P.; García, S.; Márquez, C.; López, G. Determinación de Las Propiedades Físico-Mecánicas Para El Descascarado de Las Cápsulas de La Higuierilla (*Ricinus communis* L.). *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* **2012**, *3*, 644–649.
27. Onwe, D.N.; Umani, K.C.; Olosunde, W.A.; Ossom, I.S. Comparative Analysis of Moisture-Dependent Physical and Mechanical Properties of Two Varieties of African Star Apple (*Chrysophyllum Albidum*) Seeds Relevant in Engineering Design. *Sci. Afr.* **2020**, *8*, e00303. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00303>.
28. Mohsenin, N.N. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*; Second ed.; Gordon and Breach Science Publishers, Inc.: New York, NY, USA, 1986.
29. Gallegos-Cedillo, V.M.; Nájera, C.; Gruda, N.S.; Signore, A.; Gallegos, J.; Rodríguez, R.; Ochoa, J.; Egea-Gilabert, C.; Fernández, J.A. An In-Depth Analysis of Sustainable Practices in Vegetable Seedlings Nurseries: A Review. *Sci. Hortic.* **2024**, *334*, 113342. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113342>.
30. Xu, X.; Yang, F.; Song, J.; Zhang, R.; Cai, W. Does the Daily Light Integral Influence the Sowing Density of Tomato Plug Seedlings in a Controlled Environment? *Horticulturae* **2024**, *10*, 730. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070730>.
31. Bebre, I.; Riebl, H.; Annighöfer, P. Seedling Growth and Biomass Production under Different Light Availability Levels and Competition Types. *Forests* **2021**, *12*, 1376. <https://doi.org/10.3390/f12101376>.
32. Bauer, S.; Wyszomirski, T.; Berger, U.; Hildenbrandt, H.; Grimm, V. Asymmetric Competition as a Natural Outcome of Neighbour Interactions among Plants: Results from the Field-of-Neighbourhood Modelling Approach. *Plant Ecol.* **2004**, *170*, 135–145. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000019041.42440.ea>.
33. Huber, M.; Nieuwendijk, N.M.; Pantazopoulou, C.K.; Pierik, R. Light Signalling Shapes Plant–Plant Interactions in Dense Canopies. *Plant Cell Environ.* **2021**, *44*, 1014–1029. <https://doi.org/10.1111/pce.13912>.
34. Maynard, E.T.; Guan, W.; Langenhoven, P.; Hoagland, L. Tomato Seedling Performance in Commercial Organic Growing Media. *Horttechnology* **2024**, *34*, 80–91. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH05244-23>.

35. Han, L.; Xiang, D.; Xu, Q.; Du, X.; Ma, G.; Mao, H. Development of Simplified Seedling Transplanting Device for Supporting Efficient Production of Vegetable Raw Materials. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 10022. <https://doi.org/10.3390/app131810022>.
36. Jin, X.; Li, D.Y.; Ma, H.; Ji, J.T.; Zhao, K.X.; Pang, J. Development of Single Row Automatic Transplanting Device for Potted Vegetable Seedlings. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2018**, *11*, 67–75. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3969>.
37. Han, L.; Ma, H.; Mo, M.; Kumi, F.K.; Hu, J.; Mao, H. Design and Test of an Efficient Seedling Pick-up Device with a Combination of Air Jet Ejection and Mechanical Action. *J. Agric. Eng.* **2024**, *55* (3), 1575. <https://doi.org/10.4081/jae.2024.1575>.
38. Ji, D.; Liu, L.; Zeng, F.; Zhang, G.; Liu, Y.; Diao, H.; Tian, S.; Zhao, Z. Design and Experimental Study of a Traction Double-Row Automatic Transplanter for Solanum Lycopersicum Seedlings. *Horticulturae* **2024**, *10*, 692. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070692>.
39. Jiang, Z.; Hu, Y.; Jiang, H.; Tong, J. Design and Force Analysis of End-Effector for Plug Seedling Transplanter. *PLoS Comput. Biol.* **2017**, *12* (7), e0180229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180229>.
40. Chen, J.; Zhou, H.; Che, H.; Liu, Y.; Li, P. Optimal Design of Ejector Belt Seedling Collecting Mechanism Based on Edem. *INMATEH Agric. Eng.* **2023**, *69*, 109–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.35633/inmateh-69-10>.
41. Bai, H.; Li, X.; Zeng, F.; Cui, J.; Zhang, Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System. *Horticulturae* **2022**, *8*, 1080. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111080>.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

5. COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE TALLOS DE PLÁNTULAS DE JITOMATE PARA EL DISEÑO DE MECANISMOS DE SUJECCIÓN DE TRASPLANTE AUTOMÁTICO

Este capítulo presenta un estudio sobre el comportamiento biomecánico de los tallos de plántulas de jitomate de dos híbridos comerciales, *CID* y *Gavilán*, mediante la evaluación de su respuesta ante fuerzas de compresión radial. Este parámetro resulta fundamental para determinar la fuerza de sujeción que los tallos pueden soportar durante su manipulación sin sufrir daños mecánicos. Los resultados obtenidos permiten establecer criterios técnicos para el diseño y optimización de mecanismos de agarre empleados en sistemas automáticos de trasplante, contribuyendo a definir condiciones de operación que permitan sujetar, manipular y transferir las plántulas de manera segura, precisa y eficiente durante el trasplante.



Estado: enviado a *Italian Journal of Agronomy*

Comportamiento biomecánico de tallos de plántulas de jitomate para el diseño de mecanismos de sujeción de trasplante automático

Gaudencio Grande^a, Martín Hidalgo-Reyes^{b,*}, Pedro Cruz^b, Noé Velázquez-López^c, Raúl Vidal García-Hernández^d, Francisco Garibaldi-Márquez^d

^aPosgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo 56230, México, gaussgam@gmail.com

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo 56230, México; *Autor de correspondencia: mhidalgor@chapingo.mx; pcruz@chapingo.mx

^cDepartamento de Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo 56230, México; nvelazquezl@chapingo.mx

^dInstituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México – Campo Experimental Pabellón, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México; garcia.raul@inifap.gob.mx; garibaldi.francisco@inifap.gob.mx

Resumen

La etapa crítica del trasplante automático es la extracción de las plántulas de las charolas germinadoras. De esta manera, uno de los métodos para la recolección de las plántulas es a través de los tallos y la determinación de la fuerza de sujeción es a través de la fuerza de compresión radial (RCF) de los tallos de plántulas de jitomate. El objetivo de este estudio fue la determinación de RCF en dos fases -a un $1/3$ del diámetro del tallo d_s (RCF1) y a su punto de ruptura (RCF2)-, en plántulas de jitomate correspondientes a dos híbridos F1 (CID y Gavilán) bajo cinco velocidades de carga (LV). Se estableció un diseño factorial de 2×5 , considerando los dos híbridos de jitomate y cinco niveles de LV, con 10 tratamientos. Los resultados mostraron que la LV no influye al someter los tallos de las plántulas de jitomate a una RCF. Los rangos de RCF1 y RCF2 oscilaron entre 15.903 y 94.410 N y 40.296 y 45.619 N, respectivamente. No se detectaron diferencias significativas en la RCF1 respecto a los híbridos, mientras que sí se encontraron diferencias significativas en la RCF2. Esto debido a que en la primera fase sobresalen variables como la d_s , altura y contenido de humedad, y en la fase final, además de estas, depende de otras características intrínsecas como genética de cada híbrido. El 70 % del total de las muestras estudiadas no superaron $1/3 d_s$ para la RCF1 y solo el 0.5 % de las muestras está por debajo de $1/3 d_s$, lo que garantiza que mientras no superen una RCF permisible a 20 N, no habrá riesgo de daño mecánico en las plántulas de jitomate al sujetarse por los tallos. Esta investigación proporciona información sólida para el diseño de efectores finales de sistemas de recolección de plántulas de jitomate y evitar el daño mecánico de las mismas para sistemas automáticos de trasplante.

1. Introducción

En 2023, la producción mundial de hortalizas, incluyendo cultivos de raíz y tubérculos, representó el 25.26 % de la producción agrícola total (FAO, 2023). En este contexto, las hortalizas constituyen un componente estratégico de los sistemas agroalimentarios, no solo porque garantizan la seguridad alimentaria, al ser fuente de vitaminas y minerales, sino también por su capacidad de generar ingresos económicos en unidades de producción de pequeña escala (< 1 ha) (M. Ahmed et al., 2024; N. Ahmed et al., 2024; Kebede, 2023). En consecuencia, se ha incrementado el interés por optimizar las diferentes fases del ciclo productivo de estos cultivos, con el fin de mejorar los rendimientos, reducir costos de producción y mantener altos estándares de calidad (Gruda et al., 2025; Jensen et al., 2024). Entre estas fases, la etapa de trasplante es de particular importancia, ya que permite optimizar el número de semillas, favorecer la uniformidad del crecimiento, regular la densidad de plantación, establecer espaciamientos adecuados y aumentar las tasas de supervivencia en campo, contribuyendo así al rendimiento comercial final (Gallegos-Cedillo et al., 2024; Leskovar & Othman, 2021; Vázquez-Casarrubias et al., 2011).

El trasplante de hortalizas puede realizarse mediante sistemas manuales, semiautomáticos o completamente automatizados, dependiendo del grado de mecanización de las etapas clave del proceso: extracción de las plántulas de las charolas de germinación, manipulación y posicionamiento, y establecimiento en campo (Khadatkar et al., 2018; Luhua et al., 2015). En sistemas automatizados, la etapa de extracción es crítica, ya que condiciona la eficiencia global del proceso y la integridad de las plántulas. Durante la extracción pueden generarse daños mecánicos en el tallo o en el cepellón, dependiendo del método empleado y de factores como el tipo charola (plástico o poliestireno), las propiedades del sustrato y las características morfológicas del tallo, particularmente en especies con estructuras relativamente firmes y erectas como los tomates y los pimientos (Cheng et al., 2024).

Por lo cual, el método de extracción de las plántulas a través de la sujeción de los tallos requiere un rango de fuerza específica para que el mecanismo no cause daños estructurales internos (Li et al., 2022). Para su caracterización, se emplean ensayos de compresión utilizando equipos instrumentados como analizadores de textura, máquinas universales de ensayo (Instron) y medidores de fuerza (Ametek), equipados con platos o sondas de geometría controlada (planas o cilíndricas) que interactúan directamente con las muestras (AL-Smadi et al., 2025; Rivera et al., 2022). En materiales biológicos, los ensayos de compresión pueden clasificarse principalmente en compresión axial (aplicada a lo largo del eje longitudinal) y compresión radial (perpendicular a dicho eje), siendo esta última particularmente relevante en estructuras con geometría cilíndrica, como son los tallos de las muestras estudiadas. La compresión radial permite determinar propiedades mecánicas fundamentales, como el módulo de elasticidad (módulo de Young) y la fuerza de ruptura, las cuales son esenciales para el diseño de dispositivos de manipulación que interactúan directamente con estos órganos vegetales (Sherif et al., 1976).

Los tallos de las plantas presentan un comportamiento mecánico anisotrópico, lo que implica que sus propiedades de resistencia y deformación dependen de la dirección de la carga aplicada. En particular, los tallos exhiben una menor resistencia cuando son sometidos a cargas perpendiculares a su eje longitudinal (compresión radial), en comparación con cargas aplicadas en dirección axial, debido a su estructura interna heterogénea y orientación de tejidos (Baskin & Jensen, 2013; Shah et al., 2017). Debido a esta característica, diversos estudios han evaluado el comportamiento

mecánico de diferentes estructuras vegetales bajo compresión radial en múltiples aplicaciones. En materiales lignocelulósicos de uso estructural, como el bambú se ha analizado la respuesta al a compresión radial para aplicaciones de construcción (Huang et al. 2024; Mou et al. 2025). Para la cosecha y postcosecha de productos agrícolas, se han realizado estudios en tallos de racimos de plátano (Zhao et al., 2021), brócoli (Zhao et al., 2022), *Pennisetum sinense* Roxb (Li et al., 2024), maíz (Han et al., 2024; Hou, Li, et al., 2025), alfalfa (Yang et al., 2025), ricino (Hou, Ma, et al., 2025) y papa (Wang et al., 2025), con el objetivo de optimizar sistemas de manipulación. Para el caso específico de plántulas, se han reportado estudios en cultivos como chile (variedad-*Pusa Jwala*) y jitomate (variedad-*Abhilash*) (Khadatkar et al., 2020), cebolla en las variedades *Puna Fursungi* y *Gavraan* (Pagare et al., 2022), jitomate híbrido *Ansal* y repollo (Magar et al., 2023), arroz (Xue et al., 2023) y pimienta (Li et al., 2022; Peng et al., 2025). Estos trabajos de RCF en los tallos de las plántulas están orientados al diseño y desarrollo de mecanismos de manipulación, demostrando que una adecuada caracterización mecánica contribuye a la reducción de daños estructurales en las plántulas y , en consecuencia, a la disminución de pérdidas económicas durante esta etapa del ciclo productivo.

A pesar de estos avances, los estudios en plántulas de jitomate presentan limitaciones importantes. En particular, existe una falta de caracterización detallada de la respuesta del tallo bajo compresión radial que incorpore variables físicas relevantes como: diámetro, altura y contenido de humedad, que influyen directamente en su comportamiento mecánico. Así mismo, la variabilidad genética entre híbridos y variedades puede modificar significativamente la resistencia del tallo, lo cual no ha sido suficientemente abordado en la literatura.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la RCF a un $1/3$ del diámetro del tallo, así como la RCF máxima, en plántulas de jitomate correspondientes a dos híbridos F1 (CID y Gavilán) bajo cinco velocidades de carga. Estos parámetros se establecen como base para la definición de rangos de fuerza de sujeción seguros durante la etapa de extracción en sistemas de trasplante automatizado.

2. Materiales y métodos

La Fig. 1 presenta la metodología empleada para el desarrollo de este estudio. Esta comprende, de manera secuencial, el planteamiento del diseño experimental, la definición y obtención de las covariables y, posteriormente, la determinación experimental de las variables de respuesta. Entre estas últimas se consideraron la fuerza de compresión radial y el desplazamiento correspondiente a cada fase del proceso de compresión.

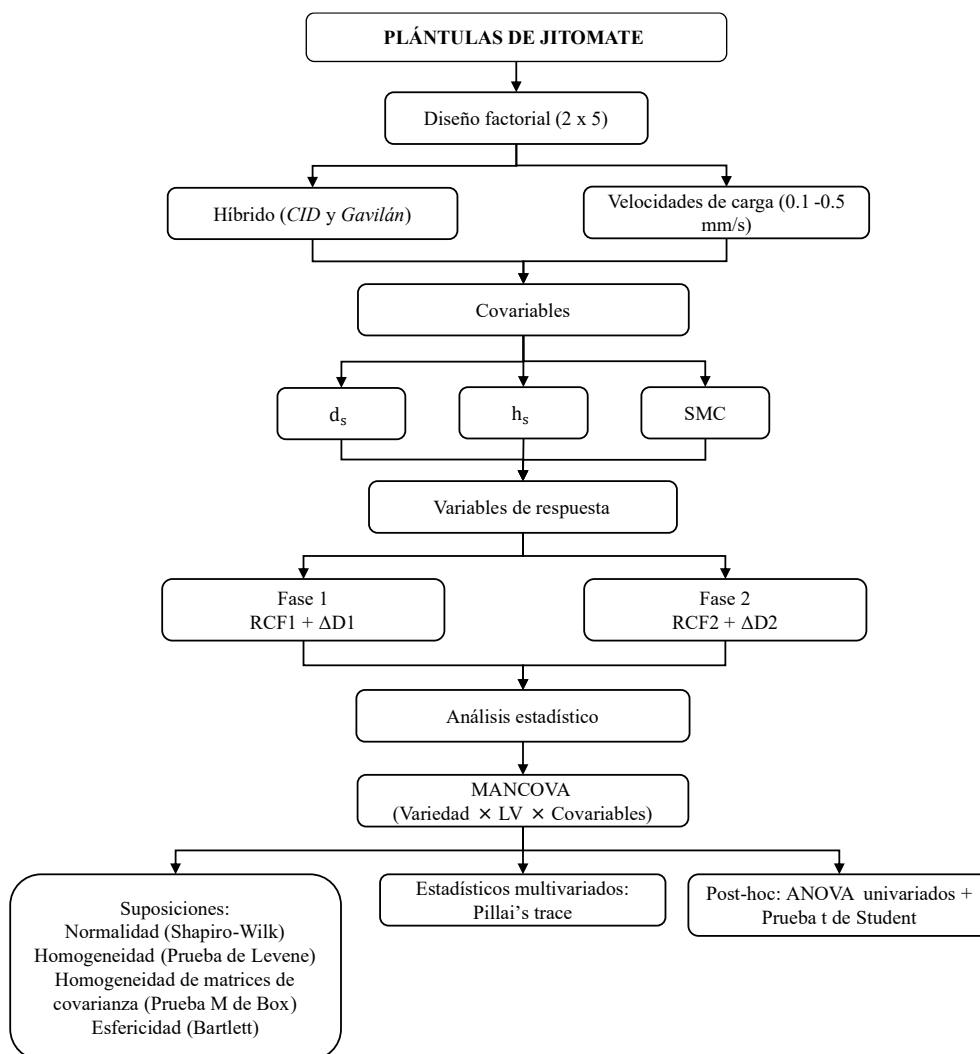


Fig. 1. Diagrama de flujo de análisis estadístico del diseño experimental.

2.1. Ubicación y material de experimentación

Se emplearon dos híbridos comerciales F1 de jitomate: *CID* (CIH) y *Gavilán* (GAH). Las semillas fueron sembradas durante los meses de marzo y abril de 2025 en Texcoco de Mora, Estado de México (19.5060° N, 98.8832° W). La siembra se realizó a una profundidad de 10 mm en un sustrato compuesto por 80% de turba (Peat Moss, Sunshine), 10 % de agrolita y 10 % de vermiculita de granulometría media. La germinación se realizó en charolas germinadoras de poliestireno expandido con dimensiones de 664 × 335 × 67 mm, provistas con 200 cavidades cónicas (26 × 26 mm) y orificios de drenaje de 5 mm de diámetro. Las plántulas se mantuvieron a 25 °C de temperatura y 90 % humedad relativa, con el fin de asegurar un desarrollo homogéneo. Para la caracterización experimental, se tomaron aleatoriamente 100 plántulas por híbrido a los 30 días después de la siembra. En dichas muestras se determinaron las propiedades físicas del tallo, así como su respuesta mecánica bajo ensayos de compresión radial.

2.2. *Propiedades físicas*

Se evaluaron las propiedades físicas del tallo directamente relacionadas con su comportamiento mecánico bajo compresión. La altura del tallo (h_s) se midió de la base mayor del cepellón (b_{ma}) hasta el punto de inserción de las primeras hojas de la plántula, de acuerdo con la metodología propuesta por Shuangyan et al., (2022). Cabe señalar que los valores de h_s obtenidos superan los criterios establecidos en la Norma ASTM (2015), la cual establece que las probetas cilíndricas sometidas a pruebas de compresión deben tener una relación longitud (h_s)-diámetro de 2:1. Sin embargo, en el presente estudio esta condición no fue impuesta, debido a la variabilidad natural del diámetro en los tallos de las plántulas y a la necesidad de evaluar su comportamiento mecánico en condiciones representativas de operación real. En consecuencia, se utilizó la altura real de cada muestra, preservando su integridad estructural y evitando alteraciones en su respuesta mecánica. Las mediciones (h_s) se realizaron utilizando un vernier calibrador digital (Insize, Modelo 1108-300; rango 0-300 mm) con una precisión de 0.01 mm. El diámetro del tallo (d_s), se midió a una distancia estandarizada de 10 mm por encima de la superficie del cepellón (d_{se}), empleando un calibrador de grosor digital (Mitutoyo, Modelo 547-500S; rango 0-12 mm) con una precisión de 0.01 mm. Para cada muestra se realizaron tres mediciones independientes, a fin de reducir la variabilidad experimental y obtener un valor promedio representativo (Fig. 2). Previo a los ensayos mecánicos, los tallos fueron cortados manualmente utilizando unas tijeras de corte fino, minutos antes de la prueba, con el objetivo de minimizar los cambios en su contenido de humedad y preservar sus propiedades mecánicas originales (Fig. 3). Las pruebas de compresión se realizaron bajo diferentes velocidades de carga (LV), definidas como: LV1, ..., LV5.

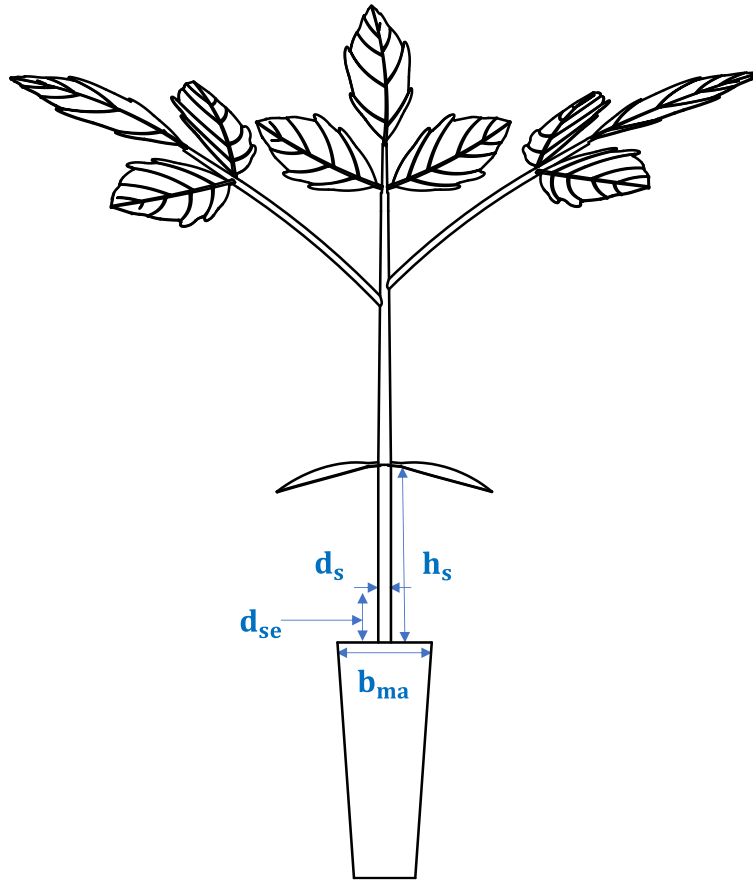


Fig. 2. Dimensiones físicas del tallo de la plántula de jitomate consideradas para la determinación de su fuerza de compresión.

La masa del tallo (SW , g) de las plántulas se determinó tanto en condición fresca como en base seca, utilizando una balanza analítica de alta precisión (Ohaus Pioneer™, rango 0-110 g, Pine Brook, NJ U.S.A.) con una resolución de 0.0001 g. Para la determinación de la masa seca, los tallos de las plántulas fueron previamente colocados en bolsas de papel Kraft y sometidos a secado en un horno de convección de laboratorio (Thelco, modelo CAT# 51221157, EE. UU.), a una temperatura constante de 70 °C durante 72 h, siguiendo el procedimiento establecido en la Norma ASAE S358.2 (1997, DEC93). Este tratamiento garantizó la eliminación del contenido de humedad libre hasta alcanzar una masa constante. El SMC de las plántulas fue determinado en base humedad a partir de la masa fresca y seca, utilizando la Ecuación (1):

$$SMC = \frac{SW_i - SW_f}{SW_i} * 100 \quad (1)$$

Donde: SW_i – peso inicial de los tallos de las plántulas en g y SW_f – peso final de los tallos de las plántulas en g después del secado.

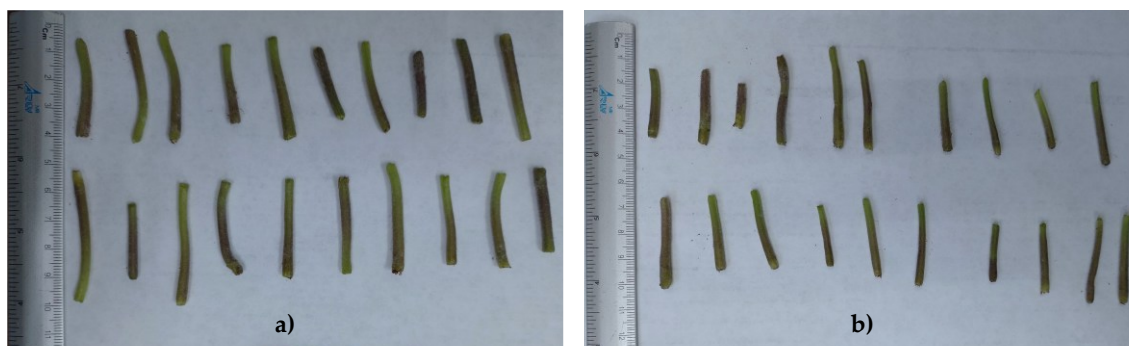


Fig. 3. Algunos grupos de tallos de las plántulas de jitomate estudiadas: a) muestras de CIH-LV2 y b) muestras GAH-LV2.

2.3. Fuerza de compresión radial del tallo

Los ensayos de fuerza de compresión radial (RCF) de los tallos se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), unidad Legaria. Las pruebas de RCF se realizaron utilizando un analizador de textura (modelo TA-XT2i, New York, EE. UU.), equipado con platos paralelos planos de 50 mm de diámetro, controlado mediante el software Texture Expert (Fig. 4). Este sistema permitió aplicar cargas controladas y registrar con precisión la respuesta fuerza-desplazamiento de los tallos. Las pruebas se ejecutaron bajo cinco velocidades de carga LV (LV1-LV5): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mm * s⁻¹. El criterio de detección del punto de ruptura se estableció con una sensibilidad de 0.5 N, permitiendo identificar cambios abruptos en la respuesta mecánica del material. Para la caracterización de la respuesta mecánica, se establecieron dos niveles de RCF en función del desplazamiento del plato superior del equipo, el cual se asume equivalente a la variación del diámetro del tallo de la plántula (ΔD). Los niveles se establecieron conforme a la Ecuación 2: Nivel 1(RCF1) correspondiente a una deformación radial equivalente a un tercio del diámetro inicial del tallo ($\Delta D1 = 1/3 d_s$). Este nivel se asocia con una zona de deformación moderada, en la cual se presentan daños estructurales mínimos en el tejido vegetal (RCF1) (Pandirwar et al., 2015). Nivel 2 (RCF2), correspondiente a la RCF máxima (RCF2) antes del punto de ruptura, correspondiente a 2/3 del diámetro del tallo ($\Delta D2 = 2/3 d_s$). Este nivel representa el límite superior de resistencia mecánica del tallo bajo compresión radial (Fig. 4).

$$\begin{cases} 0 < \Delta D \leq \frac{1}{3} d_s \\ \frac{1}{3} d_s < \Delta D \leq \frac{2}{3} d_s \end{cases} \quad (2)$$

El módulo de Young está descrito por la Ecuación 3. Para la obtención del diagrama esfuerzo-deformación se aplicaron las Ecuaciones (4) y (5) para el esfuerzo y la deformación unitaria, respectivamente (ASTM, 2016; Ben et al., 2023). La ecuación 4 está basado en Brazilian test y este estudio adaptado para materiales biológicos, donde el contacto entre superficies genera una distribución de esfuerzos no uniforme.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{2 * RCF}{\pi * d_s * h_s} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{d_s} \quad (5)$$

Donde: RCF – carga aplicada a través del plato superior del texturómetro en N, d_s – diámetro del tallo en mm, h_s – longitud del tallo en mm, ΔD – es el desplazamiento del plato superior del texturómetro en mm.

El estrés bajo la RCF máxima de los tallos de las plántulas se determinó mediante la Ecuación 6 (Shuangyan, 2022):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{RCF2}{(d_s - \Delta D2)h_s} \quad (6)$$

Donde: RCF2 – carga máxima de rotura en N, y $\Delta D2$ – es el desplazamiento máximo del plato superior del texturómetro cuando éste entra en contacto con la muestra de prueba a la rotura en mm.

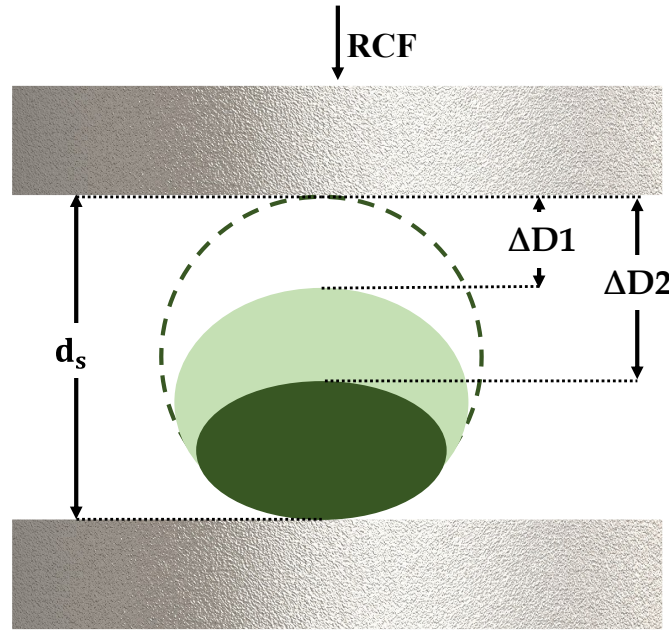


Fig. 4. Esquema de la determinación de RCF del tallo de la plántula de jitomate en el analizador de textura.

2.4. Análisis estadístico

El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial de 2×5 , considerando dos híbridos de jitomate (CIH y GAH) y cinco niveles de velocidad de carga (LV1-LV5). Se usaron 200 plántulas seleccionadas al azar, distribuidas en 10 tratamientos, con 20 unidades experimentales por tratamiento para evaluar la RCF. El tamaño muestral fue determinado mediante un análisis de potencia a priori, considerando un tamaño del efecto medio (f de Cohen = 0.3), una potencia estadística de 0.8 y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ de acuerdo con Cohen, (1988). Previo al análisis estadístico, los datos experimentales fueron sometidos a un proceso de pre-tratamiento para la extracción y depuración de las variables de respuesta (Fig. 5). Se realizó un análisis de multivariado de covarianza factorial (MANCOVA) para evaluar

simultáneamente las variables dependientes: RCF1, $\Delta D1$, RCF2 y $\Delta D2$. Como factores fijos se consideraron los híbridos (CIH y GAH), la velocidad de carga LV (LV1–LV5) y su interacción, mientras que d_s , h_s y SMC se incluyeron covariables continuas. Adicionalmente, se implementaron modelos multivariados por fases (RCF1– $\Delta D1$ y RCF2– $\Delta D2$) para analizar de manera diferenciada las etapas de deformación inicial y cercana a la falla. De forma complementaria, se realizaron análisis de modelos univariados (ANCOVA) para cada variable dependiente. Los supuestos estadísticos del modelo fueron verificados mediante pruebas de normalidad de residuos (Shapiro–Wilk), homogeneidad de varianzas (Levene) y homogeneidad de matrices de covarianza (Box’s M). Ante la detección de ligeras desviaciones en algunos de estos supuestos, se empleó el estadístico multivariado de traza pillai, reconocido por su robustez frente a violaciones moderadas de normalidad y homocedastidad. La colinealidad entre predictores se evaluó mediante el Generalized Variance Inflation Factor (GVIF), basándose en el criterio de Fox & Monette, (1992). Las comparaciones múltiples de medias se realizaron mediante pruebas T-Student aplicadas sobre las medias marginales estimadas (emmeans), lo que permitió ajustar los efectos de las covariables incluidas en el modelo. Todos los análisis estadísticos, el procesamiento de datos y la visualización grafica se realizaron utilizando el software estadístico RStudio (versión 2024.09.1).

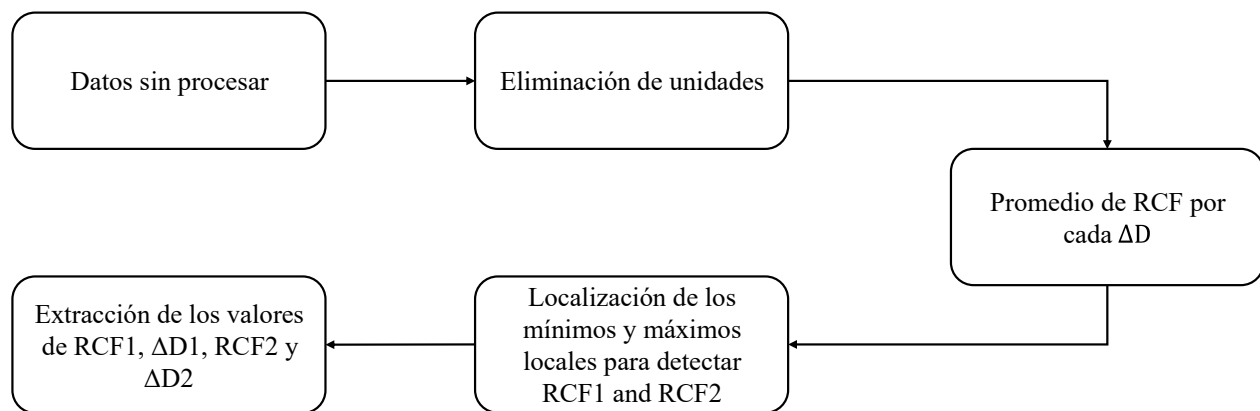


Fig. 5. Metodología para la preparación de los datos de las variables de respuesta.

3. Resultados

3.1. Propiedades físicas del tallo

La Fig. 6 muestra la distribución de las propiedades físicas de los tallos de plántulas sometidos a la prueba de RCF. Los valores mínimos de SW fueron 0.13 y 0.10 g para los híbridos CIH y GAH, respectivamente, mientras que los valores máximos de SW fueron 0.51 g (CIH) y 0.50 g (GAH). Estos resultados evidencian una variabilidad moderada en la biomasa de los tallos entre ambos híbridos. En cuanto a los valores mínimos y máximos de SMC, se observaron rangos elevados, con valores entre 89.79 y 96.84 % para CIH, y entre 91.96 y 97.88 % para GAH, lo cual es consistente con el estado fisiológico de las plántulas y su alta proporción de tejido acuoso. El diámetro del tallo (d_s) presentó un rango de 2.46–4.14 mm en CIH y de 2.28–4.12 mm en GAH. Por su parte, la altura del tallo (h_s) varió entre 18.32–46.17 mm para CIH. y entre 15.33–51.62 mm para GAH. Estas variaciones reflejan diferencias en el desarrollo morfológico entre individuos y potencialmente entre híbridos. En conjunto, la dispersión observada en las propiedades

físicas sugiere la necesidad de considerar estas variables como covariables en el análisis mecánico, dado su impacto directo en la respuesta estructural del tallo bajo compresión radial.

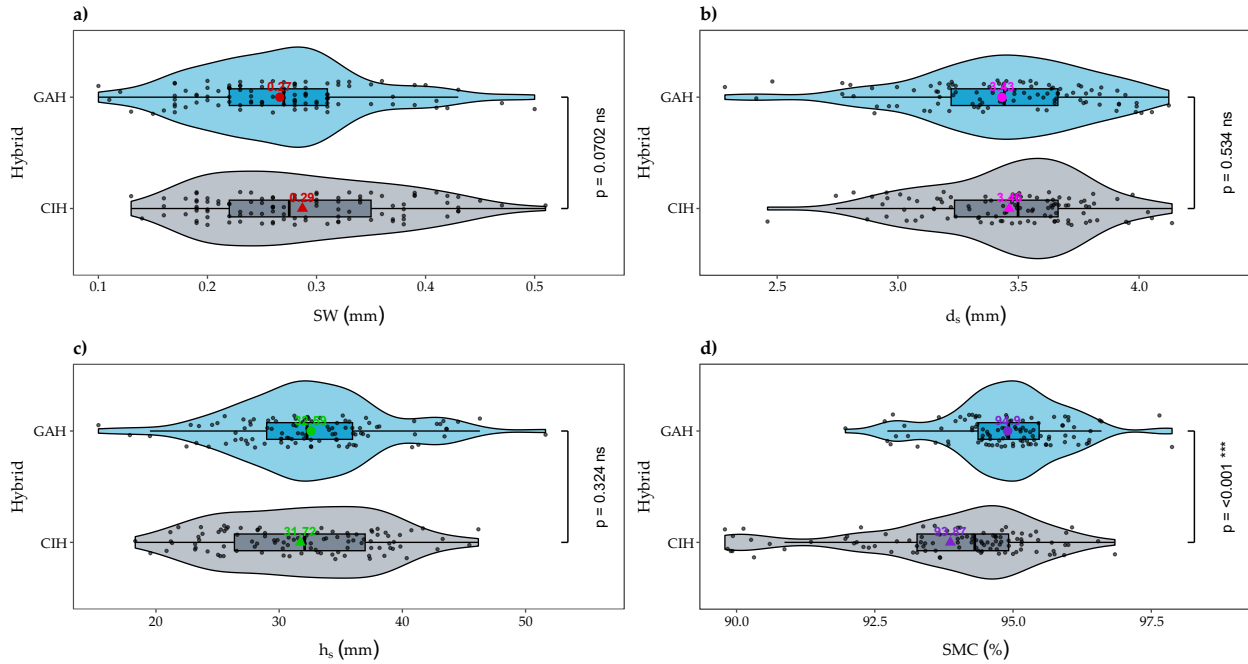


Fig. 6. Análisis exploratorio sobre las propiedades físicas de los tallos estudiados: a) Peso (SW), b) diámetro (d_s), c) altura(h_s) y d) contenido de humedad (SMC). Los símbolos ● para CIH y ▲ para GAH con valores en diferentes colores indican la media de las propiedades físicas.

3.2. Análisis de covarianza multivariado factorial y univariado

Para verificar la validez de los modelos (MANCOVA y ANCOVAs) y la confiabilidad de los resultados obtenidos, se evaluaron los supuestos estadísticos asociados a los residuos. La normalidad de los residuos se verificó mediante la prueba de Shapiro–Wilk. No se observaron desviaciones significativas respecto a la normalidad en las variables para $\Delta D1$ ($p = 0.259$), RCF2 ($p = 0.222$) y $\Delta D2$ ($p = 0.177$). No obstante, la variable RCF1 presentó una ligera desviación ($p < 0.0002$), la cual fue considerada no crítica debido al tamaño muestral y al carácter robusto de los análisis multivariados aplicados. La homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Levene. Este supuesto se cumplió para RCF1 ($p = 0.075$), RCF2 ($p = 0.869$) y $\Delta D2$ ($p = 0.171$), mientras que se observó una leve violación en $\Delta D1$ ($p = 0.041$). En cuanto a la homogeneidad de matrices de covarianza, evaluado con Box's M, se identificó una desviación significativa -rechazo- en el conjunto RCF1– $\Delta D1$ ($p = 0.023$), mientras que el conjunto RCF2– $\Delta D2$ cumplió con este supuesto ($p = 0.076$). Dado que algunos supuestos presentaron desviaciones leves, se optó por utilizar la Pillai's trace como estadístico de contraste en el análisis MANCOVA, debido a su reconocida robustez ante violaciones moderadas de normalidad, homogeneidad de varianzas y matrices de covarianza. Además, la prueba de esfericidad de Bartlett confirmó la existencia de correlaciones significativas entre las variables dependientes, tanto en la fase inicial de deformación (RCF1– $\Delta D1$: $\chi^2(1) = 85.165$, $p < 2.74 \times 10^{-20}$) como en la fase previa a la falla (RCF2– $\Delta D2$: $\chi^2(1) = 115.946$, $p < 4.89 \times 10^{-27}$), lo cual respalda la pertinencia del enfoque multivariado adoptado. Finalmente, el análisis

de colinealidad, evaluado mediante el Generalized Variance Inflation Factor (GVIF), indicó que todas las covariables y la interacción Hybrid: LV presentaron valores menores a 3 (Tabla 1), lo que sugiere la ausencia de problemas significativos de multicolinealidad en los modelos ajustados.

Tabla 1. Evaluación de la colinealidad de los predictores mediante el Generalized Variance Inflation Factor (GVIF).

	GVIF	DF	GVIF$\left(\frac{1}{2 \cdot DF}\right)$
Híbrido	5.392312	1	2.322135
LV	20.551529	4	1.459169
d _s	1.307636	1	1.143519
h _s	1.221585	1	1.105254
SMC	1.492218	1	1.221564
Híbrido: LV	55.568729	4	1.652357

DF – Grados de libertad, valores ajustados < 3 indican baja colinealidad.

La Tabla 2 muestra los resultados del MANCOVA global de dos vías (Pillai's trace). El análisis multivariado evidenció efectos altamente significativos de los híbridos y de las covariables físicas del tallo, así como un efecto moderado de las LV. No se detectaron interacciones significativas entre los híbridos y las LV.

Tabla 2. Resumen del MANCOVA global de dos vías (Pillai's trace) para las variables de respuesta (RCF1, ΔD1, RCF2 y ΔD2) en función de los factores (híbrido y LV) y las covariables físicas del tallo.

	DF	Pillai	F(Approx)	Num DF	Den DF	p-value
Híbrido	1	0.40498	31.308	4	184	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***
LV	4	0.19132	2.348	16	748	0.002095 **
d _s	1	0.45989	39.168	4	184	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***
h _s	1	0.58890	65.895	4	184	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***
SMC	1	0.32024	21.671	4	184	1.149×10^{-14} ***
Híbrido: LV	4	0.06630	0.788	16	748	0.700419 ns
Residuales	187					

DF – Grados de libertad, niveles de significancia: <0.001 – ***, 0.001 – ** y > 0.1 – ns.

Con la finalidad de analizar de manera diferenciada los efectos en cada etapa del ensayo mecánico, se realizaron análisis multivariados independientes por fase. En particular, se distinguieron dos etapas: la fase inicial de compresión, caracterizada por las variables RCF1 y ΔD1 y la fase avanzada, asociada a RCF2 y ΔD2. La Tabla 3 muestra los resultados del MANCOVA de dos vías, empleando Pillai's trace como estadístico de contraste, correspondientes a la fase inicial de compresión. Por su parte, la Tabla 4 muestra los resultados del análisis equivalente para la fase avanzada del ensayo. Esta estrategia analítica permitió capturar de manera más precisa las diferencias en el comportamiento mecánico del tallo entre etapas, considerando que los mecanismos de deformación y daño estructural pueden variar significativamente desde la compresión inicial hasta la proximidad de punto de falla.

Tabla 3. Resumen del MANCOVA de dos vías (Pillai's trace) para la fase inicial de RCF (RCF1 y $\Delta D1$).

Factor	DF	Pillai	F(Approx)	Num DF	Den DF	p-value
Híbrido	1	0.04571	4.454	2	186	0.01289 *
LV	4	0.10198	2.512	8	374	0.01141 *
d _s	1	0.14307	15.527	2	186	5.808×10^{-07} ***
h _s	1	0.52598	103.193	2	186	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***
SMC	1	0.31461	42.690	2	186	5.521×10^{-16} ***
Híbrido: LV	4	0.04630	1.108	8	374	0.35685 ns
Residuales	187					

DF – Grados de libertad, niveles de significancia: <0.001 – ***, 0.001 – **, 0.01 – * y > 0.1 – ns.

Tabla 4. Resumen del MANCOVA de dos vías (Pillai's trace) para la fase dos de RCF (RCF2 y $\Delta D2$).

Factor	DF	Pillai	F(Approx)	Num DF	Den DF	p-value
Híbrido	1	25.671	23.271	2	186	1.429×10^{-10} ***
LV	4	2.903	2.583	8	374	0.00376 **
d _s	1	0.21571	25.579	2	186	1.536×10^{-10} ***
h _s	1	0.54011	109.221	2	186	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***
SMC	1	0.22418	26.873	2	186	5.597×10^{-11} ***
Híbrido: LV	4	0.01229	0.289	8	374	0.96941 ns
Residuales	187					

DF – Grados de libertad, niveles de significancia: <0.001 – ***, 0.001 – **, 0.01 – * y > 0.1 – ns.

La Tabla 5 muestra el resumen de los ANCOVAs univariados (ANOVAs tipo II) para cada variable de respuesta (RCF1, $\Delta D1$, RCF2 y $\Delta D2$). Se presentan los valores F value y p-value asociados a los efectos del híbrido, la LV, las covariables físicas del tallo y la interacción híbridos $\times$ LV.

Tabla 5. Resultados de los ANCOVAs univariados para las variables de respuesta RCF1, $\Delta D1$, RCF2 y $\Delta D2$ en función de factores y covariables.

Factor	DF	RCF1		$\Delta D1$		RCF2		$\Delta D2$	
		F value	p-value	F value	p-value	F value	p-value	F value	p-value
Híbrido	1	1.5750	0.21105 ns	3.4278	0.06569 ·	6.3748	0.01241 *	37.9096	4.424×10^{-09} ***
LV	4	0.1343	0.96958 ns	0.7616	0.55151 ns	0.3681	0.83114 ns	0.8278	0.50898 ns
d _s	1	3.4499	0.06483 ·	16.8959	5.905×10^{-05} ***	0.2133	0.64470 ns	34.0417	2.337×10^{-08} ***
h _s	1	112.5478	$< 2.2 \times 10^{-16}$ ***	0.0472	0.82824 ns	43.0237	5.146×10^{-10} ***	3.9616	0.04801 *
SMC	1	28.8322	2.323×10^{-07} ***	1.7741	0.18450 ns	1.7476	0.18779 ns	7.3073	0.00750 **
Híbrido x LV	4	1.0311	0.39249 ns	1.5718	0.18354 ns	0.2887	0.88506 ns	0.5337	0.71111 ns
Residuales	187								

DF – Grados de libertad, niveles de significancia: <0.001 – ***, 0.001 – **, 0.01 – *, 0.05 – ·, y > 0.1 – ns.

3.3. Fuerza de compresión radial y estrés bajo compresión

La Fig. 7 muestra el comportamiento promedio de las RCF con respecto al desplazamiento del texturómetro (AD). En el híbrido CIH, el 33 % de las observaciones superaron un desplazamiento de 1.15 mm, correspondiente a un tercio del d_s . En contraste, en el híbrido GAH este porcentaje fue de 27 %. No obstante, se identificaron casos en GAH donde la RCF2 se alcanzó con desplazamientos menores a un 1/3 del d_s , lo cual sugiere una mayor susceptibilidad a concentraciones locales de esfuerzo o heterogeneidad estructural. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 5, las variables de respuesta RCF1 y $\Delta D1$ no mostraron efectos significativos entre híbridos. En consecuencia, la Fig. 8 muestra las medias ajustadas con fines exploratorios, así como la comparación entre híbridos mediante contrastes tipo t de Student derivados de los modelos ANCOVA univariados.

El análisis de los rangos de fuerza resulta fundamental para el diseño de sistemas de sujeción, ya que incluso bajo condiciones controladas se observó una variabilidad considerable dentro de un mismo híbrido. En las muestras de CIH, la RCF1 osciló entre 15.903 y 94.41 N, mientras que la RCF2 varió entre 40.296 y 137.583 N. Por su parte, , en las muestras de GAH, la RCF1 presentó valores entre de 18.335 y 66.765 N, y la RCF2 entre 41.545 y 145.619 N. Estos resultados evidencian una superposición parcial en los rangos de resistencia mecánica entre híbridos, lo cual tiene implicaciones directas en la definición de umbrales de sujeción seguros.

De acuerdo con la Fig. 8, no se detectaron diferencias significativas entre los híbridos estudiados en la fase inicial de compresión. Este comportamiento se confirma en la Fig. 9, donde se observa una respuesta mecánica global similar en ambas variedades para $\Delta D1$. Sin embargo, el híbrido GAH presentó una desviación estándar menor en la etapa inicial, lo que indica una respuesta más uniforme frente a la carga en comparación con CIH.

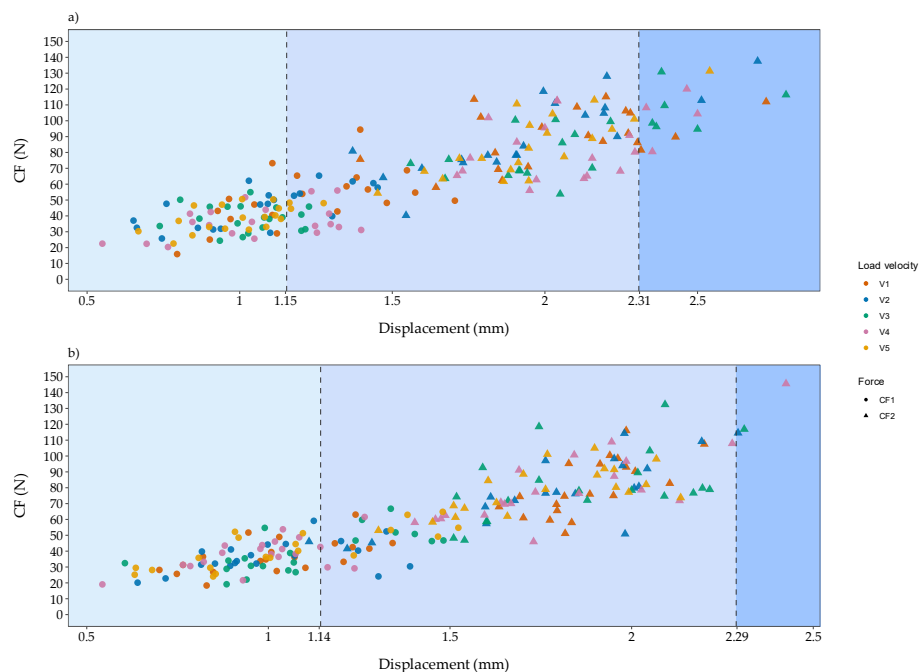


Fig. 7. Distribución de las RCF por cada variedad para las dos fases analizadas a diferentes LV: a) CIH y b) GAH. LV1-LV5 son las LV a las que se sometieron los tallos.

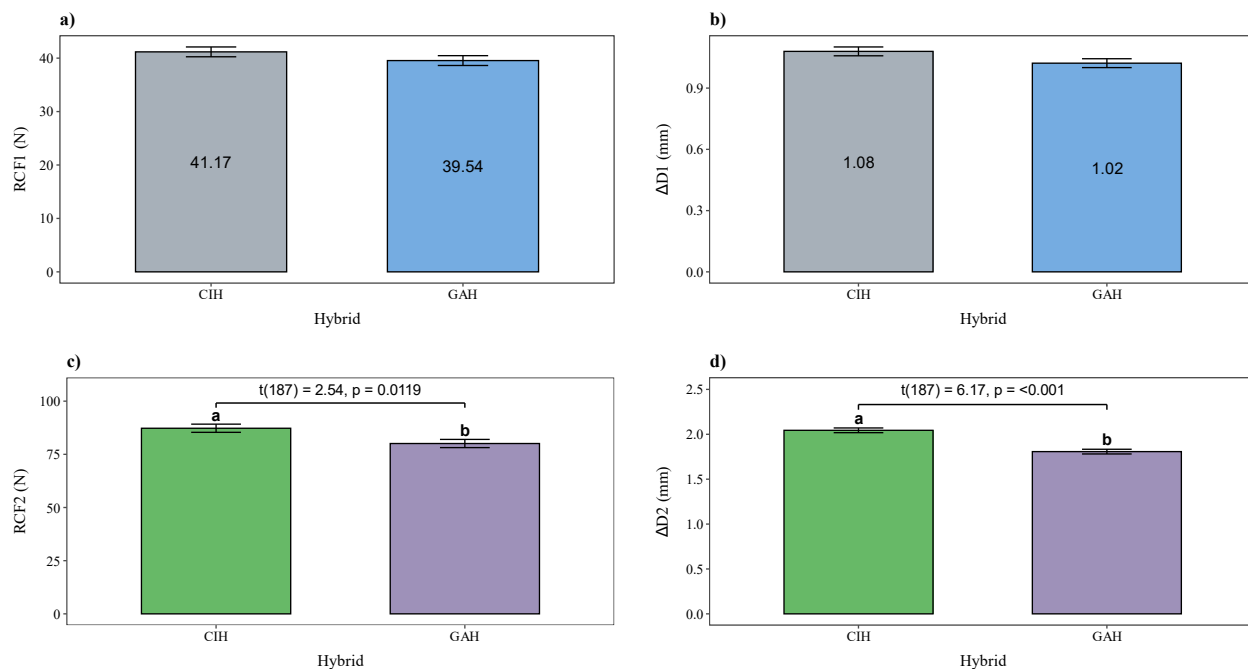


Fig. 8. Medias ajustadas $\pm$ error estándar obtenidas a partir de los modelos ANCOVA univariados para las variables de respuesta en función de factores y covariables: a) resultados exploratorios de RCF1, b) resultados exploratorios de

$\Delta D1$, c) comparación de medias ajustadas de RCF2 (contraste T de Student), y d) comparación de medias ajustadas de $\Delta D2$ (contraste T de Student).

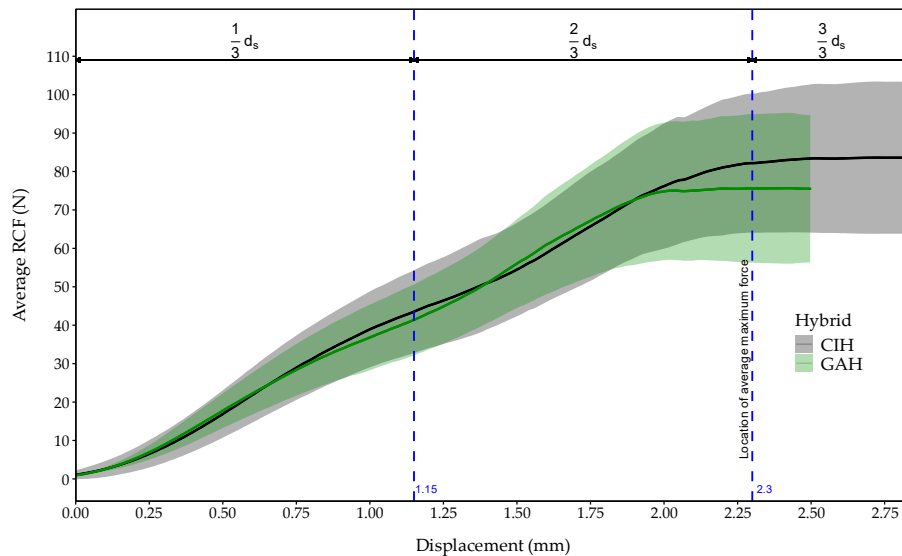


Fig. 9. Curvas de RCF promedio-desplazamiento con su desviación estándar para los tallos de las 100 muestras estudiadas por variedad. Las áreas sombreadas en gris y verde claro indican la desviación estándar correspondientes a los híbridos indicados.

La Fig. 10 muestra las curvas de esfuerzo-deformación de los híbridos CIH y GAH, correspondientes a tallos con valores de d_s y h_s de 3.33 y 35.61 mm para CIH, y de 3.34 y 31.16 mm para GAH, respectivamente. Se observa que la zona elástica es casi imperceptible (área sombreada en color gris) lo que indica una transición casi inmediata hacia el régimen plástico. Este comportamiento sugiere que los tallos presentan una limitada capacidad de deformación elástica bajo compresión radial, característica típica de tejidos vegetales con alto contenido de humedad y baja rigidez estructural. El inicio de la bio-fluencia se identifica aproximadamente cuando el desplazamiento alcanza un valor cercano a $0.333 d_s$, punto a partir del cual se evidencian microfallas internas asociadas a la ruptura progresiva del tejido. Posteriormente, el material alcanza el esfuerzo máximo, seguido de la falla estructural completa del tallo. Cabe señalar que los valores máximos de esfuerzo pueden alcanzar magnitudes superiores (2.2 MPa) cuando se emplean formulaciones alternativas [Ecuación 6]; sin embargo, para mantener consistencia metodológica, en la figura 11 se reportan únicamente los valores derivados del enfoque adoptado en este estudio tomando en cuenta la curva clásica de esfuerzo-deformación planteada por la Ecuación 4. La Fig. 11 muestra la estructura interna del tallo de jitomate, evidenciando la distribución de sus principales tejidos. La epidermis, cuya función incluye la protección contra daños mecánicos, representa menos del 1% del d_s . Esta proporción explica la baja contribución de dicha capa a la resistencia mecánica global bajo compresión radial, lo cual es consistente con la ausencia de una región elástica claramente definida en las curvas esfuerzo-deformación. Adicionalmente, más del 85% del $1/3 d_s$ corresponde al tejido parenquimático, el cual presenta una estructura altamente deformable y heterogénea. Esta característica no solo explica

la rápida transición al régimen plástico, sino también la variabilidad observada en la respuesta mecánica, tanto dentro de un mismo tallo como entre diferentes muestras y variedades de jitomate.

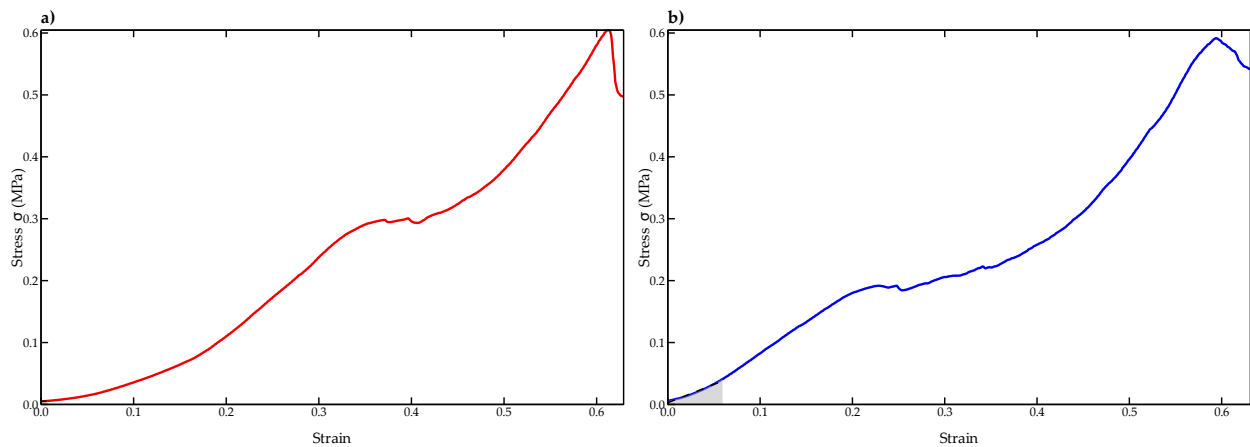


Fig. 10. Diagramas de esfuerzo-deformación de unas pruebas de RCF: a) muestra 20 de CIH-LV4 y b) muestra 08 de GAH-LV4.

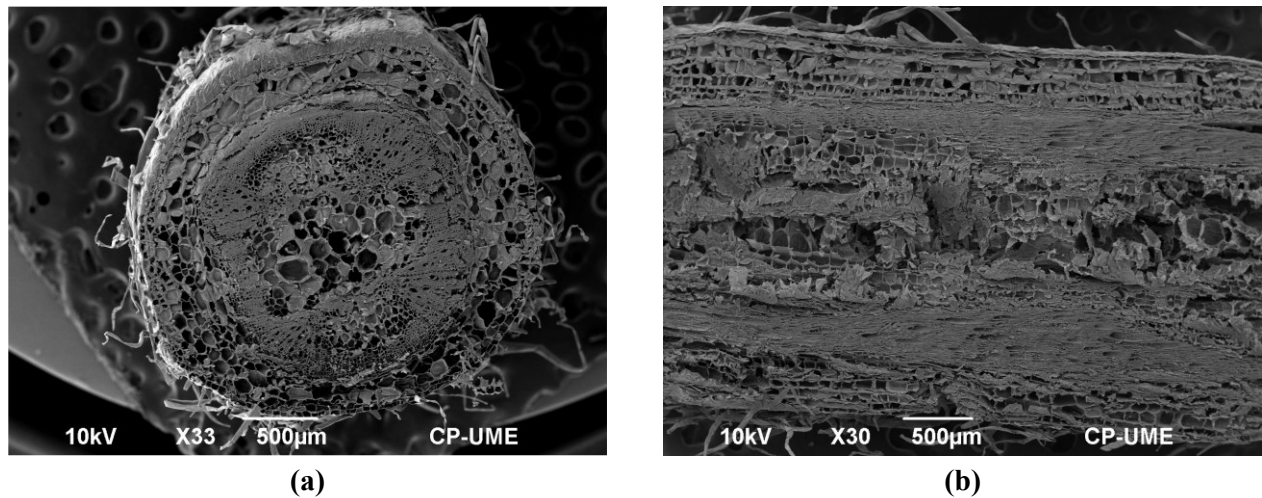


Fig. 11. Microestructura de un tallo de muestra GAH obtenido mediante un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6390 y controlado por el software Scanning Electron Microscope: a) corte transversal del tallo y b) corte longitudinal del tallo.

4. Discusión

4.1. Propiedades físicas del tallo

De acuerdo con los resultados de las propiedades físicas del tallo mostrados en la Fig. 6, las variables SW , h_s y d_s no presentaron diferencias significativas entre los híbridos evaluados. En contraste, el SMC presentó diferencias estadísticamente significativas, lo que sugiere variaciones en la composición interna del tejido entre híbridos. Estos resultados son consistentes con reportes previos en la literatura. En particular, Grande et al. (2025) documentaron

valores similares a los obtenidos en este estudio para las mismas variedades, lo que refuerza la confiabilidad de los datos experimentales. Para el caso de la d_s , Abubakar et al. (2020) obtuvieron un valor de 3.53 mm con la variedad de *Roma VF*, mientras que Grande et al. (2025) reportaron valores de 3.65 y 3.70 mm para las variedades *CID* y *Gavilán*, respectivamente, los cuales se encuentran dentro del rango observado en este trabajo. Sin embargo, Magar et al. (2023) reportaron un d_s promedio de 2.64 con plántulas de 30 días del híbrido *Ansal*. Estas diferencias pueden atribuirse a las variaciones en la edad fisiológica de las plántulas, las condiciones del cultivo y el material genético evaluado, así mismo, Sharma et al. (2023) reportaron un valor de 1.86 mm con una etapa fisiológica de 32 días con la variedad *Himsona*. Cabe resaltar que las variables físicas, particularmente SMC, h_s y d_s describen parte de la variabilidad observada en la respuesta mecánica del tallo bajo compresión radial. En este sentido, dichas variables no solo caracterizan el estado físico del material vegetal, sino que también influyen directamente en la magnitud de la RCF que necesita un tallo al sujetarse, lo cual resulta crítico para el diseño de sistemas automatizados de trasplante.

4.2. Análisis de covarianza multivariado factorial y univariado

De acuerdo con los resultados del análisis de colinealidad, evaluado mediante el GVIF (Tabla 1), se observó una baja colinealidad entre predictores, lo que garantiza la estabilidad de los coeficientes estimados y la validez inferencial de los modelos tanto univariados como multivariados. De manera global (Tabla 2), el análisis multivariado evidenció que el factor híbrido y las covariables físicas del tallo ejercieron efectos de alta magnitud sobre las variables de respuesta, mientras que las LV mostraron un efecto moderado. La interacción entre los híbridos y LV no resultó significativa, lo que indica una respuesta mecánica consistente entre materiales bajo las condiciones de ensayo. Debido a este comportamiento diferencial, fue necesario un análisis por fases del ensayo de compresión radial, con el propósito de capturar los cambios en los mecanismos de deformación desde la etapa inicial hasta la proximidad de la falla estructural.

De esta manera, en la fase inicial (RCF1-AD1; Tabla 3), las diferencias entre híbridos no fueron significativas, lo que sugiere que la respuesta mecánica en esta etapa está dominada principalmente por las propiedades físicas del tallo, particularmente (d_s , h_s y SMC). Así mismo, la ausencia de efecto significativo de la LV indica que no altera de manera sustancial el comportamiento mecánico inicial, caracterizado por deformaciones localizadas en tejidos de baja rigidez. En contraste, en la fase avanzada (RCF2-AD2; Tabla 4), el análisis multivariado mostró un efecto altamente significativo del factor híbrido sobre las variables de respuesta conjuntas, lo que indica que sus diferencias genéticas se vuelven determinantes a medida que el tallo se aproxima a su capacidad máxima de carga. Las covariables físicas (d_s , h_s y SMC) también contribuyen de manera importante, lo que sugiere que, aunque el efecto genético de los híbridos es dominante, las características estructurales del tallo continúan modulando la resistencia mecánica global. Por otro lado, la LV mantuvo un efecto menos significativo, y no se detectaron interacciones significativas entre híbrido y LV, lo que sugiere una respuesta mecánica estable frente a este factor incluso en condiciones cercanas a la falla. En términos comparativos, el CIH mostró una mayor resistencia a la ruptura, lo que podría estar asociado a diferencias en su arquitectura interna o composición tisular.

Los resultados de los análisis univariados ANOVAS (Tabla 5) refuerzan estas observaciones. En la fase inicial (RCF1 y AD1), el efecto del híbrido fue mínimo, mientras que las covariables físicas (d_s y h_s) tuvieron un papel relevante en

la respuesta mecánica. En la fase avanzada (RCF2 y $\Delta D2$), el efecto del híbrido fue altamente significativo, confirmando diferencias consistentes en la resistencia mecánica entre materiales. Así mismo, h_s influyó significativamente en RCF2 y d_s en $\Delta D2$, indicando que ciertos rasgos morfológicos continúan modulando la variable de respuesta, aunque el efecto genético es predominante. Finalmente, ni la LV ni la interacción entre híbrido $\times$ LV mostraron efectos significativos en ninguna de las variables analizadas, lo que confirma la robustez y estabilidad de la respuesta mecánica del sistema frente a este factor experimental.

4.3. Fuerza de compresión y estrés bajo compresión

De acuerdo con los resultados mostrados en la Fig. 8 y Fig. 9, no se detectaron diferencias significativas entre los híbridos en la fase inicial de compresión, por lo que confirman que la respuesta mecánica en esta etapa es independiente del material genético. Sin embargo, en la fase avanzada donde se presenta la ruptura, se pudo confirmar que existe diferencia significativa entre los híbridos tanto en RCF2 como en la $\Delta D2$, lo que evidencia que los mecanismos de falla están fuertemente influenciados por las características estructurales y genéticas del tallo.

En la fase inicial (RCF1), existen estudios que reportan valores superiores a los obtenidos en este trabajo, como Magar et al. (2023) quienes obtuvieron un RCF promedio de 53.06 N en tallos de plántulas de jitomate del híbrido *Ansal* y 63.69 N en repollo. En contraste, otros estudios han reportado valores inferiores, como Peng et al. (2025) y Li et al. (2022) quienes obtuvieron una RCF promedio de 24.06 N y 11.19 N con tallos de plántulas de pimientos comprimidas hasta el 60% y 50% de su d_s , respectivamente. Así mismo, Abubakar et al. (2020) obtuvieron un RCF de 11.64 N en plántulas de jitomate en la variedad *Roma VF*, Khadatkhar et al. (2020) reportaron RCF de 11.77 N en chile (variedad-*Pusa Jwala*) y jitomate (variedad-*Abhilash*) y Mansuriya et al. (2024) que obtuvieron una RCF de 13.4 con plántulas de chile (variedad-Saniya [*Acsen Hyveg*]) tomando en cuenta un desplazamiento del 30% del plato de compresión superior correspondiente al diámetro de las plántulas. Además, las diferencias pueden atribuirse, en gran medida, a las condiciones metodológicas, particularmente al tipo de diámetro del elemento de compresión. En este estudio que se utilizó un plato de 50 mm con el fin de abarcar más área al entrar en contacto con los tallos y verificar como cambia cuando este se tiene una h_s mayor o menor. Por lo que esto puede influir en la cuantificación e interpretación de los resultados en las pruebas mecánicas como lo indica Rivera et al. (2022). De esta manera, se confirma que los tallos pueden presentar diferentes comportamientos al determinar sus propiedades mecánicas entre especies, según su etapa vegetativa, su ubicación del muestreo, su d_s y su SMC (Chen et al., 2019; W. Zhao et al., 2023). Esta última variable cuando es alto, los tallos tienden a deformarse más fácil, y, además, confirma la importancia de incorporarlo como una de las covariables importantes que explica el comportamiento de la RCF en los tallos sobre el SW en este estudio.

En la fase avanzada de RCF2, correspondiente a la ruptura, existe una menor cantidad de estudios, dado que esta condición implica la pérdida de viabilidad de la plántula. No obstante, esta etapa está fuertemente influenciada por atributos intrínsecos como la lignificación y la densidad de fibras de soporte. Estudio recientes, como el de Pápai et al. (2024), sugieren que variables con la estructura de la pared celular secundaria y la genética desempeñan un papel determinante en la resistencia a la falla. Así mismo, Xue et al. (2023) recalcaron la influencia de la presión de turgencia

de los tallos de plántulas de arroz en pruebas de carga-desplazamiento en RCF a diferentes escalas y la evolución de los daños bajo cargas mecánicas.

De acuerdo con la Fig. 10, la región elástica es casi imperceptible, observándose una transición directa hacia el régimen plástico. Este comportamiento se explica por bajo el contenido de materia seca ($< 10\%$) y el alto SMC en los tallos, lo que les confiere un carácter altamente dúctil. La Fig. 11 confirma este comportamiento al evidenciar una estructura interna de un tallo dominada por tejido parenquimático, con una contribución limitada de la epidermis a la resistencia mecánica. Estas dos zonas están influenciadas por las características mecánicas de la epidermis y el parénquima del d_s , esta última tiene funciones principales como la regeneración y la cicatrización de heridas cuando se aplican fuerzas externas (Pruyn & Spicer, 2012). El arreglo de su estructura interna difiere con respecto a otras muestras de plántulas aun siendo de la misma edad y variedad, además de las propiedades anisotrópicas que presentan los tallos. Lo anterior explica la variabilidad observada incluso entre los tallos con dimensiones similares. En este contexto, si la fuerza de compresión radial aplicada no excede aproximadamente la tercera parte del d_s como lo indica (Pandirwar et al., 2015), la plántula tendrá más probabilidad de sobrevivir posterior a su manipulación a través de los tallos durante el trasplante mecanizado o automático.

En consecuencia, los resultados de este estudio permiten establecer un criterio biomecánico claro: mantener la carga de sujeción por debajo de un tercio del d_s , lo cual constituye una condición operativa segura para evitar daño estructural en las plántulas de jitomate durante proceso de trasplante mecanizado o automatizado. Finalmente, este estudio proporciona una base sólida para el diseño de sistemas de manipulación y extracción de trasplantadoras automáticas. Investigaciones futuras deberían considerar variables adicionales como la turgencia, la lignificación, la densidad de fibras de soporte, la estructura de la pared celular y la variabilidad genética con el fin de desarrollar modelos más robustos que describan el comportamiento biomecánico de los tallos bajo compresión radial y optimicen los criterios de diseño mecánicos.

5. Conclusiones

La RCF juega un papel importante al calcular la fuerza de sujeción de las plántulas durante su manipulación sin causarles daños mecánicos. Este estudio presentó el comportamiento de los tallos de las plántulas de jitomate principalmente en dos fases -fase inicial (RFC1) y fase final (RFC2 conocida como punto de ruptura)- bajo diferentes LV. No se detectaron diferencias significativas entre LV para los dos híbridos estudiados en las dos fases, por lo que no influyó la LV en las pruebas de RCF de los tallos. La RFC1 de los tallos de las plántulas de jitomate está entre los rangos de 15.903-94.410 N, superando estos valores se generan microfracturas, además, solo 30 % del total de las muestras estudiadas superaron $1/3 d_s$. En esta fase, los valores de RFC1 fueron similares independientemente del híbrido ya que su valor depende de las características físicas como el d_s , h_s y SCM. Mientras que, si se superan los valores de RFC1, se presenta la fase de RFC2 que llegan al punto de fractura del d_s , en un rango de 40.296-145.619 N. En esta fase, sobresalió el CIH sobre el GAH, por lo que los comportamientos de estas fuerzas están ligadas a las características mencionadas anteriormente y además de su genética. Sin embargo, si se requieren datos más precisos, se deberían incluir variables intrínsecas como la turgencia, el contenido de lignina y la densidad de la microestructura que justifiquen el comportamiento mecánico de los tallos al ser sometidos a la RCF. Finalmente, este estudio contribuye

en la base sólida para el diseño y desarrollo de grippers para sistemas de recolección de plántulas de jitomate en charolas germinadoras a través de los tallos en sistemas de trasplante automatizado, contemplando valores de desplazamientos equivalentes o mínimos al 33.33 % del d_s con RFC permisibles de 20 N para asegurar la microestructura de estas, minimizando pérdidas de plántulas durante la extracción y su posterior trasplante, evitando la aparición de hongos y estrés por daños.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada con el apoyo número 83853. Así mismo, a la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería y Uso Integral del Agua (IAUIA) por las facilidades en la realización de este estudio. De igual manera, a las personas que estuvieron involucradas en la realización de este estudio, al Dr. Noel Chávez Aguilera, Dr. Juan Sanabria, Biol. José Cutberto Vázquez Rodríguez, M.C. Cirene Gutiérrez Blando y Biól. Simón Morales Rodríguez, por su apoyo para el acceso y uso de los diferentes laboratorios y equipos utilizados en esta investigación. También, a los revisores por pares ciego, por su tiempo y sus valiosas observaciones para la mejora de este artículo.

Referencias

- Abubakar, A. J., Iya, S. A., Aliyu, B., & Tashiwa, Y. I. (2020). Determination of physico-mechanical properties of tomato seedlings for design of a tomato transplanter. *Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)*, 25(1), 106–122.
- Ahmed, M., Babayola, M., & Bake, I. D. (2024). Role of Horticultural Crops in Food and Nutritional Security : A Review. *Journal of Nutrition and Food Processing*, 7(8), 1–6. <https://doi.org/10.31579/2637-8914/226>
- Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., Hayat, F., Deng, L., Narejo, M. un N., Bozdar, B., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on Horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae*, 323(October 2023), 112512. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>
- Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P. (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation — a review. *Frontiers in Plant Science*, 15(April), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1357153>
- AL-Smadi, K., Ali, M., Zhu, J., Abdoh, A., Phan, K., & Mohammed, Y. (2025). Advances in Characterization of Transdermal and Topical Products using Texture Analyzer Systems. *AAPS PharmSciTech*, 26(5). <https://doi.org/10.1208/s12249-025-03148-x>
- ASTM, A. S. for T. and M. I. (2015). Standard test method for compressive properties of rigid plastics. In *ASTM International* (pp. 1–8).
- ASTM, A. S. for T. and M. I. (2016). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. In *ASTM D3967-16; ASTM International* (pp. 1–5).

- Baskin, T. I., & Jensen, O. E. (2013). On the role of stress anisotropy in the growth of stems. *Journal of Experimental Botany*, 64(15), 4697–4707. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert176>
- Ben, Z., Jibril, A. N., Sun, X., Bai, Y., Yang, D., Chen, K., & Dong, Y. (2023). Gluten Pellet Compression Characteristics and Fracture Simulation of Gluten Pellet. *Foods*, 12(8), 1598–1619. <https://doi.org/10.3390/foods12081598>
- Chen, J. H., Zhao, N., Fu, N., Li, D., Wang, L. J., & Chen, X. D. (2019). Mechanical Properties of Hulless Barley Stem with Different Moisture Contents. *International Journal of Food Engineering*, 15(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0033>
- Cheng, B., Wu, H., Zhu, H., Liang, J., Miao, Y., Cui, Y., & Song, W. (2024). Current Status and Analysis of Key Technologies in Automatic Transplanters for Vegetables in China. *Agriculture (Switzerland)*, 14(12), 2168. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>
- Khoshvaght Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. In *Routledge* (Second). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/doi.org/10.4324/9780203771587>
- FAO. (2023). *Crops and livestock products*. www.fao.org/faostat/
- Fox, J., & Monette, G. (1992). Generalized Collinearity Diagnostics. *Journal of the American Statistical Association*, 87(417), 178–183. <https://www.jstor.org/stable/2290467>
- Gallegos-Cedillo, V. M., Nájera, C., Gruda, N. S., Signore, A., Gallegos, J., Rodríguez, R., Ochoa, J., Egea-Gilabert, C., & Fernández, J. A. (2024). An in-depth analysis of sustainable practices in vegetable seedlings nurseries: A review. *Scientia Horticulturae*, 334(May), 113342. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113342>
- Grande, G., Hidalgo-Reyes, M., Cruz, P., & Velázquez-López, N. (2025). Physical–Mechanical Properties of Tomato Seedlings for the Design and Optimization of Automatic Transplanters. *AgriEngineering*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050138>
- Gruda, N. S., Samuolienė, G., Dong, J., & Li, X. (2025). Environmental conditions and nutritional quality of vegetables in protected cultivation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(2), 1–34. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70139>
- Han, D., Li, W., Cui, T., Wang, Q., Tang, C., Chen, L., Qu, Z., & Xu, L. (2024). Biomechanical features and parametric calibration of a bilayer bonded particle model for the cornstalk during harvest. *Scientific Reports*, 14(1), 1–24. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71005-1>
- Hou, J., Li, Z., Ma, Y., Xu, Y., Ding, H., Li, C., Li, C., Tang, Q., & Liu, M. (2025). Mechanical Properties of Corn Stalks and Behavior of Particles During Compression Process Based on Discrete Element Method. *Agriculture (Switzerland)*, 15(17), 1824. <https://doi.org/10.3390/agriculture15171824>
- Hou, J., Ma, Z., Ma, Y., Liu, X., Jin, J., Yu, Y., Tang, Z., & Wang, W. (2025). Compression behavior of castor stalk:

- an experiment and simulation investigation on its different layer particles based on discrete element method. *Computational Particle Mechanics*, June, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s40571-025-00987-0>
- Huang, B., Wang, X., Su, N., & Fang, C. (2024). High-performance engineered bamboo units with customizable radius based on pressure-drying technology: Multi-scale mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 457(September). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139472>
- Jensen, A., Mogensen, L., van der Werf, H. M. G., Xie, Y., Kristensen, H. L., & Knudsen, M. T. (2024). Environmental impacts and potential mitigation options for organic open-field vegetable production in Denmark assessed through life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 46(February), 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.008>
- Kebede, T. T. (2023). The Role of Vegetables in Ensuring Food Security and Poverty Alleviation: The Case of Ethiopia. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 13(3), 1–5. <https://doi.org/10.35248/2155-9600.23.13.0>
- Khadatkar, A., Gaikwad, B., & Pandirwar, A. (2020). Biometric Properties of Plug Vegetable Seedlings Relevant to the Design of Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering*, 57(1), 16–24.
- Khadatkar, A., Mathur, S. M., & Gaikwad, B. B. (2018). Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation. *Current Science*, 115(10), 1884–1892. <https://doi.org/10.18520/cs/v115/i10/1884-1892>
- Leskovar, D. I., & Othman, Y. A. (2021). Direct Seeding and Transplanting Influence Root Dynamics, Morpho-Physiology, Yield, and Head Quality of Globe Artichoke. *Plants*, 10(50), 899. <https://doi.org/10.3390/plants10050899>
- Li, P., Yun, Z., Gao, K., Si, L., & Du, X. (2022). Design and Test of a Force Feedback Seedling Pick-Up Gripper for an Automatic Transplanter. *Agriculture*, 12, 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111889>
- Li, S., Huan, X., Wang, T., Hui, Y., You, Y., & Wang, D. (2024). Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217(November 2023), 108644. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108644>
- Luhua, H., Mao, H., Yan, L., Hu, J., Huang, W., & Dong, L. (2015). Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(7), 23–30. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.004>
- Magar, A. P., Nalawade, S. M., Walunj, A. A., Khadatkar, A., Bhangare, S. C., Bhalekar, M. N., Nimbalkar, C. A., & Gaikwad, B. B. (2023). Engineering Properties of Some Plug-type Vegetable Seedlings for Development of Automatic Vegetable Transplanter. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 60(1), 1–13. <https://doi.org/10.52151/jae2023601.1792>
- Mansuriya, V., Kathiria, R. K., & Khanpara, B. (2024). Implications of biometric properties of chilli seedlings for mechanical transplantation. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(12), 618–622.

<https://doi.org/10.33545/2618060x.2024.v7.i12h.2229>

- Mou, Q., Ji, S., Li, P., Li, X., Chen, Z., He, L., & Li, X. (2025). Tension and compression behaviors of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) for structural use. *Case Studies in Construction Materials*, 22(December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04735>
- Pagare, V., Din, M., Nandede, B. M., Yadav, D., Mehta, C. R., Kumar, M., & Singh, K. (2022). A comparison of onion seedling growth under various environmental conditions, with an emphasis on mechanical transplanting. *Journal of Applied Horticulture*, 24(1), 36–41. <https://doi.org/10.37855/jah.2022.v24i01.07>
- Pandirwar, A., Kumar, A., Mani, I., & Islam, S. (2015). Biometric properties of onion seedlings relevant to the development of onion seedling transplanter. *Journal of Applied and Natural Science*, 7(2), 768–773.
- Pápai, B., Kovács, Z., Tóth-Lencsés, K. A., Bed'ó, J., Chan, K. N., Kovács-Weber, M., Pap, T. I., Csilléry, G., Szóke, A., & Veres, A. (2024). Investigating the Variation between Lignin Content and the Fracture Characteristics in *Capsicum annuum* Mutant Stems. *Agriculture*, 14(10), 17711–1782. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101771>
- Peng, Z., Yang, F., Li, Y., Li, X., Li, B., & Xu, G. (2025). Design and Testing of a Whole-Row Top-Loosening Stem-Clamping Seedling Extraction Device for Hole Tray Seedlings. *Agriculture (Switzerland)*, 15(2), 165. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020165>
- Pruyn, M. L., & Spicer, R. (2012). Parenchyma. *ELS. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester*, 1–8. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0002083.pub2>
- Rivera, S., Giongo, L., Cappai, F., Kerckhoffs, H., Sofkova-Bobcheva, S., Hutchins, D., & East, A. (2022). Blueberry firmness - A review of the textural and mechanical properties used in quality evaluations. *Postharvest Biology and Technology*, 192(April), 112016. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112016>
- Shah, D. U., Reynolds, T. P. S., & Ramage, M. H. (2017). The strength of plants: Theory and experimental methods to measure the mechanical properties of stems. *Journal of Experimental Botany*, 68(16), 4497–4516. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx245>
- Sharma, A., Khar, S., Chaudhary, D., & Thakur, P. (2023). Study of Biometric Attributes of Plug Type Tomato Seedlings Pertinent to Transplanter Design. *Indian Journal of Ecology*, 50(2), 503–507. <https://doi.org/https://doi.org/10.55362/IJE/2023/3926>
- Sherif, S. M., Segerlind, L. J., & Frame, J. S. (1976). An Equation for the Modulus of Elasticity of a Radially Compressed Cylinder. *Transactions of the ASAE*, 19(4), 0782–0785. <https://doi.org/10.13031/2013.36116>
- Shuangyan, H., Minjuan, H., & Wenyi, Z. (2022). Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(3). <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2022.03.002>

- Vázquez-Casarrubias, G., Alberto Escalante-Estrada, J. S., Teresa Rodríguez-González, M., Ramírez-Ayala, C., & Enrique Escalante-Estrada, L. (2011). Edad al trasplante y su efecto en el crecimiento y rendimiento de chile aplaxtleco. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 61–65.
- Wang, H., Li, Y., & Ji, K. (2025). Design and Experimental Process of Vertical Roller Potato–Stem Separation Device. *Applied Sciences*, 15(19), 10683. <https://doi.org/10.3390/app151910683>
- Xue, K., Gao, K., Wang, T., Zhang, X., Zhang, S., Kuang, F., & Zhu, D. (2023). Biomechanical modeling of rice seedling stalk based on multi-scale structure and heterogeneous materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210(March), 107904. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107904>
- Yang, Z., Zhang, K., Yang, J., & Yao, Y. (2025). Parameter Optimization and Experimental Study on Alfalfa Stem Flattening Process Based on DEM–MBD. *Agriculture (Switzerland)*, 15(9), 922. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090922>
- Zhao, W., Chen, M., Xie, J., Cao, S., Wu, A., & Wang, Z. (2021). Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of banana bunch stalk for postharvest machine development. *Computers and Electronics in Agriculture*, 188(June), 106308. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107502>
- Zhao, W., Chen, M., Xie, J., Cao, S., Wu, A., & Wang, Z. (2023). Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204(November 2022), 107502. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107502>
- Zhao, Y., Tang, Z., & Chen, S. (2022). Loading Model and Mechanical Properties of Mature Broccoli (*Brassica oleracea* L. Var. Italica Plenck) Stems at Harvest. *Agriculture (Switzerland)*, 12(10), 1519. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101519>

6. DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PLÁNTULAS DE JITOMATE DE CHAROLAS GERMINADORAS PARA TRASPLANTADORAS AUTOMÁTICAS

Este capítulo presenta el diseño de un dispositivo para la extracción simultánea de diez plántulas de jitomate cultivadas en charolas germinadoras de poliestireno expandido (EPS), destinado a su incorporación en sistemas automáticos de trasplante. El diseño del prototipo se fundamenta en las principales propiedades físico-mecánicas de las plántulas, entre ellas el diámetro y la altura del tallo, la fuerza de adhesión del cepellón a la cavidad y la fuerza de compresión radial (RCF) del tallo. Estos parámetros permiten establecer criterios de diseño para lograr una extracción eficiente, reducir daños mecánicos y garantizar una manipulación adecuada durante el trasplante.

Estado: borrador

DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PLÁNTULAS DE JITOMATE DE CHAROLAS GERMINADORAS PARA TRASPLANTADORAS AUTOMÁTICAS

Gaudencio Grande¹, Martin Hidalgo-Reyes^{2,*}, Pedro Cruz², Noé Velázquez-López³

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

²Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

Autor de correspondencia: mhidalgor@chapingo.mx

Resumen

La extracción de las plántulas de jitomate es la fase principal del trasplante automatizado. Sin embargo, se necesitan de ciertas características del dispositivo que simule los pulpejos de los dedos humanos para evitar daños mecánicos y su posterior estrés post-trasplante o pérdida total de la plántula. Por ello, el objetivo de esta investigación fue el diseño de un dispositivo extractor de plántulas de jitomate a través de sus tallos (considerando sus propiedades bio-mecánicas) de las charolas germinadoras aplicando las fases del proceso de diseño. Las dimensiones del prototipo son 970×830×540 mm y un peso total estimado de 33 kg. La tasa de extracción es de 10 plántulas de jitomate simultáneamente, el cual puede ser configurado para bajar la tasa a 5 plántulas por cada carga y descarga. El cabezal del dispositivo avanza por cada cavidad determinada por el fabricante de charola germinadora (aproximadamente 32 mm entre una cavidad y otra). El prototipo será capaz de adaptarse a un sistema de trasplante mecánico y la disminución de mano de obra que extrae las plántulas de jitomate en fechas críticas de esta labor, realizando así la transición tecnológica en equipos de trasplante existentes en México.

Palabras clave: diseño biomimético, efector final, extracción de plántulas, *gripper*, plántulas de jitomate, propiedades bio-mecánicas.

DESIGN OF A TOMATO SEEDLING PICK-UP FOR GERMINATION TRAYS IN AUTOMATIC TRANSPLANTERS

Gaudencio Grande¹, Martin Hidalgo-Reyes^{2,*}, Pedro Cruz², Noé Velázquez-López³

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

²Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

Autor de correspondencia: mhidalgor@chapingo.mx

Abstract

The tomato seedlings picking up is the main phase of automated transplanting. However, the device needs certain characteristics that mimic the feel of human fingertips to avoid mechanical damage and subsequent post-transplant stress or total seedling loss. Therefore, this research aimed to design a device to extract tomato seedlings from germination trays picking them up from their stems (considering their biomechanical properties). The prototype measures 970×830×540 mm and would have an estimated total weight of 33 kg. The extraction rate is 10 tomato seedlings simultaneously, which can be configured to reduce the rate to 5 seedlings per loading and unloading cycle. The device's head advances through each cavity determined by the germination tray manufacturer (approximately 32 mm between cavities). This technology will be able to adapt to a mechanical transplanting system and reduce the labor required to extract tomato seedlings during critical periods of this task, thus facilitating the technological transition in existing transplanting equipment in Mexico.

Keywords: biomimetic design, end effector, seedling extraction, gripper, tomato seedlings, bio-mechanical properties.

Introducción

El jitomate es una de las hortalizas más importantes a nivel mundial. Se estima que se consume en fresco y en productos procesados, con un 80% y 20%, respectivamente (Gibon et al., 2025; Kumar et al., 2020). Además, se ha reportado que este fruto es una fuente de vitaminas, minerales y numerosos compuestos bioactivos (por ejemplo, carotenoides, polifenoles, entre otros), por lo que tiene un alto valor nutricional y funcional. También posee propiedades cardiovasculares, anticancerígenas y beneficiosas para la salud de la piel (Bajon et al., 2026; Collins et al., 2022). Particularmente en México, durante el 2024 el jitomate ocupó el 23.2% en la producción de las hortalizas, y el 50.22% del total de las 3.724 millones de toneladas producidas se exportó hacia los Estados Unidos (DGSIA, 2025).

Por su importancia, esta hortaliza se ha estudiado desde diferentes etapas fenológicas. El modelo agronómico del jitomate, generalmente, está estructurado en cinco etapas fenológicas, desde su establecimiento hasta su cosecha de los frutos maduros (Shamshiri et al., 2018). Dentro de estas etapas, se contempla la siembra de las semillas y el trasplante de las plántulas, siendo esta última labor, una de las más repetitivas, críticas, demandante de mano de obra y tiempo (Khadatkar et al., 2024; Nage et al., 2023). El trasplante de plántulas de jitomate, en comparación con la siembra directa, se realiza con el objetivo de realizar una correcta distribución y controlar el número de plantas en un área determinada, para con ello lograr un crecimiento homogéneo y sistemas radiculares más fuertes, con el propósito de incrementar los rendimientos y obtener mayor calidad del fruto (Laužiké & Jankauskiené, 2026; Leskovar & Othman, 2021; Mejía-Betancourt et al., 2023).

El trasplante de las plántulas se ha realizado desde hace tiempo; sin embargo, si se realiza de forma manual, se requiere de habilidad para evitar dañar las raíces, por lo que, a lo largo de los años se ha desarrollado tecnología para realizar la práctica de forma semiautomática y automática (Ahmed et al., 2024; Nage et al., 2023). La diferencia entre estos dos niveles de tecnología de trasplante radica en

el grado de automatización. El automático incluye el sistema de extracción, transporte y descarga, y plantación de las plántulas, mientras que el semiautomático carece del sistema de extracción, por lo que debe apoyarse de personas que extraen las plántulas de las charolas germinadoras (Cheng et al., 2024; Khadatkar et al., 2025).

El sistema de extracción de plántulas de las charolas germinadoras es la más compleja. Este paso es el que identifica al trasplante automático, ya que involucra características intrínsecas de las plántulas, intentando eliminar daños mecánicos que pudieran afectarlas durante el post-trasplante (L. Han et al., 2024). Este sistema se puede realizar de diferentes maneras: inserción de puntas en el cepellón, sujeción a través de los tallos, extracción con una fuerza aplicada de un vástago hacia arriba por la parte inferior del cepellón o la variante en el que se aplica neumática (flujo de aire), y la combinación de sujeción de los tallos con estas últimas opciones; así mismo, puede ser una plántula y múltiples plántulas (Cheng et al., 2024; X. Han et al., 2025). Las variantes en el diseño del sistema de extracción dependen de la decisión del diseñador y el tipo de plántula que se está manipulando.

De acuerdo con Tapia et al. (2015) y la FAO (2011), las hortalizas se pueden clasificar según la parte comestible de la planta en plántulas con: hojas, raíz, tallo y bulbo, flor, y frutos; las cuales se diferencian tanto en el número de días de desarrollo como en la estructura del follaje desde la etapa de plántula. Sin embargo, para el trasplante de hortalizas, la principal diferencia radica en la estructura del tallo. Por ejemplo, en el caso del jitomate los tallos suelen ser más largos con hojas alternadas, y en el caso de la lechuga los tallos suelen ser más cortos con hojas más desarrolladas con forma de roseta (Bloch et al., 2025; G. Zhang et al., 2022).

Se han llevado a cabo diversos estudios para el desarrollo de sistemas de extracción en diferentes hortalizas y los métodos de extracción. Sivakumar & Durairaj (2014) se enfocaron en el desarrollo de un sistema que extrae la plántula a través del cepellón de charolas germinadoras de 98 cavidades. Para ello,

emplearon un mecanismo tipo garra, obteniendo una frecuencia de 15-20 plántulas*min⁻¹ y una tasa de éxito de 80%. Ma et al. (2023) desarrollaron un efector final (abrazadera y envoltura) combinado con una boquilla que funciona mediante flujo de aire para extraer las plántulas de pepino en charolas germinadoras de 72 cavidades. Además, L. Han et al. (2019) trabajaron en una pinza compuesto de múltiples pines para plántulas de col china y jitomate. Por su parte, Yue et al. (2022) desarrollaron un dispositivo neumático tipo garras para plántulas de pepino en charolas germinadoras de 72 cavidades con una frecuencia de 120 plántulas* min⁻¹ y una tasa de éxito de 97.9%. Asimismo, Ma et al. (2020) emplearon un dispositivo con 8 efectores finales (una garra por efector) para plántulas de pepino (*Jingyou 1*) en charolas germinadoras de 72 cavidades con una frecuencia de 144 plántulas* min⁻¹ y una tasa de éxito de 98.08%. Por otro lado, Du et al. (2023) desarrollaron un efector compuesto de agujas para plántulas de pimiento en charolas germinadoras de 72,128 y 200 cavidades logrando una tasa de éxito de 97.07%, 98.24% y 99.22%, respectivamente.

A través del tallo: mecanismo con dedos de sujeción controlados con válvulas solenoides de presión para plántulas de pimiento con una frecuencia de 72 plántulas* min⁻¹ y una tasa de éxito de 94.90% (Zhou et al., 2024); con dispositivo compuesto de una pinza de sujeción y un eyector (fuerza empuje en el cepellón) para plántulas de pimiento en charolas germinadoras de 72 cavidades con una frecuencia de 60 plántulas*min⁻¹ y una tasa de éxito de 94.44% (Peng et al., 2025); con sistema de extracción compuesto de 8 pinzas de sujeción para plántulas de pimiento con una frecuencia de 40, 60, 90 y 120 plántulas*min⁻¹ (C. Han et al., 2021); con un manipulador y efector final (tipo mandíbula) para plántulas de chile y jitomate con una frecuencia de 3 plántulas plántulas*min⁻¹ y una tasa de éxito 91-95% (Khadatkar et al., 2024).

La germinación aleatoria de las semillas en el tiempo y en el espacio de la cavidad de la bandeja de germinación es un reto para los sistemas de extracción. Estos factores repercuten en la homogeneidad de la morfología física, y también afecta

la posición espacial en la charola germinadora, provocando que las hojas se superpongan e invadan las cavidades vecinas (Gao et al., 2024; Xia et al., 2025).

La variación en la altura y forma de las plántulas representa una dificultad para el desarrollo de sistemas de extracción para el trasplante automático, debido a que el mecanismo de sujeción debe adaptarse a las características de cada plántula. Por ello, se han desarrollado sistemas que incorporan sensores de fuerza y técnicas de visión artificial. Ji et al. (2019) desarrollaron un sensor piezoeléctrico de fluoruro de poli vinilideno para controlar la sujeción de las plántulas mediante garras insertadas en el cepellón, obteniendo una sensibilidad de 0.5264 V/N, una linealidad de 4.74% y una precisión de 6.51%. Li et al. (2022) desarrollaron una pinza para sujetar las plántulas por el tallo, utilizando un elemento Hall lineal para la retroalimentación de fuerza; el sistema de la pinza presentó una sensibilidad de 0.0693 V/N, un coeficiente de determinación de 0.986 y un rango de 10 N. En cuanto a la identificación de las plántulas, Liu et al. (2024) desarrollaron un sistema basado en YOLOv5 para determinar la posición y forma de los tallos de tomate, con una precisión de 92.6% y un $mAP_{0.5}$ de 95.4%. Li et al. (2022) desarrollaron otro sistema de visión para localizar los hoyos de las bandejas e identificar el estado de las plántulas de jitomate mediante un método de agrupamiento basado en teoría difusa, clasificaron las plántulas en cuatro categorías: sanas, hoyos vacíos, dañadas y otras, con precisiones de 97.4, 81.4, 94.8 y 76.7%, respectivamente.

Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han realizado en charolas germinadoras de plástico, mientras que en la región de México centro, se utilizan charolas de poliestireno expandido para la germinación de plántulas en la mayoría de los casos. Así mismo, existen información escasa sobre el desarrollo de mecanismos de extracción de plántulas de jitomate o desarrollo de trasplantadoras automáticas que incluyan este sistema. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue diseñar un dispositivo para la extracción de plántulas de jitomate a través de sus tallos de charolas germinadoras para el desarrollo de

trasplantadoras automáticas mediante las fases del proceso de diseño con metodologías de diseño existentes.

Materiales y métodos

La Figura 1 presenta el diagrama general de la metodología empleada en este estudio. Los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, correspondientes a las propiedades físico-mecánicas de las plántulas. Con base en estos resultados, se desarrolló el diseño conceptual y, posteriormente, el diseño de detalle del dispositivo.

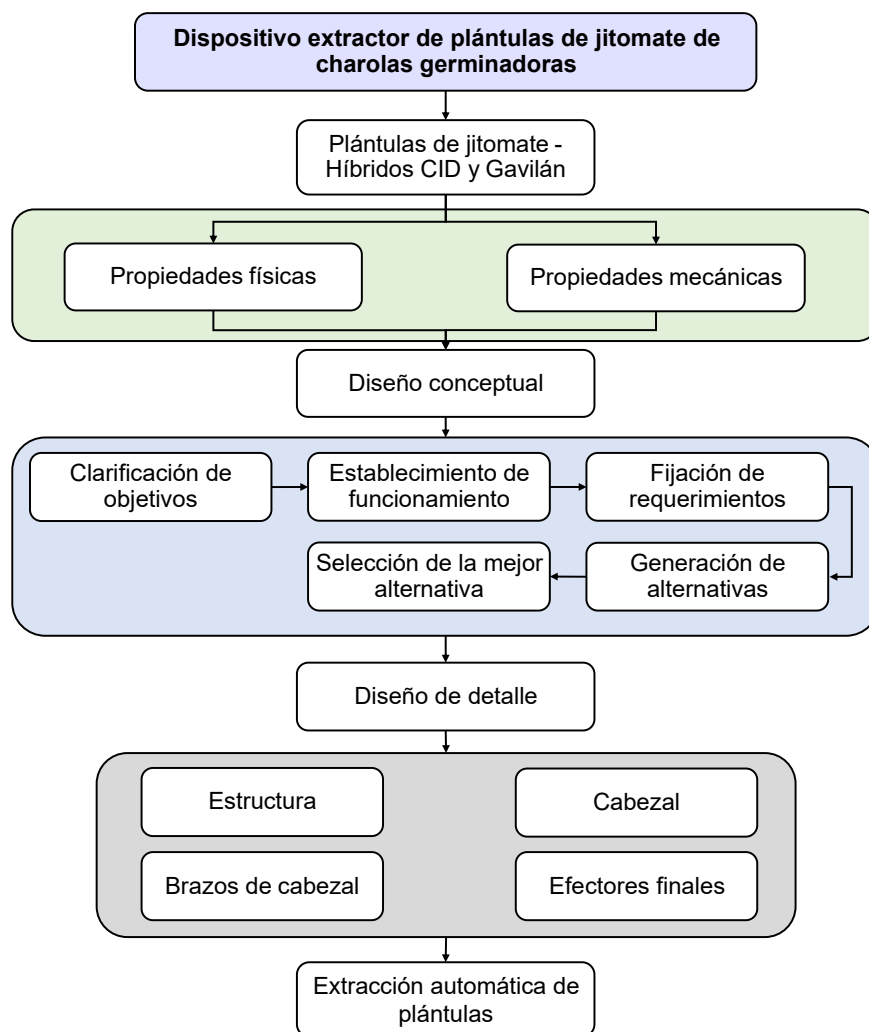


Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.

Localización del experimento

El diseño del prototipo fue realizado en el posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicada en Texcoco de Mora, Estado de México (19.4897° N, 98.8936° W) a 2 272 msnm. Las pruebas de las propiedades físico-mecánicas de las plántulas de jitomate fueron realizadas a temperatura ambiente en diferentes fases y laboratorios: el Laboratorio de Materiales Biológicos y el Laboratorio de Física y Mecánica de Suelos del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (UACH), el laboratorio del Departamento de Fitotecnia (UACH) y en las instalaciones del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) del Instituto Politécnico Nacional.

Consideraciones agronómicas y caracterización bio-mecánica de las plántulas

Como parte de los objetos de estudio, se utilizaron dos híbridos F1 comerciales: CID y Gavilán. En la región centro de México, la siembra de las semillas de las plántulas de jitomate comúnmente se realiza en charolas de germinación de poliestireno expandido (EPS) con 200 cavidades cónicas y con orificios de 5 mm de diámetro para el drenaje (Figura 2a). Para este estudio, las semillas de jitomate fueron sembradas a una profundidad de 10 mm en un sustrato compuesto de Peat Moss Sunshine (80%), agrolita (10%) y vermiculita grado medio (10%) para el recubrimiento de las semillas. El área de germinado se mantuvo en condiciones de temperatura y humedad relativa a 25 °C y 90%, respectivamente.

Posteriormente, las plántulas de jitomate con 30 días de edad fueron utilizadas para estimar sus propiedades biomecánicas. Las características morfológicas de las plántulas de jitomate consideradas para el diseño del prototipo se describen en la Figura 2b. Es importante especificar que las pruebas se realizaron a temperatura ambiente. En este sentido, se utilizó la fuerza de compresión radial (RCF) para la determinación de la fuerza que soporta una plántula al ser tomada del tallo, utilizando el desplazamiento del plato superior del texturómetro (ΔD)

aproximado de un tercio del diámetro del tallo (d_s). Además, se determinó la fuerza de adhesión (AF) para conocer la fuerza necesaria que se necesita para extraer una plántula de su cavidad en la charola germinadora.

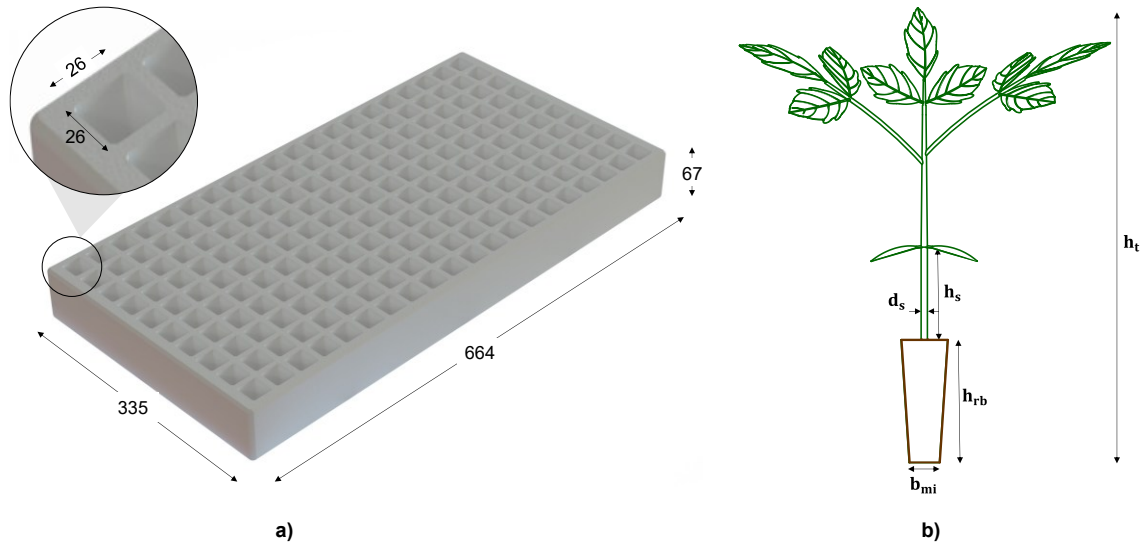


Figura 2. Diagrama de los materiales experimentales: a) dimensiones generales de la charola germinadora, b) propiedades físicas de las plántulas de jitomate. d_s -diámetro del tallo de la plántula, h_s -altura del tallo llamada hipocótilo que se encuentra entre el cepellón y las hojas cotiledóneas, d_{se} -altura a la que se midió el d_s , b_{ma} -base mayor del cepellón, b_{mi} -base menos del cepellón.

Diseño conceptual del dispositivo extractor

Una de las fases fundamentales después de la caracterización de las plántulas de jitomate es el diseño conceptual del prototipo. Esta fase fue desarrollado siguiendo la metodología de Cross, (2021) y Pahl et al. (2007). A partir de las metodologías propuestas por dichos autores, se desarrolló una metodología adaptada para el diseño conceptual del dispositivo extractor de plántulas de jitomate (Figura 3).

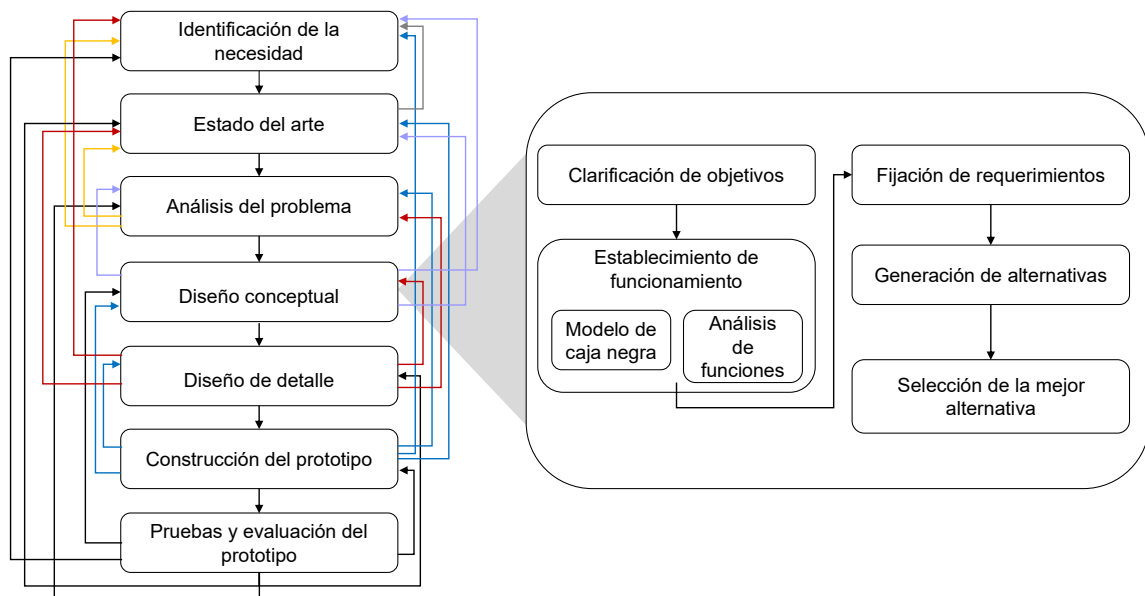


Figura 3. Proceso del diseño adaptado al problema planteado: metodología del diseño conceptual.

Diseño de detalle

El diseño de detalle es la fase en la cual se materializan las ideas generales del diseño conceptual. Esta etapa involucra las propiedades físico-mecánicas de las plántulas, los cálculos de ingeniería y el dimensionamiento del prototipo, con el fin de obtener los planos de fabricación e incluir la lista de materiales.

Descripción y principio de funcionamiento del sistema

Basado en los parámetros bio-mecánicos del tallo de las plántulas y las características físicas de las charolas germinadoras, obtenidas en los capítulos anteriores 4 y 5, se diseñó un dispositivo extractor de plántulas que tiene el principio de funcionamiento de un CNC router, con movimiento en los tres ejes para el desplazamiento y posicionamiento del cabezal que sujeta los efectores finales en toda el área de trabajo del dispositivo. La sujeción de los tallos a través de los servomotores con los que funcionan los gripper de los efectores.

Diseño del efector final

En la agricultura, los materiales vegetativos son heterogéneos y las características de las plántulas no son la excepción, y debido a que no

se dispuso de mediciones experimentales del desplazamiento lateral de las plántulas durante la sujeción, se consideró un escenario de máxima excentricidad determinado por las dimensiones de la cavidad de la charola germinadora. La distancia máxima de las plántulas en la cavidad de la charola germinadoras (deflexión máxima), se estimó como la mitad de la holgura entre la cavidad y el d_s (Figura 3):

$$\delta = \frac{l_{cg} - d_s}{2} \dots \dots \dots (1)$$

donde: l_{cg} – es la medida del lado de la cavidad de la charola germinadora (mm).

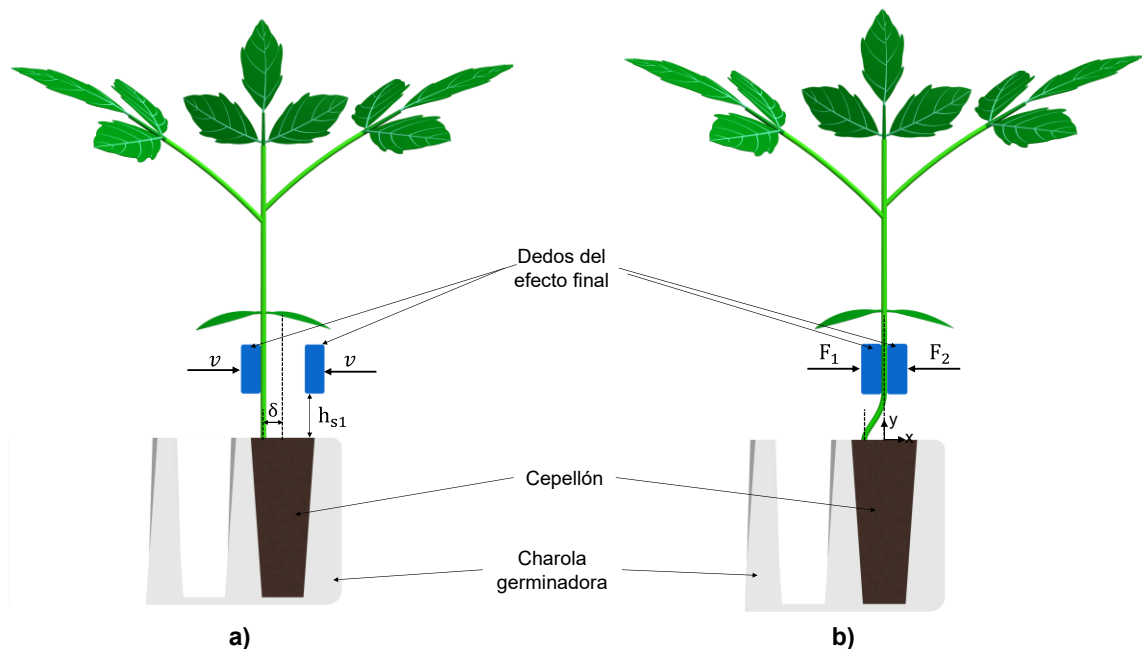


Figura 4. Análisis del proceso de sujeción de las plántulas: a) Diagrama de una plántula desplazada del centro de la cavidad, b) Diagrama de la plántula desplazada del centro de la cavidad sujeta por los dedos del efector final.

Para el cálculo de la altura a la que el dedo del efector (grripper) sujeta el tallo (h_{s1}) se enlistan las siguientes Ecuaciones (2-12) retomados de Dasgupta & Haslach (1993), Peng et al. (2025) y Ren et al. (2025). Por lo general, el tallo al ser sujetado por el efector entra en un momento inestable, y la Ecuación (1) explica la deflexión del tallo aproximada:

$$y(x) = \delta \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2h_{s1}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

donde: $y(x)$ – deflexión o desplazamiento del tallo a lo largo del eje x (mm), x – posición de la sección (mm), δ – desplazamiento horizontal en la posición donde empieza el gripper para la sujeción del tallo (mm), y h_{s1} – altura a la que se sujeta el tallo que se encuentra entre el gripper y la b_{ma} (mm).

La energía de deformación por flexión del tallo bajo la fuerza de sujeción está dada por la Ecuación (3):

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^{h_{s1}} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \dots \dots \dots (3)$$

donde: E – módulo de elasticidad del tallo (MPa), I – momento de inercia de la sección x (mm⁴).

Se obtiene la segunda derivada de la Ecuación (2), y se sustituye en la Ecuación (3) y se obtiene la Ecuación (5):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\pi^2 \delta}{4h_{s1}^2} \cos \frac{\pi x}{2h_{s1}} \dots \dots \dots (4)$$

$$U = \frac{EI}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 \int_0^{h_{s1}} \left(\cos \frac{\pi x}{2h_{s1}} \right)^2 dx = \frac{EI\pi^4 \delta^2}{64h_{s1}^3} \dots \dots \dots (5)$$

El trabajo realizado al sujetarse el tallo se determina por la Ecuación (6):

$$W = F_c \delta \dots \dots \dots (6)$$

donde: F_c – es la fuerza crítica aplicada en el extremo de sujeción de tallo (N).

Entonces, la energía potencial total externa se determina con la Ecuación (7):

$$\Pi_p = U - W = \frac{EI\pi^4\delta^2}{64h_{s1}^3} - F_c\delta \dots \dots \dots (7)$$

Basándose en el teorema de mínima energía potencial ($\delta\Pi = 0$), se obtiene la Ecuación (8):

$$\frac{\partial\Pi_p}{\partial\delta} = \frac{EI\pi^4\delta}{32h_{s1}^3} - F_c = 0 \dots \dots \dots (8)$$

La tensión de flexión de los tallos en donde emerge la plántula (p) es determinada usando las ecuaciones del momento flector de Navier, del momento de inercia, módulo de sección del tallo, se obtiene la Ecuación 9:

$$\sigma_p = \frac{M_p}{W_p} \dots \dots \dots (9)$$

$$W_p = \frac{I}{\frac{d_s}{2}} \dots \dots \dots (10)$$

$$I = \frac{\pi d_s^4}{64} \dots \dots \dots (11)$$

Por lo tanto:

$$\sigma_p = \frac{32F_ch_{s1}}{\pi d_s^3} \dots \dots \dots (12)$$

Sin embargo, los valores de módulo de elasticidad del tallo ($E = 32.54$ MPa) y fuerza crítica de flexión ($F_{cf} = 2.51$ N) fueron retomados de investigadores Q. Zhang et al. (2026). Por lo que, basándose en la teoría clásica de vigas de Euler–Bernoulli, la deflexión máxima en el extremo libre de una viga en voladizo sometida a una carga puntual se expresa como:

$$\delta = \frac{F_c h_{s1}^3}{3EI} = \frac{64F_c h_{s1}^3}{3E\pi d_s^4} \dots \dots \dots (13)$$

Por lo que para obtener la altura a la que se debe sujetar la plántula, despejando la Ecuación (12) y retomando la Ecuación (1) para el valor de δ , se obtuvo lo siguiente:

$$h_{s1} = \sqrt[3]{\frac{3E\pi d_s^4 \delta}{64F_c}} \dots \dots \dots (14)$$

La Figura 5 explica la estructura general en que los elementos funcionan para la sujeción de la plántula, el servomotor realiza la función de la transmisión de movimiento de los dos gripper del cual está compuesto el efector.

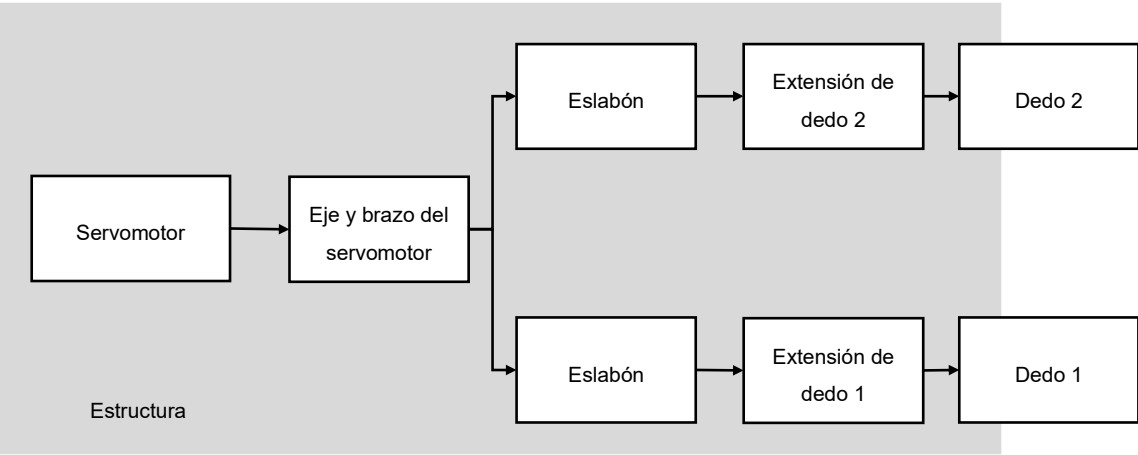


Figura 5. Diagrama general del efector diseñado.

Basándose en los dedos involucrados durante el agarre y extracción de las plántulas y aplicando biomimetismo, se desarrolló un efector que está basado en los dedos humanos (Figura 6). El material de los dedos del efector final se optó por utilizar silicona RTV que simula la yema del dedo y permite la sujeción de los tallos de las plántulas sin dañarlos.

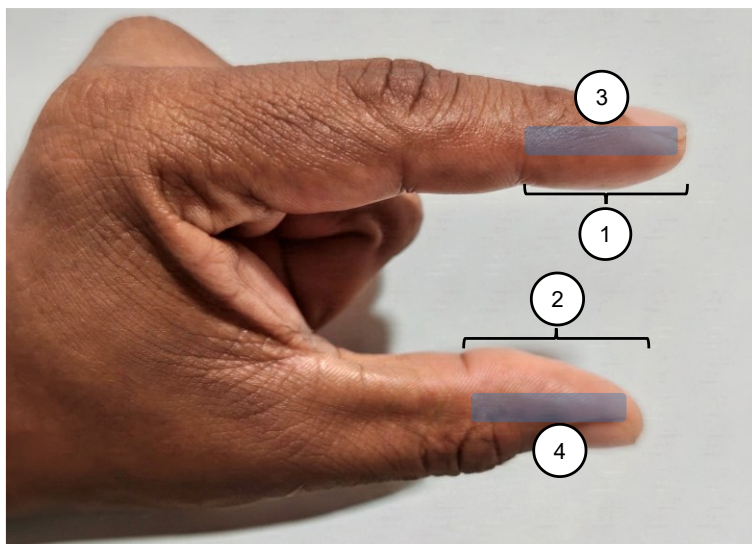


Figura 6. Anatomía de las partes de los dedos involucrados en la extracción de las plántulas a través de los tallos. (1) pulpejo del índice, (2) pulpejo del pulgar, (3) zona de la falange (hueso) del índice y (4) zona de la falange (hueso) del pulgar.

Resultados y discusión

Caracterización físico-mecánica de las plántulas

En seguimiento a los capítulos 4 y 5, se obtuvieron los siguientes resultados. En el Cuadro 1, se presentan las características físico-mecánicas de los tallos y la AF de las plántulas en dos híbridos comerciales consideradas para el diseño del efector final del dispositivo extractor. Sin embargo, para el caso de la RCF que se asocia con la fuerza de sujeción, se requiere un valor conservador de 20 N y el 98% de los datos obtenidos superan este valor, por lo que, si la fuerza aplicada por las pinzas supera este valor, hay más probabilidad de daños en los tallos.

Cuadro 1. Características físico-mecánicas de los tallos de plántulas de jitomate tomadas en cuenta para el diseño del dispositivo extractor.

Híbrido	ED	d_s (mm)	h_s (mm)	SMC (%)	RCF (N)	ΔD (mm)	AF (N)
CID	$\bar{x}$	3.46	31.7	93.90	42.20	1.08	7.47
	Máx.	4.14	46.2	96.80	94.40	1.70	13.18
	Mín.	2.46	18.3	89.80	15.90	0.55	2.84
	SD	0.32	6.32	1.64	13.00	0.22	2.39
	CV	9.11	19.90	1.75	30.80	20.60	32.01
Gavilán	$\bar{x}$	3.43	32.60	94.90	38.50	1.03	3.82
	Máx.	4.12	51.60	97.90	66.80	1.52	11.44
	Mín.	2.28	15.30	92.00	18.30	0.54	0.98
	SD	0.36	6.17	1.030	11.20	0.22	1.70
	CV	10.60	18.90	1.080	29.10	21.30	44.58

ED-estadísticos descriptivos, $\bar{x}$ -media, SD-desviación estándar, CV-coeficiente de variación.

Diseño conceptual

Árbol de objetivos y fijación de requerimientos

La Figura 7 muestra la clarificación de los objetivos del dispositivo extractor. La Figura 7 muestra el establecimiento de funciones del prototipo desarrollado. Se generó la caja negra que convierte entradas y salidas deseadas (Figura 8a) y el diagrama de las funciones (caja transparente) del dispositivo extractor (Figura 8b). La lista de demandas y deseos para el desarrollo del dispositivo extractor se presentan en el Cuadro 2. La De denomina a las demandas del cliente son las que deben considerar tal cual, ya que son restricciones que tiene el diseñador al realizar el diseño del prototipo según las condiciones de trabajo, en este caso, se consideró las dimensiones de la charola de germinación y las características de las plántulas de jitomate; por otra parte, la Ds denomina los deseos que el cliente o el diseñador desearía satisfacer en caso de ser necesario.

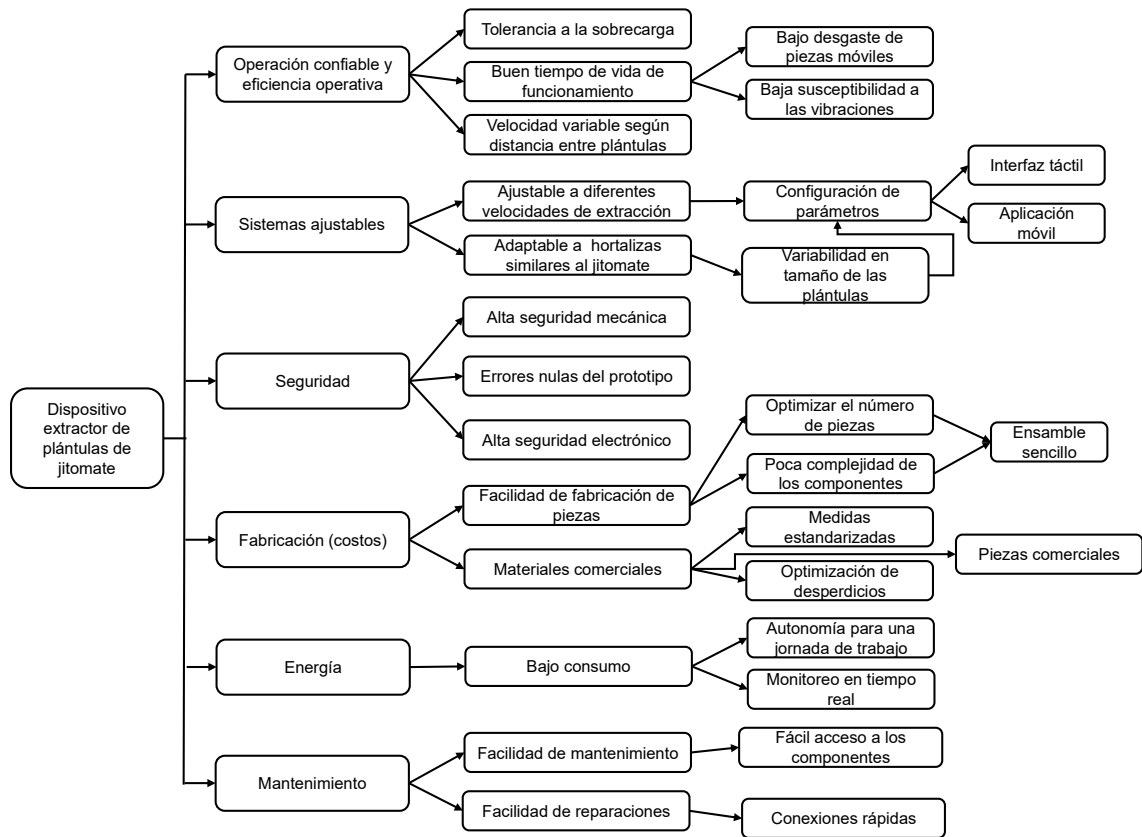


Figura 7. Árbol de objetivos del prototipo diseñado.

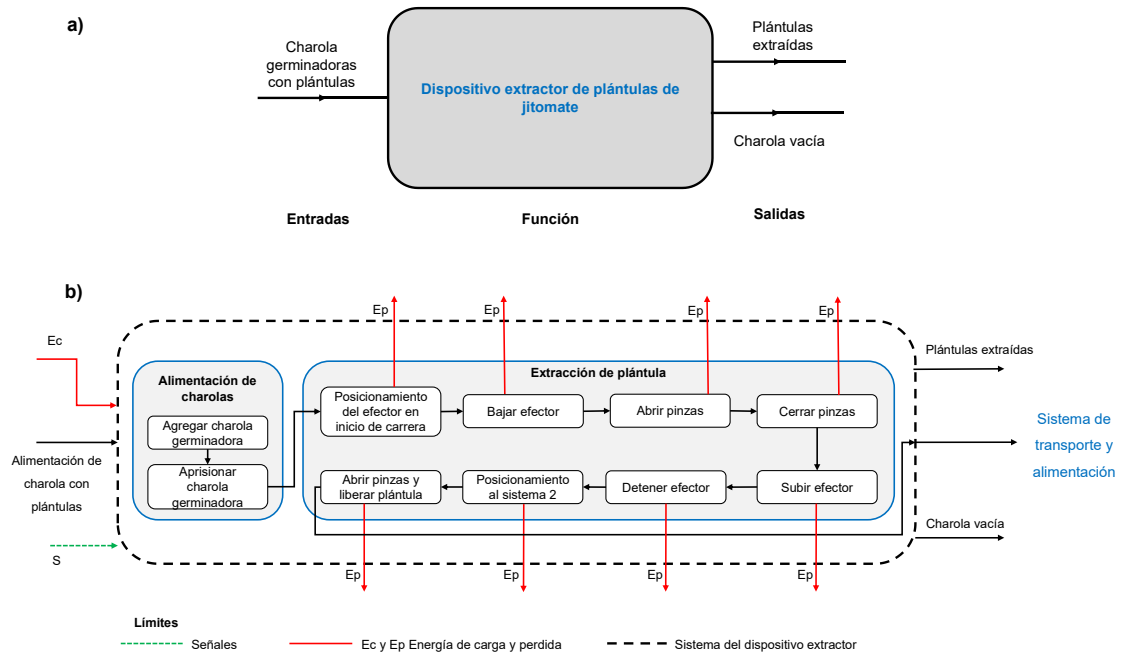


Figura 8. Establecimiento de funciones: a) caja negra y b) análisis de las funciones del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.

Cuadro 2. Especificaciones para el mecanismo de recolección de las plántulas de jitomate de charolas germinadoras.

		Especificación	
		Para: Mecanismo de recolección de plántulas	Pág. -
Cambios	De y Ds	Requerimientos	Responsable
1. Eector final adaptable a diferentes hortalizas			
	Ds	Dimensiones: 80 x 60 x 25 mm	
	De	Material: acero o plástico	
	De	Espacio para servomotor y pinzas	
2. Pinzas			
	Ds	Dimensiones: 50 x 30 x 5 mm	
	Ds	Material: acero o plástico	
	Ds	Sensor de fuerza: 0-24 N	
	De	Sensibilidad del sensor de fuerza: 0.5 V/N	
	De	Linealidad del sensor de fuerza: <5 %	
	Ds	Material de recubrimiento de contacto con los tallos: goma o neopreno	
3. Productividad:			
	De	Velocidad: 6 s	
	De	Múltiples efectores: >5	
4. Estructura general:			
	Ds	Material: metal o aluminio	
	Ds	Dimensiones: 1000 x 1000 x 1000 mm	
5. Electrónicos para el sistema de recolección:			
	Ds	Motores paso a paso 12 V DC	
	De	Controladores de velocidad de motores	
	Ds	Microprocesadores: Raspberry Pi	
	Ds	Baterías de litio o	
6. Señal y energía			
	De	Salida del transmisor: señal eléctrica	
	Ds	Fuente de energía: 12 V DC	
	De	Variación de voltaje: $\pm 10\%$ (NOM-003-SCFI-2014).	
	De	Sistema eléctrico del tractor o panel solar	
7. Pantalla de ajustes:			
	Ds	Pantalla externa o app	
	De	Botones para ajustes	
8. Mantenimiento de los componentes:			
	De	Facilidad de mantenimiento: acceso fácil a los componentes	
	De	Facilidad en las reparaciones: conexiones rápidas	

Generación de alternativas y selección de la mejor alternativa

El Cuadro 3 muestra las posibles soluciones para el diseño del efector final, la mejor solución es la combinación (remarcado en gris): C1-D2-A3-A4-D5. Cabe resaltar que dicha combinación es la que más se adecua para manipular las plántulas de jitomate considerando los espacios de la charola de germinación ya que cada cavidad mide 25 mm de lado. Para la extracción de la plántula, con el fin de optimizar energía y costos, se optó por un solo sistema de extracción, el de la sujeción a través de sus tallos ya que las pruebas demostraron que es viable realizarlo de esta manera.

Cuadro 3. Diagrama morfológico para el dispositivo de extracción de plántulas de jitomate.

Funciones secundarias	Soluciones				
	A	B	C	D	E
1 Detección de tallo	Inteligencia artificial	Visión artificial	Rangos de posición de la cavidad	Inteligencia artificial & rangos de posición de la cavidad	Visión artificial & rangos de posición de la cavidad
2 Control de posicionamiento de los efectores antes de la extracción de las plántulas	Visión artificial	Control PI	Control PD	Control PID	Control PID & Visión artificial
3 Abrir y cerrar pinzas	Eléctrico	Neumático	Hidráulico	Eléctrico & neumático	Eléctrico & hidráulico
4 Extracción de la plántula	Efector con pinzas	Varilla eyectora	Eyección neumática	Efector con pinzas & Varilla eyectora	Efector con pinzas & eyección neumática
5 Posicionamiento de los efectores al sistema de transporte y descarga	Visión artificial	Control PI	Control PD	Control PID	Control PID & Visión artificial

Diseño de detalle

Descripción y principio de funcionamiento del sistema

Las dimensiones generales del prototipo son 970×830×540 mm con una masa total estimado de 33 kg, sus componentes principales se describen en la Figura 9. El dispositivo extractor se desplaza a lo largo de los tres ejes (X,Y, y Z) para la extracción de las plántulas de jitomate. En eje X, los brazos que sujetan el cabezal con los efectores finales tiene una longitud de 845 mm. En el eje Y, el dispositivo se puede adaptar para la extracción de 5 o 10 plántulas simultáneas, por lo que cambia también la carrera del cabezal (se cambia el cabezal a uno de 5 efectores finales), siendo 140 y 35 mm, respectivamente. En el eje Z, la carrera del cabezal para la extracción de las plántulas es de 180 mm, y la parte superior al estar descubierto, no influye en la altura de las plántulas.

Si bien, la carrera del eje X es muy superior al de los demás ejes, esto se debe a que se está contemplando el área de descarga de las plántulas al siguiente sistema (transporte y alimentación de una trasplantadora automática) como se muestra en la Figura 10, con el recuadro de color naranja. En el dispositivo no se incluyó la alimentación automática de las charolas germinadoras (recuadro de color verde) para considerarse como el sistema 1 que pertenece a la extracción de plántulas.

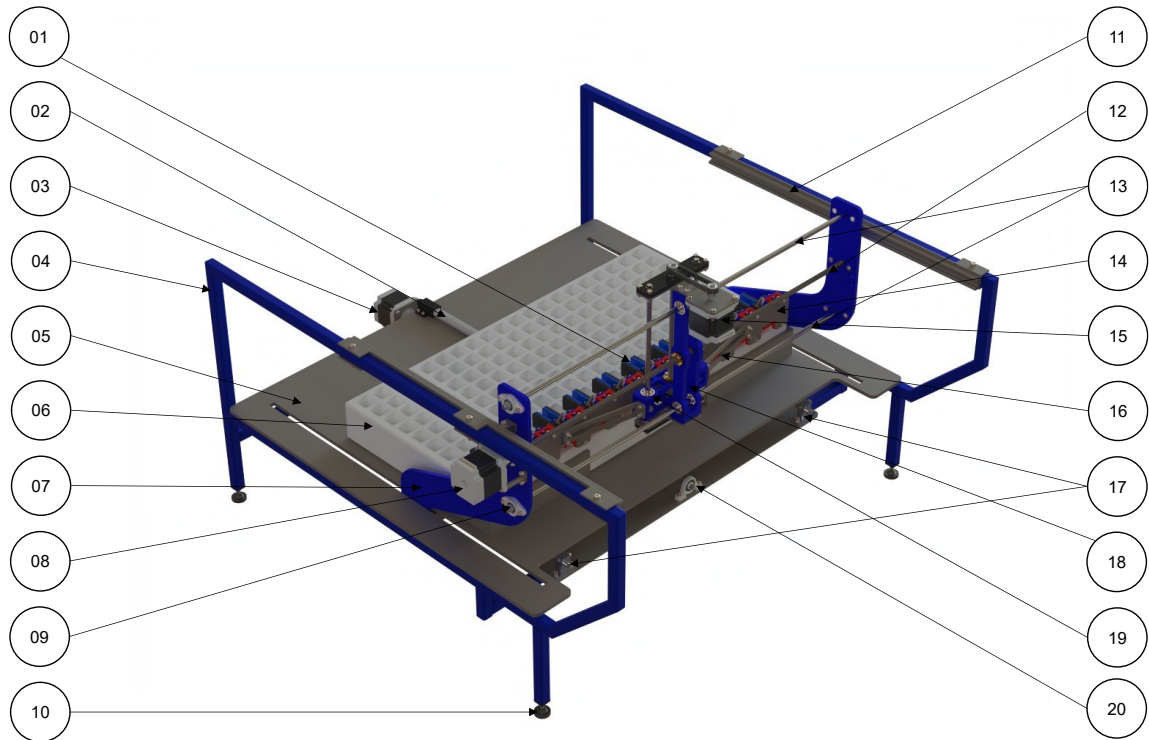
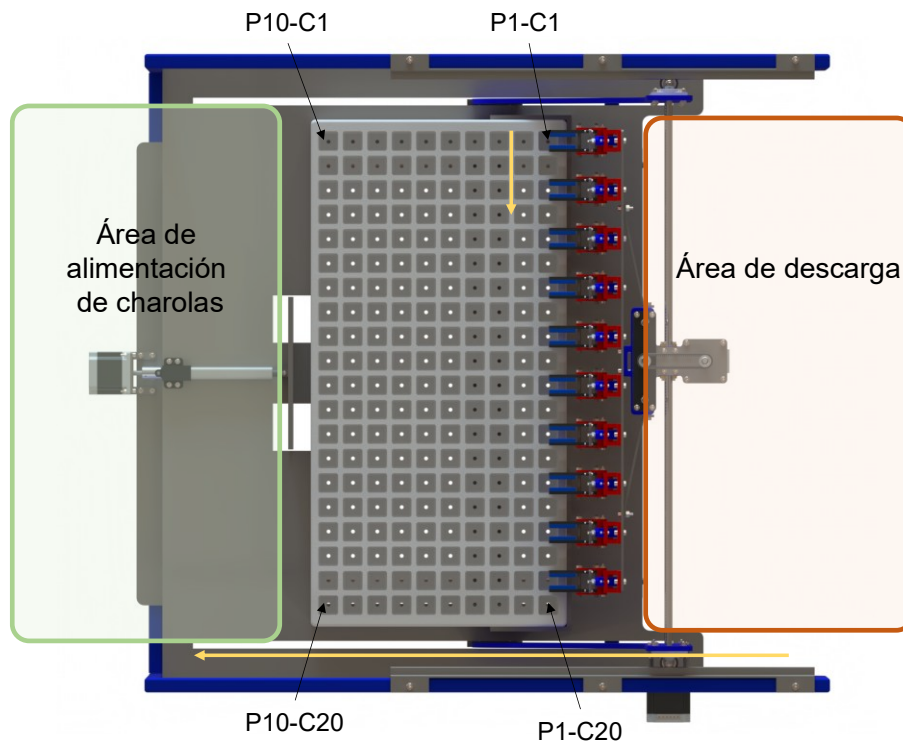
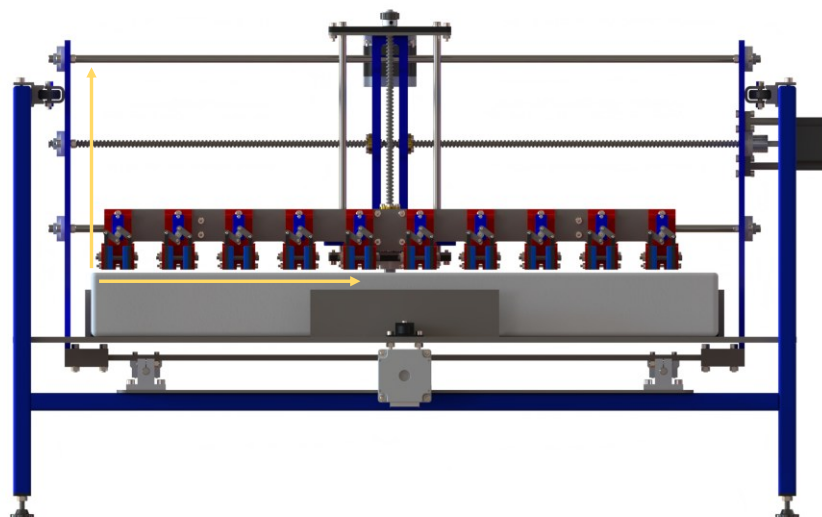


Figura 9. Vista isométrica del dispositivo extractor sin plántulas. (1) efector final, (2) actuador lineal eléctrico para la sujeción de la charola germinadora, (3) motor paso a paso Nema 24 para el desplazamiento en el eje X, (4) estructura del dispositivo, (5) Plataforma para la colocación de la charola germinadora, (6) charola germinadora, (7) brazo para el sistema de efectores finales, (8) motor paso a paso Nema 23 para el desplazamiento en el eje Y, (9) chumacera para la barra guía, (10) nivelador de dispositivo extractor, (11) guía de brazo, (12) husillo para el desplazamiento del sistema de efectores finales, (13) barras guía para el desplazamiento del sistema de efectores finales, (14) cabezal para la sujeción de los efectores finales, (15) motor paso a paso Nema 23 para el desplazamiento en el eje Z, (16) articulación de soporte del cabezal, (17) soporte para barras de guía lineal, (18) base corredera del cabezal, (19) base soporte del cabezal, y (20) chumacera para husillo para el desplazamiento del sistema en el eje X.



a)



b)

Figura 10. Dispositivo extractor: **a)** vista superior, **b)** vista lateral izquierdo. Las flechas de color amarillo indican el desplazamiento del cabezal en los tres ejes. P1-C1 indica la cavidad 1 en la posición 1, P1-C20 indica la cavidad 20 en la

posición 1, P10-C1 indica la cavidad 1 en la posición 10, P10-C20 indica la cavidad 20 en la posición 10.

Diseño del efector final

La Figura 11 muestra la frecuencia de h_{s1} y h_g con respecto a la d_s y la h_s , respectivamente, tomando como caso extremo que la plántula emerge junto a la pared de la cavidad. La mínima y media del h_{s1} fue de 8.5 mm y 14.6 mm, respectivamente (Figura 11a). La media obtenida en este estudio es similar a la establecieron Peng et al. (2025) y Ren et al. (2025) en plántulas de pimienta con un valor de 15 mm. Sin embargo, si se analiza el h_g (altura de los gripper) (Figura 11b), se puede observar que debido a las dimensiones que presentaron algunas muestras, al menos el 5% (P5), solo queda disponible ≤ 7.39 mm de la h_s para la h_g del gripper, mientras que la media de h_g fue de 17.7 mm, pero varias muestras no tendrían h_s suficiente y abarcaría más allá de las hojas cotiledóneas. Por lo que se estableció un valor de 10 mm a partir de la h_{s1} mínima, que coincide con d_{se} , punto en el que se midió el d_s y de esta manera, con este valor queda más espacio para el agarre del tallo con el gripper.

El efector final para la extracción de una plántula de jitomate se muestra en la Figura 12. El efector consta de 10 componentes principales, entre los que destacan: el sensor de fuerza FSR400 que determina la presión con la que se sujeta el tallo de la plántula; el servomotor SG90 (con engranajes metálicos) abre y cierra la pinza según la dimensión del tallo, deteniéndose así cuando el sensor de fuerza manda una señal; la pinza está conformada por dos dedos (izquierdo y derecho); los ejes guía por donde se deslizan los dedos de la pinza al cerrar y abrir; y la estructura principal del efector. El efector final diseñado tiene un rango la abertura de 0-11 mm. Se diseñó de esta manera porque el rango del diámetro de los tallos de las plántulas de jitomate puede estar desde 2 hasta 4.5 mm de diámetro dependiendo de la variedad, la edad de trasplante y las condiciones óptimas de siembra de las semillas desde donde emergen. Así mismo, la propuesta del diagrama de flujo para el funcionamiento del dispositivo extractor se muestra en la Figura 13.

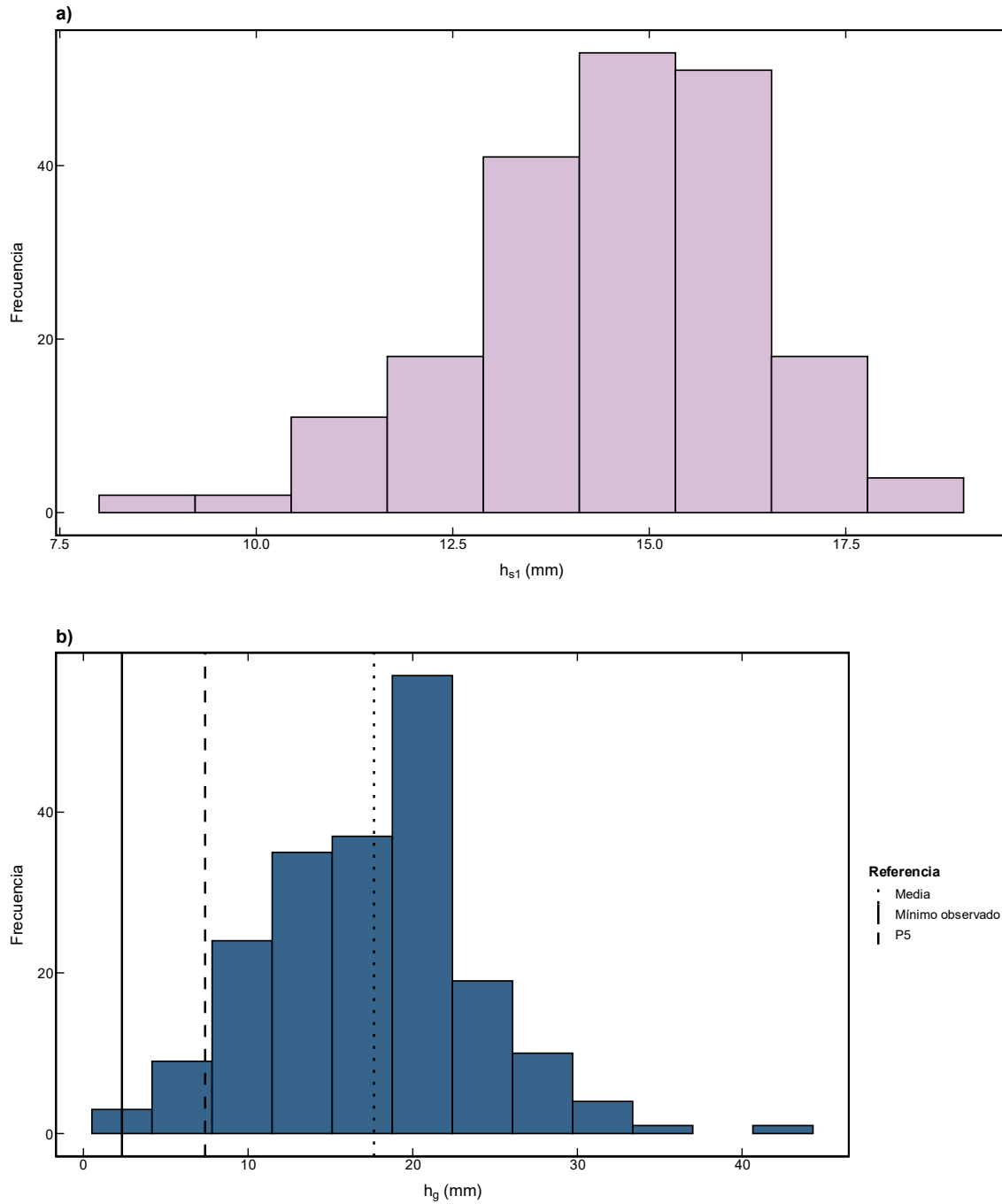


Figura 11. Histogramas para los parámetros de diseño de los gripper del efector final: a) medidas de h_{s1} según el d_s de cada tallo, b) medidas de h_g según el h_s de cada tallo.

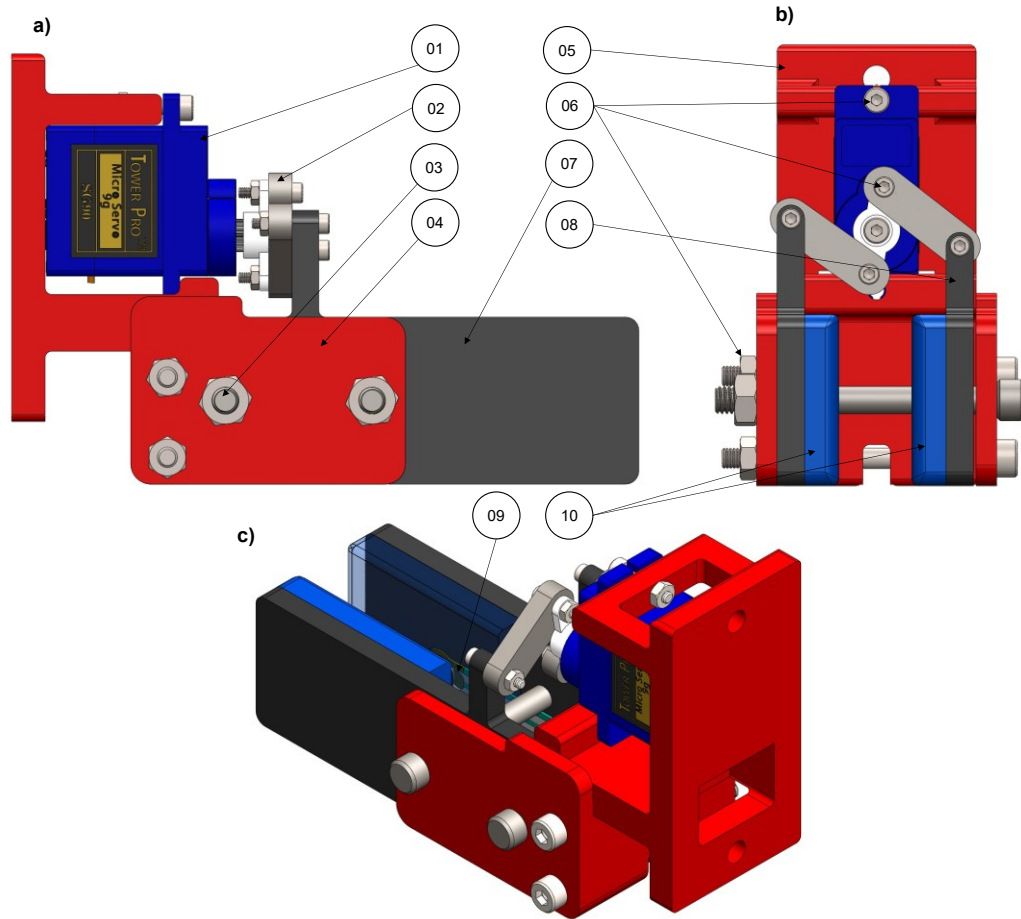


Figura 12. Efecto final para la sujeción de las plántulas: a) vista lateral, b) vista frontal, c) vista isométrica. (01) micro servomotor, (02) eslabón, (03) eje guía, (04) estructura para sujeción de ejes guía, (05) estructura principal del efector final, (06) tornillería, (07) gripper 1, (08) gripper 2, (09) sensor de fuerza y (10) recubrimiento de silicona RTV.

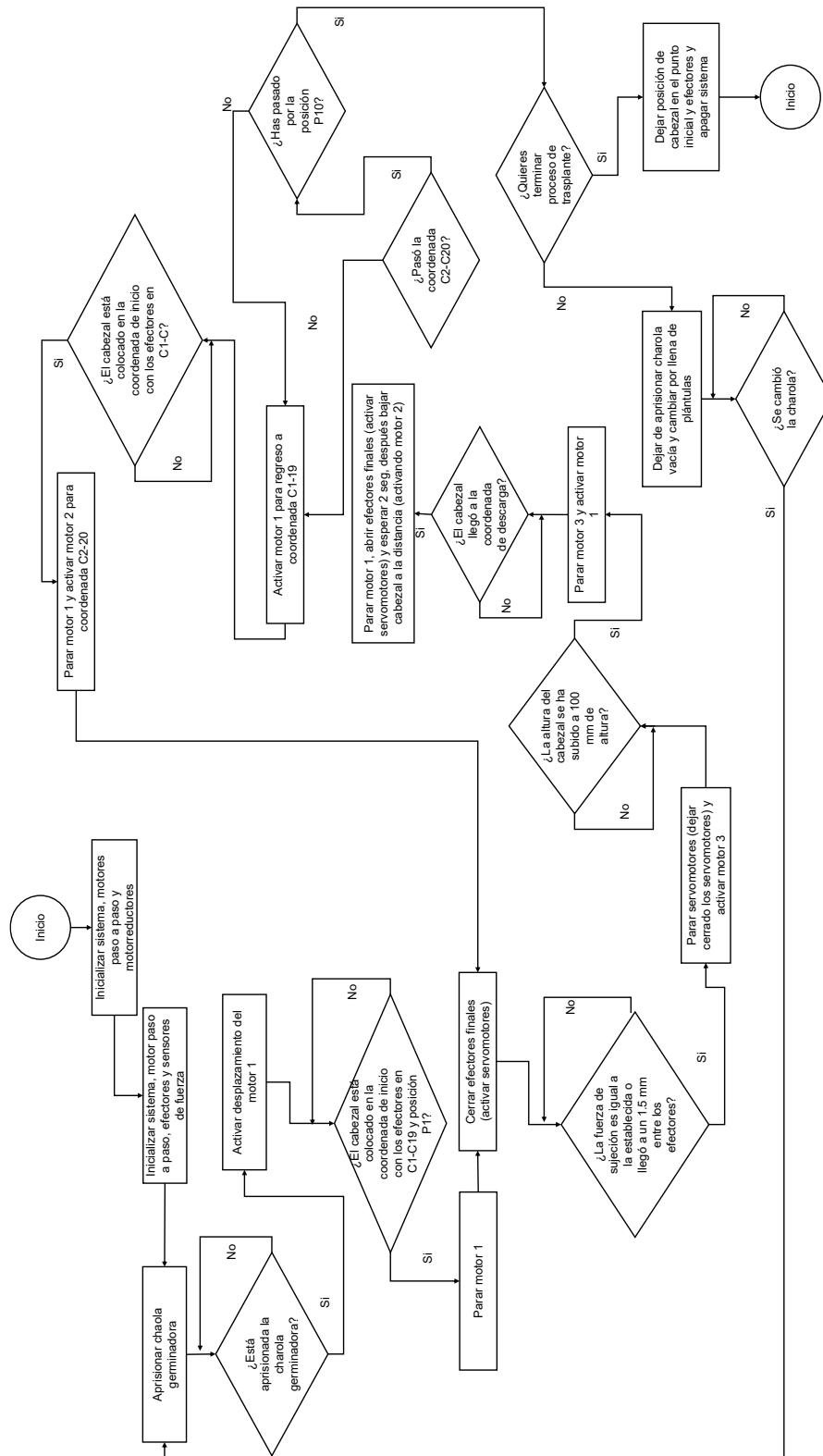


Figura 13. Propuesta del diagrama de flujo para el funcionamiento del dispositivo extractor de plántulas de jitomate.

Conclusiones

Se diseñó un dispositivo con 10 efectores finales para la extracción de las plántulas de jitomate en el software CAD SolidWorks®, se tomaron en cuenta los diámetros de las plántulas obtenidos de manera experimental, además, se consideró que las plántulas emergen alrededor del centro de la cavidad y el efector posiciona los tallos de las plántulas en el centro al cerrar las pinzas y posteriormente, realizar su extracción. El efector consta de dos pinzas (o gripper) que sujetan el tallo de la plántula, cabe resaltar que dicho diseño se puede aplicar a otras especies agrícolas como el pimiento y el pepino, por lo que este diseño permite la extracción de plántulas que tengan un tallo definido como las mencionadas. El dispositivo puede ser configurado para extraer 5 o 10 plántulas de manera simultánea, así mismo, se debe realizar una modificación en la carrera del cabezal en el eje Y. Finalmente, este dispositivo puede adaptarse a la parte superior de una trasplantadora mecánica y tomar como fuente de alimentación, el sistema eléctrico del tractor de 12 V, apoyado de una batería de plomo para disminuir costos y al mismo tiempo, crear una transición tecnológica con el fin de llegar al desarrollo de una máquina que realice el trasplante automatizado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada con el apoyo número 838532. Así mismo, al Posgrado en Ingeniería y Uso Integral del Agua (IAUIA) y a la Universidad Autónoma Chapingo, por las facilidades en la realización de esta investigación.

Referencias

- Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P. (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation — a review. *Frontiers in Plant Science*, 15(April), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1357153>
- Bajon, A., Kido, M., & Kobus-Cisowska, J. (2026). Tomato (*Solanum lycopersicum* L .) as a Source of Bioactive Compounds: Functional Properties and Technological Aspects — A Review. *Nutrients*, 18(13), 1–26. <https://doi.org/10.3390/nu18132084>
- Bloch, V., Shapiguzov, A., Kotilainen, T., & Pastell, M. (2025). A method for phenotyping lettuce volume and structure from 3D images. *Plant Methods*, 21(27). <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01347-y>
- Cheng, B., Wu, H., Zhu, H., Liang, J., Miao, Y., Cui, Y., & Song, W. (2024). Current Status and Analysis of Key Technologies in Automatic Transplanters for Vegetables in China. *Agriculture (Switzerland)*, 14(12), 2168. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>
- Collins, E. J., Bowyer, C., Tsouza, A., & Chopra, M. (2022). Tomatoes: An Extensive Review of the Associated Health Their Cultivation. *Biology*, 11(2), 239. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Cross, N. (2021). *Engineering design methods-Strategies for product design* (Fifth, Vol. 11, Issue 1). John Wiley & Sons Ltd.
- Dasgupta, A., & Haslach, H. W. (1993). Mechanical Design Failure Models for Buckling. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(1). <https://doi.org/10.1109/24.210265>
- DGSIAP. (2025). PANORAMA AGROALIMENTARIO 2025-Fortaleciendo la estadística agroalimentaria desde la raíz.

<https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

- Du, X., Yun, Z., Jin, X., Li, P., & Gao, K. (2023). Design and Experiment of Automatic Adjustable Transplanting End-Effector Based on Double-Cam. *Agriculture* (Switzerland), 13(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture13050987>
- FAO. (2011). Producción de hortalizas. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a130f016-fc61-4287-868a-59499acb47c4/content>
- Gao, Y., Shao, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Xiang, J., & Chen, H. (2024). Effects of the seedling tray overlapping for seed emergence mode on emergence characteristics and growth of rice seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 15(March), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341318>
- Gibon, Y., Beckles, D. M., Osorio, S., & Ezura, H. (2025). Tomato. *Journal of Experimental Botany*, 76(21), 6201–6203. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf395>
- Han, C., Hu, X., Zhang, J., You, J., & Li, H. (2021). Design and testing of the mechanical picking function of a high-speed seedling auto-transplanter. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 64–71.
- Han, L., Kumi, F., Mao, H., Hu, J., & Nether-, T. (2019). Design and tests of multi-pin flexible seedling pick-up gripper for automatic transplanting. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(6), 949–957. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/aea.13426> 949
- Han, L., Ma, H., Mo, M., Kumi, F. K., Hu, J., & Mao, H. (2024). Design and test of an efficient seedling pick-up device with a combination of air jet ejection and mechanical action. *Journal of Agricultural Engineering*, 55. <https://doi.org/10.4081/jae.2024.1575>

- Han, X., Wang, C. W., & Yi, S. (2025). Seedling Picking Devices for Automatic Transplanters: A Systematic Review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 18(1), 127–136. <https://doi.org/10.25103/jestr.181.14>
- Ji, J., Sun, J., Jin, X., Li, M., & Du, X. (2019). Development of a PVDF sensor for potted seedling clamping force of vegetable transplanting. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(5), 111–118. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.5094>
- Khadatkar, A., Magar, A. P., Sawant, C. P., & Modi, R. U. (2024). Development and testing of automatic seedling extractor in robotic transplanter using mechatronics for nursery seedlings. *Discover Applied Sciences*, 6(2), 51. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05670-2>
- Khadatkar, A., Sawant, A. P., Magar, C. P., & Kumar, V. (2025). Agricultural robots and automated machinery for handling of nursery seedlings with special reference to the transplanting devices. *Discover Applied Sciences*, 7(916). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06736-5>
- Kumar, A., Kumar, V., Gull, A., & Nayik, G. A. (2020). Tomato (*Solanum Lycopersicon*). In G. A. Nayik & A. Gull (Eds.), *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-7470-2_10
- Laužiké, K., & Jankauskiené, J. (2026). Solid Grain Waste Digestate as a Peat Substrate Amendment for Tomato Seedlings : Effects of Direct Sowing and Transplanting on Growth and Photosynthesis. *Agronomy*, 16(13), 1256–1272. <https://doi.org/10.3390/agronomy16131256>
- Leskovar, D. I., & Othman, Y. A. (2021). Direct Seeding and Transplanting Influence Root Dynamics, Morpho-Physiology, Yield, and Head Quality of Globe Artichoke. *Plants*, 10(50), 899. <https://doi.org/10.3390/plants10050899>

- Li, M., Xiao, L., Ma, X., Yang, F., Jin, X., & Ji, J. (2022). Vision-Based a Seedling Selective Planting Control System for Vegetable Transplanter. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12), 2064. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122064>
- Li, P., Yun, Z., Gao, K., Si, L., & Du, X. (2022). Design and Test of a Force Feedback Seedling Pick-Up Gripper for an Automatic Transplanter. *Agriculture*, 12, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12111889>
- Liu, Z., Shi, L., Liu, Z., Xing, J., Hu, C., Wang, X., & Wang, L. (2024). Design and Testing of a Seedling Pick-Up Device for a Facility Tomato Automatic Transplanting Machine. *Sensors*, 24(20), 6700. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24206700>
- Ma, G., Chen, X., Liu, Y., Han, L., Mao, H., & Hu, J. (2023). Airflow ejection-wrapped clamping type seedling picking method and parameter optimization. *Frontiers in Plant Science*, 13(January), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1084563>
- Ma, G., Mao, H., Han, L., Liu, Y., & Gao, F. (2020). Reciprocating mechanism for whole row automatic seedling picking and dropping on a transplanter. *Applied Engineering in Agriculture*, 36(5), 751–766. <https://doi.org/10.13031/AEA.13622>
- Mejía-Betancourt, F. de los Á., Sánchez, F., Moreno-pérez, E. del, Carmen, & González-Molina, L. (2023). Esquejes enraizados , una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 389–399. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>
- Nage, S. M., Mathur, S. M., & Meena, S. S. (2023). Vegetable Transplanters for India: A Review. *Agricultural Science Digest*, 43(2), 129–134. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5548.Submitted>
- NOM-003-SCFI-2014. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-003-SCFI-2014, Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad. 1–23.

- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). Engineering Design- A systematic approach (Third). Springer-Verlag London Limited.
- Peng, Z., Yang, F., Li, Y., Li, X., Li, B., & Xu, G. (2025). Design and Testing of a Whole-Row Top-Loosening Stem-Clamping Seedling Extraction Device for Hole Tray Seedlings. *Agriculture (Switzerland)*, 15(2), 165. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020165>
- Ren, Z., Hu, M., Ji, Y., Yan, W., Li, K., Zhou, X., & Zhang, W. (2025). Dynamic analysis and experiment of the seedling pick-up mechanism for pepper hole tray seedlings. *Int J Agric & Biol Eng*, 18(1), 134–142. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251801.9141>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature , humidity , and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato : a review. *International Agrophysics*, 32, 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sivakumar, S., & Durairaj, C. D. (2014). Development of A Seedling Ejection Mechanism for Pro - tray Seedling. *Trends in Biosciences*, 7(4), 621–624.
- Tapia, A., Romero, O., Vázquez, C., González, E., & Celaya, E. (2015). Manual técnico para la producción de hortalizas,huevo de gallina y carne de conejo en unidades de producción familiar. In INIFAP. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?/=10269USAT_STRATEGI_MELESTARI
- Xia, H., Zhu, S., Yang, T., Huang, R., Jianhua, O., Dong, L., Tao, D., & Zhen, W. (2025). A Plug Seedling Growth-Point Detection Method Based on Differential Evolution Extra-Green Algorithm. *Agronomy*, 15(2), 375. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020375>
- Yue, R., Hu, J., Liu, Y., Yao, M., Zhang, T., & Shi, J. (2022). Design and Working Parameter Optimization of Pneumatic Reciprocating Seedling-Picking

Device of Automatic Transplanter. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12), 1989.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12121989>

Zhang, G., Li, Z., Cheng, J., Cai, X., Yang, Y., & Yan, Z. (2022). Morphological and Physiological Traits of Greenhouse-Grown Tomato Seedlings as Influenced by Supplemental White Plus Red versus Red Plus Blue LEDs. *Agronomy*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102450>

Zhang, Q., Gu, S., Li, H., Mu, Y., & Chu, Q. (2026). Study of mechanical damage to tomato seedling stems to ensure the quality of grafting. *Engenharia Agrícola*, 46(e20250045), 10–14. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v46e20250045/2026> Scientific

Zhou, B., Miao, H., Guan, C., Ji, X., & Wang, X. (2024). Design and Test of Seedling-Picking Mechanism of Fully Automatic Transplanting Machine. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(20), 9235. <https://doi.org/10.3390/app14209235>

7. AUTOMATIZACIÓN DEL TRASPLANTE DE HORTALIZAS EN MÉXICO: INNOVACIÓN SOSTENIBLE O RIESGO DE DESPLAZAMIENTO LABORAL RURAL

Este capítulo presenta un ensayo científico en el que se analizan los posibles efectos de la incorporación de equipos automatizados para el trasplante de hortalizas en el sector agrícola mexicano. El análisis se centra particularmente en sus implicaciones para el empleo rural, considerando tanto el posible desplazamiento de mano de obra como las oportunidades de reconversión laboral asociadas con la adopción de nuevas tecnologías. Asimismo, se examina el potencial de estos equipos para apoyar a los productores de hortalizas durante los periodos críticos de establecimiento del cultivo, cuando la disponibilidad oportuna de mano de obra constituye un factor determinante para el desarrollo de las actividades agrícolas. De manera complementaria, se analiza la percepción de los productores respecto a la incorporación de tecnologías de automatización en sus prácticas agrícolas cotidianas, considerando su disposición para adoptarlas y las posibles implicaciones productivas, laborales y sociales de su implementación. Para sustentar el análisis, se realizó un estudio de campo de alcance descriptivo y diseño transversal con productores hortícolas de pequeña escala de la comunidad nahua de Atzacaloya, Guerrero, México.

Estado: enviado a la revista *CIENCIA ergo-sum*.

**AUTOMATIZACIÓN DEL TRASPLANTE DE HORTALIZAS EN MÉXICO:
INNOVACIÓN SOSTENIBLE O RIESGO DE DESPLAZAMIENTO LABORAL RURAL**

**AUTOMATION OF VEGETABLE TRANSPLANTING IN MEXICO: SUSTAINABLE
INNOVATION OR RISK OF RURAL JOB DISPLACEMENT**

Gaudencio Grande-Martínez, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, México

Correo electrónico: gaussgam@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2954-3055>

Martín Hidalgo-Reyes, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, México¹

Correo electrónico: mhidalgor@chapingo.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6836-6848>

Raúl Vidal García-Hernández, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México

Correo electrónico: vidal.raulgh@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3859-584X>

Recepción:

Aprobación:

RESUMEN

El trasplante de hortalizas es una actividad intensiva en mano de obra en la producción agrícola. Su carácter repetitivo y físicamente demandante ha impulsado el desarrollo tecnológico en países como China, India y Estados Unidos. Sin embargo, en la región central de México, su adopción y desarrollo son limitados, y el equipo disponible suele ser importado y costoso, y restringe el acceso a pequeños productores. Esto genera un debate sobre si la automatización es una innovación sostenible o un riesgo de desplazamiento laboral. Este ensayo analiza la situación en México y sus impactos ambientales, sociales y laborales. Se concluye que es una herramienta estratégica para enfrentar la escasez de trabajadores, optimizar el proceso y promover un desarrollo agrícola más sostenible e inclusivo.

PALABRAS CLAVE: campo mexicano, hortalizas, trabajo rural, transición tecnológica, trasplante automatizado.

ABSTRACT

Vegetable transplanting is a labor-intensive activity in agricultural production. Its repetitive and physically demanding nature has driven technological development in countries such as China, India, and the United States. However, in central Mexico, its adoption and development are limited, and the

available equipment is often imported and expensive, restricting access for small-scale farmers. This generates a debate about whether automation is a sustainable innovation or a risk for job displacement. This essay analyzes the situation in Mexico and its environmental, social, and labor impacts. It concludes that automation is a strategic tool for addressing labor shortages, optimizing processes, and promoting more sustainable and inclusive agricultural development.

KEYWORDS: Mexican countryside, vegetables, rural work, technological transition, automated transplanting.

INTRODUCCIÓN

La agricultura se ha desempeñado, desde el periodo neolítico, como uno de los pilares en el desarrollo de las civilizaciones humanas (Sajuria, 2014). Su capacidad para proveer alimentos, materias primas y estabilidad económica la convierte en un componente esencial de cualquier civilización (Sarandón, 2020). A nivel global, aproximadamente el 42% de la población mundial depende directamente de actividades agrícolas, pesqueras o forestales para su subsistencia, lo que demuestra la importancia estratégica de este sector, particularmente en países en desarrollo (FAO, 2005).

El aumento exponencial de la población mundial ha generado una creciente preocupación por la seguridad alimentaria. Este desafío ha puesto en evidencia la capacidad de los métodos agrícolas tradicionales para satisfacer la demanda futura de alimentos (Abiri *et al.*, 2023; Talaviya *et al.*, 2020). En este contexto, la innovación tecnológica en la agricultura ha emergido como un instrumento clave para incrementar la productividad y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios. La automatización agrícola, que abarca desde el uso de maquinaria inteligente hasta implementación de sistemas con inteligencia artificial, representa la etapa más reciente en la evolución de la mecanización (FAO, 2022). De esta manera, la agricultura está experimentando cambios exponenciales en los últimos años y la incorporación de nuevas tecnologías está liderada por los países desarrollados con el objetivo de optimizar la eficiencia económica, social y ambiental de los sistemas agroalimentarios (Addorisio *et al.*, 2025; Bahn *et al.*, 2021).

Entre las innovaciones tecnológicas aplicadas a la agricultura, el trasplante automático de hortalizas se ha convertido en un ejemplo paradigmático de cómo la automatización puede transformar las prácticas tradicionales. Este proceso permite garantizar una densidad y

crecimiento uniforme de plántulas en áreas específicas, reducir cantidad y costos de mano de obra y de producción, optimizar el uso de semillas y facilitar la planificación productiva, contribuyendo directamente a mejorar la eficiencia y los aspectos críticos para la sustentabilidad agrícola (Vázquez-Casarrubias *et al.*, 2011). Sin embargo, en México, la adopción de tecnologías innovadoras para el sector agroalimentario es muy limitada, concentrándose principalmente en algunas regiones que están vinculadas con la producción para exportación (Vargas-Canales, 2023). Esta brecha tecnológica plantea la necesidad de analizar una interrogante de fondo: ¿cómo impactaría la incorporación de sistemas automatizados, específicamente en el trasplante de hortalizas, a los pequeños y medianos productores?

La respuesta no es simple, por un lado, la automatización representa una oportunidad de aumentar la productividad, reducir pérdidas y fortalecer la competitividad del sector agrícola mexicano, pero, por otro lado, puede acentuar las desigualdades existentes al desplazar la mano de obra rural y modificar la estructura socioeconómica de las comunidades agrícolas.

Bajo este contexto, el presente ensayo tiene como objetivo analizar el impacto potencial de la automatización del trasplante de hortalizas en México, considerando tanto los beneficios asociados con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, como los posibles efectos sobre el empleo rural y la cohesión social. La pregunta central que guía este trabajo es: ¿De qué manera la automatización del trasplante de hortalizas en México puede equilibrar la innovación tecnológica y la sostenibilidad con la preservación del empleo rural y la equidad social?

La respuesta a este interrogante define el rumbo de la agricultura mexicana en los próximos años, y da pauta para que las comunidades rurales adopten la transición hacia una agricultura más inteligente, sostenible e inclusiva.

1. PANORAMA ACTUAL DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA EN MÉXICO

De acuerdo con Vargas-Canales, (2023), en México el acceso a las nuevas tecnologías dentro del sector agroalimentario presenta una marcada heterogeneidad regional. Las entidades federativas pueden clasificarse en tres grupos: el primero, con una alta adopción tecnológica, conformado por cuatro estados del norte del país, destacan por tener las mayores capacidades

tecnológicas; un segundo grupo, con un nivel intermedio, integrado por diez estados del norte y centro del país; y un tercer grupo, compuesto por 18 entidades, conformado por los estados del centro y sur del país con los niveles más bajos de adopción tecnológica. Esta disparidad evidencia la necesidad de estrategias diferenciadas para promover la modernización agrícola en regiones con menor desarrollo tecnológico, mediante políticas públicas focalizadas, inversión en infraestructura y fortalecimiento de capacidades humanas.

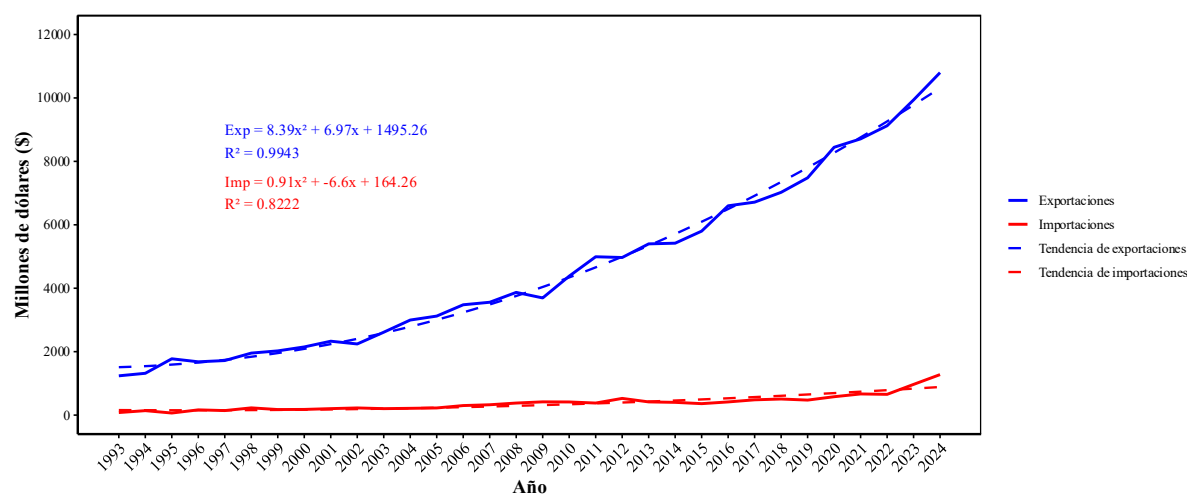
Aunque los estudios sobre la automatización en el campo mexicano son escasos, se han desarrollado investigaciones significativas en algunas áreas específicas. Por ejemplo, López-Gómez *et al.* (2024) desarrollaron dos prototipos de sembradoras (una mecánica y otra electrónica) acopladas a un robot agrícola. Los autores reportaron una capacidad de trabajo de 0.135 ha h^{-1} y una velocidad promedio de 2 km h^{-1} , lo que indica que estos equipos podrían reducir significativamente la carga laboral durante la siembra de maíz.

En el ámbito de la detección y monitoreo de cultivos, Mota-Delfin *et al.* (2022) utilizaron drones para capturar imágenes de plantas de maíz entre malezas, las cuales fueron analizadas mediante redes neuronales convolucionales. Los autores identificaron como principal desafío la obtención de imágenes de alta resolución, proponiendo como alternativa de solución, el uso de arquitecturas de superresolución acopladas a detectores entrenados de extremo a extremo, lo que mejora la precisión en la identificación de plantas.

Además, algunas tesis de posgrado han abordado problemas agrícolas específicos. Gaytán *et al.* (2023) desarrollaron un prototipo para el control mecánico de maleza en cultivos a hilera, particularmente en maíz, mientras que García-Hernández *et al.* (2020) desarrollaron un sistema de siembra para un robot autónomo con semillas de maíz. Estas investigaciones reflejan el interés académico y tecnológico en la mecanización de cultivos básicos.

Cabe destacar que la producción de maíz ocupa un lugar central en la agricultura mexicana, representando el 87.8% en la producción de granos a nivel nacional y situándose en el 6° lugar en la producción a nivel mundial durante el año 2023 (SIAP, 2024). No obstante, en la producción de hortalizas, la información disponible sobre automatización, especialmente en trasplante automático, es escasa (Grande *et al.*, 2024). Una excepción relevante es el estudio de Gutiérrez *et al.* (2009), centrado en el trasplante automatizado de estolones de fresas, el

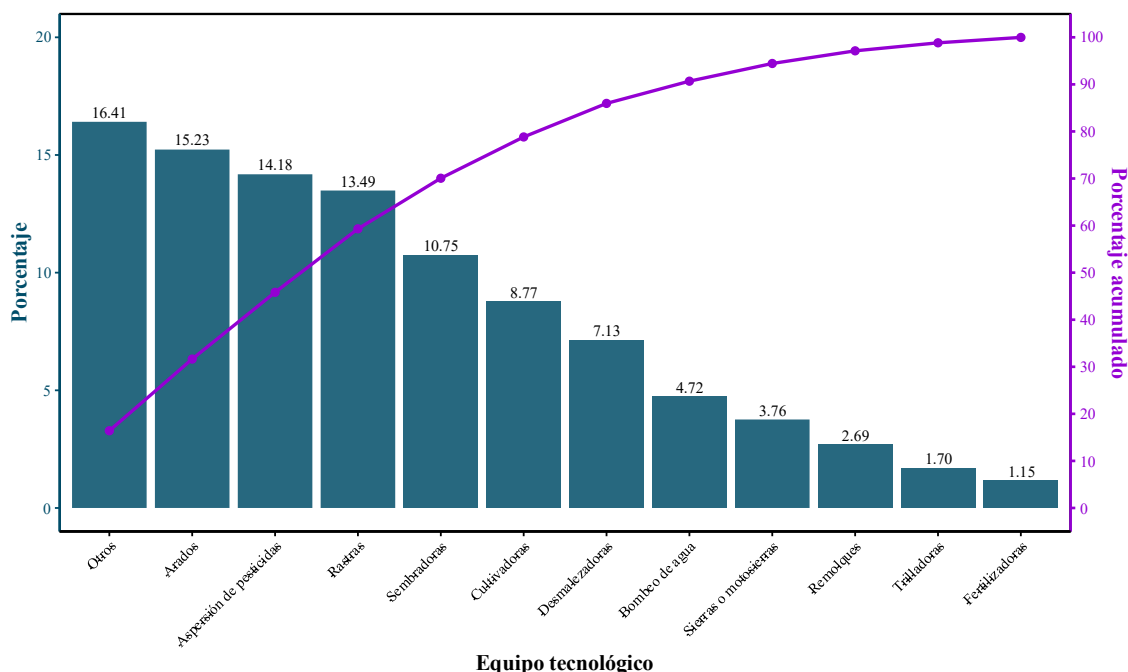
cual comparte principios técnicos con el trasplante de hortalizas (Lira y Ruiz, 2023). Esta limitación evidencia la necesidad de impulsar el desarrollo científico y tecnológico en investigaciones específicas sobre horticultura automatizada en México, considerando su gran potencial para mejorar eficiencia, productividad y sostenibilidad del sector agroalimentario (gráfica 1).



Gráfica 1.
Valor en millones de exportaciones e importaciones de hortalizas, plantas, raíces y tubérculos.

Fuente: adaptada de la Secretaría de Economía (2025).

El panorama actual de la horticultura en México evidencia que, si bien existen experiencias exitosas de automatización, estas son aisladas y escasamente documentadas. En consecuencia, la mayor parte de los productores continúan operando bajo condiciones de baja tecnificación, lo que limita significativamente la incorporación de procesos avanzados, como el trasplante automático. La gráfica 2 muestra los equipos más utilizados por productores a nivel nacional, sin embargo, no se especifica equipos de trasplante que son utilizados para la producción de hortalizas. La consolidación de este tipo de innovaciones se percibe como una meta lejana, en gran medida debido a la ausencia de una estrategia nacional integral que articule mecanismos de financiamiento, programas de capacitación y acceso a tecnologías apropiadas para el sector.



Gráfica 2.
Porcentaje de existencia de la maquinaria, equipo e implementos utilizados en las unidades de producción agropecuaria a nivel nacional.

Fuente: adaptada de INEGI (2022).

2. EL TRASPLANTE AUTOMATIZADO DE HORTALIZAS: INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EMERGENTE

El trasplante automático de hortalizas representa una convergencia entre prácticas agrícolas tradicionales, que requieren habilidades específicas para manipular las plántulas sin dañarlas, y las tecnológicas avanzadas basadas en sensores de visión, efectores finales y algoritmos de control inteligente (Ahmed *et al.*, 2024; C. Cheng *et al.*, 2023). Su finalidad es optimizar los procesos del ciclo hortícola, garantizando uniformidad, precisión y estabilidad en las operaciones.

Por tanto, la automatización del trasplante constituye una innovación tecnológica, especialmente relevante para países en vías de desarrollo, como es el caso de México, donde la automatización puede contribuir a reducir la dependencia de mano de obra intensiva y elevar la competitividad del sector.

Entre los beneficios de estas innovaciones se destacan la reducción de costos de producción, la disminución de la mano de obra y la minimización de la pérdida del número de plántulas

asociada a largas jornadas de trabajo manual (B. Cheng *et al.*, 2024; Santos y Kienzle, 2021).

No obstante, para su implementación efectiva es necesario adaptar el desarrollo tecnológico a las condiciones propias de un lugar, región o país, promoviendo una transición gradual desde métodos tradicionales hacia los sistemas automatizados, en consonancia con los principios de la agricultura 4.0 y 5.0 que buscan integrar tecnología, sostenibilidad y bienestar humano. La figura 1 presenta la situación actual del trasplante automático y la perspectiva del proceso para competir en productividad a nivel mundial, con base en los planteamientos de Bissadu *et al.* (2024) y Taha *et al.* (2025), quienes analizan la evolución de la agricultura desde un enfoque general. Y de esta manera, alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible propuestas por las Naciones Unidas (fin de la pobreza, hambre cero, trabajo decente y crecimiento económico, reducción de la migración del medio rural al urbano) (Santos y Kienzle, 2021).

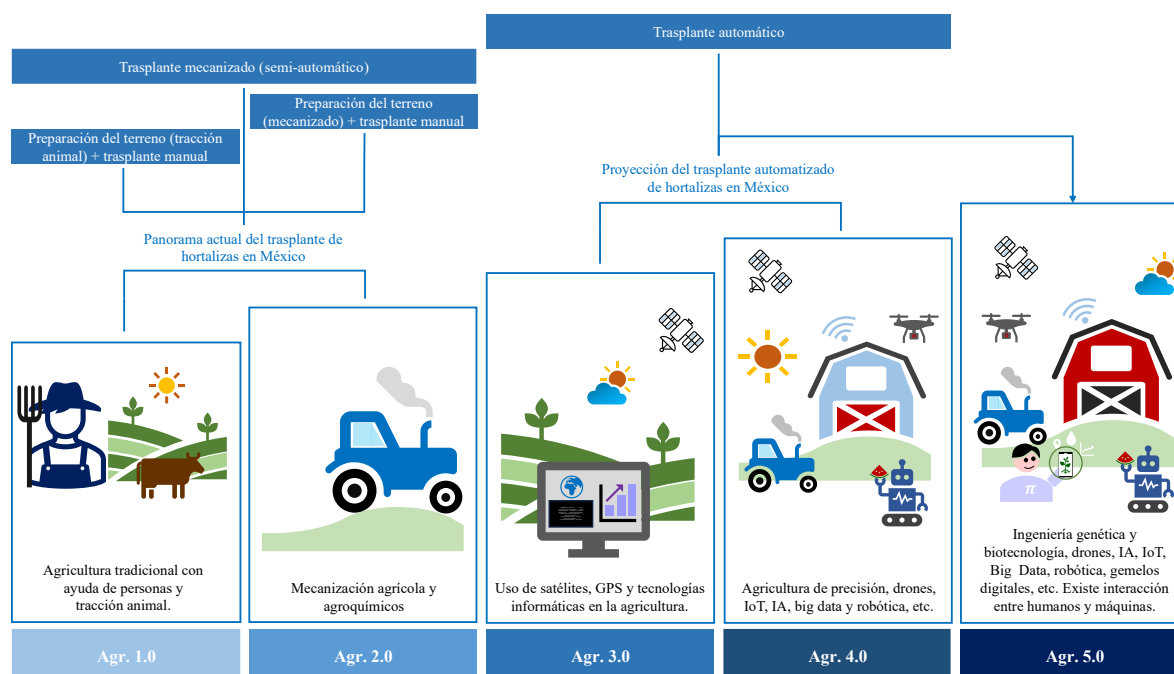


Figura 1
Situación actual del trasplante de hortalizas en el contexto de la evolución de la agricultura a nivel mundial.

Fuente: elaboración propia.

3. IMPACTO AMBIENTAL Y CONTRIBUCIÓN A LA SUSTENTABILIDAD

La automatización agrícola se ha consolidado como una herramienta estratégica para incrementar la productividad y rentabilidad de la tierra, al mismo tiempo que puede reducir el impacto ambiental (FAO, 2022). En el caso del trasplante automático de hortalizas, se ha observado una disminución en el desperdicio de plántulas (Han *et al.*, 2023), lo que favorece un uso eficiente de semillas y una reducción en la demanda de recurso hídricos desde la germinación hasta el trasplante (Khozaei *et al.*, 2020; Vázquez-Casarrubias *et al.*, 2011). Además, la automatización permite una programación más precisa de la fertilización y del riego, esta última de gran relevancia hoy en día debido a la poca disponibilidad de agua para la agricultura (Schattman *et al.*, 2023).

La utilización de este tipo de tecnología puede reducir el uso de maquinaria pesada (tractores con trasplantadoras semiautomáticas de gran tamaño) evitando la compactación del suelo y reduciendo el consumo energético (B. Cheng *et al.*, 2024; McPhee *et al.*, 2020). Algunos sistemas incorporan soluciones híbridas o paneles solares para su suministro de energía, optimizando el aprovechamiento de recursos renovables y disminuyendo la huella de carbono y la degradación ambiental (Gajbhiye, 2024; Gorjian y Campana, 2022; Majeed *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2021). Sin embargo, el impacto ambiental positivo depende de una implementación integral, que considere prácticas agrícolas sostenibles, gestión eficiente de recursos y un enfoque orientado a mitigar el cambio climático. De esta manera, se podrían reducir tres (cambio del sistema territorial “uso de suelo”, cambio climático y uso de agua dulce) de los nueve límites planetarios establecidos por Steffen *et al.* (2009) y Steffen *et al.* (2015), mismos que mantienen la estabilidad del planeta y se deben mantener en la zona segura, sin pasar a la zona crítica ya que esto pondría en riesgo la vida de los seres vivos, principalmente, la de los seres humanos.

La automatización, en este sentido, debe ser entendida no como un fin en sí mismo, sino como un proceso para transitar hacia sistemas agroalimentarios resilientes y sostenibles. En este sentido, la automatización del trasplante de hortalizas tiene el potencial de aportar significativamente a la sustentabilidad ambiental del sector agrícola mexicano, de manera integral que incluya tecnología, conocimiento técnico y gestión de recursos naturales.

4. IMPLICACIONES SOCIALES Y LABORALES: ¿DESPLAZAMIENTO O TRANSFORMACIÓN DEL TRABAJO RURAL?

La automatización del trasplante de hortalizas genera preocupaciones respecto al posible desplazamiento de la mano de obra rural. Sin embargo, esta percepción debe analizarse en un contexto demográfico y productivo más amplio.

Las proyecciones de la FAO (2017) indican que la población mundial alcanzará 9,700 millones de habitantes para 2050, con dos terceras partes residiendo en áreas urbanas. Este fenómeno implicará una mayor demanda de alimentos hasta de un 102%, mientras que la disponibilidad de mano de obra en la agricultura disminuirá (Bissadu *et al.*, 2024; Fukase y Martin, 2020; Tripathi *et al.*, 2019). Ante este escenario, la automatización no solo es una respuesta técnica, sino una necesidad estructural para mantener la seguridad alimentaria global. De manera particular, las hortalizas representan un componente fundamental dentro del grupo I (verduras y frutas) del Plato del Buen Comer, conformando aproximadamente el 50% del mismo (Moya, 2023; NOM-043-SSA2-2012, 2013). De acuerdo con las recomendaciones de la FAO (2021), el consumo mínimo de verduras y frutas debe ser de 400 g per cápita al día, sin embargo, el requerimiento óptimo puede variar según la edad, sexo y el nivel de actividad física.

México tiene 131.1 millones de habitantes, de los cuales solo 6.94% se dedica al sector agropecuario y pesquero (SIAP, 2024). El 78% de la población dedicada a actividades agropecuarias tiene más de 45 años, y el 26.8% supera los 65 años (INEGI, 2023), evidenciando un desafío en términos de fuerza laboral joven y físicamente capacitada. Desde esta perspectiva, la automatización puede complementar y no sustituir el trabajo rural, ayudando a cubrir la escasez de recursos humanos en el campo, además podría generar nuevos empleos y fortalecer la productividad del sector (Minian y Martinez, 2018; Santos y Kienzle, 2021).

Un ejemplo representativo se observa en la comunidad de Atzacaloya, ubicada en la región centro del estado de Guerrero, en los límites de la región de la Montaña Baja. En esta Zona, las condiciones topográficas del terreno restringen el uso de maquinaria agrícola diseñada para grandes escalas, lo que limita significativamente la mecanización del proceso

productivo. Como resultado, el 100% de los productores cultiva hortalizas mediante prácticas tradicionales. En cultivos que requieren trasplante, como la cebolla, el tomate de cáscara y el jitomate, esta actividad se realiza de forma manual (figura 2). En promedio, para el trasplante de cebolla (incluye preparación del suelo y plantación de plántulas) se requieren alrededor de 86 jornales por hectárea, lo que, considerando un costo de \$450.00 MXN por jornal, representa un gasto aproximado de \$38,300.00 MXN por hectárea únicamente en mano de obra, sin incluir los costos adicionales asociados a la alimentación de los trabajadores durante la jornada. A esta situación, se le suma un desafío crítico: la disponibilidad de la cantidad necesaria de trabajadores en periodos clave, cuando la mayoría de los productores debe trasplantar de manera simultánea para aprovechar las condiciones óptimas de establecimiento del cultivo y las mejores oportunidades de mercado.

En este contexto, resulta particularmente relevante el desarrollo de sistemas de trasplante mecanizados de pequeña escala o semiautomatizados, adaptados a las condiciones de la agricultura familiar y a terrenos con limitaciones para la mecanización convencional. Para maximizar los beneficios de estas tecnologías, se requieren políticas públicas que promuevan el desarrollo de equipos apropiados, incentivos para la investigación aplicada, programas de capacitación técnica y mejoras en la calidad del empleo rural (B. Cheng *et al.*, 2024; FAO, 2022).



Figura 2

Prácticas de Agricultura tradicional en la comunidad de Atzacoyaloya, municipio de Chilapa de Álvarez, Guerrero: a) preparación de suelo previo al trasplante de cebolla, b) trasplante manual de plántulas de cebolla roja en campo abierto con riego rodado, c) trasplante manual de plántulas de tomate de cáscara en campo abierto con sistema

de riego por goteo, y d) trasplante manual de plántulas de jitomate en campo abierto con acolchado y riego por goteo; instalación posterior de malla sombra.

Fuente: elaboración propia.

Una transición tecnológica planificada permitirá que los pequeños y medianos productores, quienes son los más vulnerables frente a la innovación, adopten de manera gradual sistemas de trasplante automatizados. La figura 3 presenta algunas intervenciones estratégicas que podrían contribuir al desarrollo del trasplante automático en México, en concordancia con lo señalado por Santos y Kienzle (2021) para la modernización de la agricultura en general. Esta estrategia contribuirá a fortalecer la seguridad alimentaria, reducir la migración rural hacia áreas urbanas y optimizar el uso de recursos humanos y naturales, integrando la innovación tecnológica con el desarrollo social y ambiental del sector agroalimentario mexicano (Vargas-Canales, 2023).

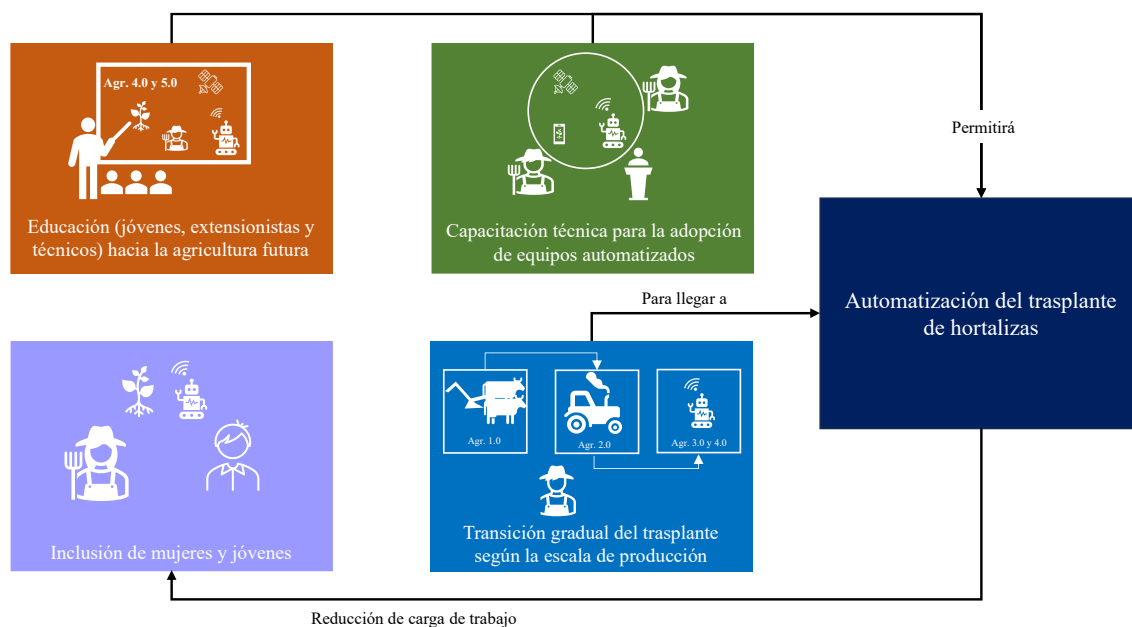


Figura 3
Implicaciones necesarias para lograr implementar la tecnología del trasplante automático de hortalizas en el campo mexicano.

Fuente: elaboración propia.

5. VIABILIDAD ECONÓMICA PARA PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES

Uno de los principales desafíos asociados con la automatización del trasplante hortalizas es la elevada inversión inicial requerida para la adquisición de nuevos equipos, lo que representa una barrera significativa para los productores de pequeña y mediana escala (Nage *et al.*,

2023). Esta limitación económica podría profundizar las desigualdades en el sector agroalimentario, haciendo que la innovación tecnológica resulte inaccesible para los pequeños productores y otros marginados, como son las mujeres y los jóvenes (FAO, 2022).

En este contexto, las políticas agroalimentarias deben fomentar la adopción de tecnologías de trasplante automatizado entre los pequeños y medianos productores (figura 4). Para lograrlo, es fundamental implementar programas de capacitación técnica que estén dirigidos tanto a los trabajadores como a los productores, con el fin de especializarlos en el uso, mantenimiento y gestión de esas tecnologías (Vargas-Canales, 2023). La falta de iniciativas de este tipo podría generar un estancamiento en la productividad agrícola nacional, limitando el potencial de modernización del sector. Así mismo, resulta indispensable completar la capacitación con mecanismos de financiamiento accesibles, particularmente para proyectos rentables que involucren a pequeños productores, dado que este segmento concentra una proporción significativa del empleo rural (Basurto y Escarlante, 2012).

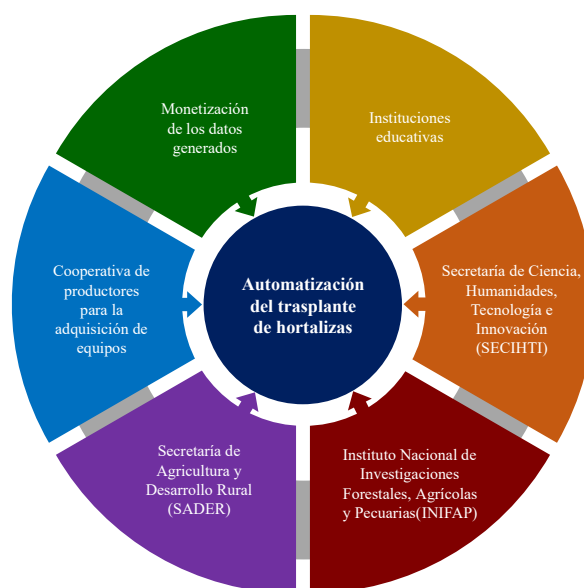


Figura 4
Instituciones clave y acciones estratégicas para promover la automatización del trasplante de hortalizas en México.

Fuente: elaboración propia.

PROSPECTIVA

La automatización de un proceso repetitivo y físicamente demandante, como el trasplante de hortalizas, permitiría la optimización de los tiempos de trabajo y mejorar el uso de los

Postprint

recursos económicos, incrementando la eficiencia productiva y la competitividad de los productores. Por lo tanto, la implementación efectiva de la automatización debe considerar los distintos niveles tipológicos de producción hortícola –bajo, mediano y alto–, reconociendo que cada escala productiva contribuye tanto a la generación de empleo local como al fortalecimiento de la economía de las comunidades rurales. De esta manera, una estrategia integral de adopción tecnológica que combine financiamiento, capacitación y políticas inclusivas permitirá que los beneficios del trasplante automatizado se distribuyan de manera equitativa, favoreciendo la modernización del sector hortícola sin excluir a los actores más vulnerables.

Además, es necesaria una transición tecnológica que permita evolucionar del trasplante manual a sistemas mecánicos y, posteriormente, a sistemas completamente robotizados, coincidiendo con los principios de la Agricultura 4.0 y 5.0, principalmente, para productores de pequeña y mediana escala en el centro de México que es donde hay mayor rezago de tecnología. Este proceso no solo incrementaría la eficiencia, sino que también contribuiría a hacer más atractivas las actividades agrícolas para las nuevas generaciones, mediante la incorporación de tecnologías avanzadas en el trasplante de las distintas hortalizas cultivadas en el país. En este contexto, se visualiza un campo emergente de investigación y desarrollo tecnológico orientado a optimizar los tiempos, la precisión y la sostenibilidad del proceso de trasplante.

CONCLUSIONES

La automatización del trasplante de hortalizas juega un papel estratégico en el futuro del sector agrícola de México. No obstante, su implementación debe evitar el desplazamiento de los trabajadores rurales y la afectación de sus fuentes de ingreso. Considerando que el sector agroalimentario nacional se clasifica en distintos niveles de producción (bajo, mediano y alto), existe el riesgo de que la incorporación de estas tecnologías profundice las desigualdades históricas que han afectado a pequeños agricultores y a jornaleros.

En este sentido, la transición del trasplante tradicional al automático debe estar respaldada por políticas públicas que promuevan una modernización tecnológica justa e inclusiva. Esto implica desarrollar programas de capacitación técnica, establecer apoyos financieros

Postprint

dirigidos a productores de pequeña y mediana escala, y diseñar mecanismos eficaces para la reconversión laboral de los trabajadores que pudieran verse desplazados por la automatización.

Asimismo, resulta esencial fomentar una cultura tecnológica en las nuevas generaciones, dirigida de manera específica al desarrollo y producción del sector agrícola, con el objetivo de avanzar hacia un modelo productivo que no dependa exclusivamente del trabajo manual intensivo. Finalmente, toda estrategia de modernización y adopción de tecnologías emergentes debe considerar el impacto ambiental, promoviendo el uso de energías limpias y alternativas que contribuyan a reducir la huella ecológica del sector.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros de este artículo por los comentarios y las observaciones que aportaron para mejorar su estructura y calidad. También, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada con el apoyo número 838532. Así mismo, a la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería y Uso Integral del Agua (IAUIA) por las facilidades prestadas durante la realización de este trabajo. De igual forma, se reconoce la colaboración de las personas que participaron directamente en la etapa de campo para la realización de este ensayo: Cirilo Rodríguez Juárez y Carlos Rodríguez Martínez.

REFERENCIAS

- Abiri, R., Rizan, N., Balasundram, S. K., Shahbazi, A. B., & Abdul-Hamid, H. (2023). Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity. *Heliyon*, 9(12), e22601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22601>
- Addorisio, R., Spadoni, R., & Maesano, G. (2025). Adoption of Innovative Technologies for Sustainable Agriculture: A Scoping Review of the System Domain. *Sustainability (Switzerland)*, 17(9), 4224. <https://doi.org/10.3390/su17094224>
- Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P. (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse

- cultivation — a review. *Frontiers in Plant Science*, 15(April), 1–26.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1357153>
- Bahn, R. A., Yehya, A. A. K., & Zurayk, R. (2021). Digitalization for sustainable agri-food systems: Potential, status, and risks for the Mena region. *Sustainability (Switzerland)*, 13(06), 3223. <https://doi.org/10.3390/su13063223>
- Basurto, S., & Escarlante, R. (2012). Impacto de la crisis en el sector agropecuario en México. *Journal of Economic Literature*, 9(25), 989–998.
- Bissadu, K. D., Sonko, S., & Hossain, G. (2024). Society 5.0 enabled agriculture: Drivers, enabling technologies, architectures, opportunities, and challenges. *Information Processing in Agriculture*, 12(1), 112–124.
<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.003>
- Cheng, B., Wu, H., Zhu, H., Liang, J., Miao, Y., Cui, Y., & Song, W. (2024). Current Status and Analysis of Key Technologies in Automatic Transplanters for Vegetables in China. *Agriculture (Switzerland)*, 14(12), 2168.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>
- Cheng, C., Fu, J., Su, H., & Ren, L. (2023). Recent advancements in agriculture robots: benefits and challenges. *Machines*, 11(1), 1–24.
<https://doi.org/10.3390/machines11010048>
- FAO. (2005). Agricultura y diálogo de cultras. Nuestro Patrimonio Común. *Agricultura y Diálogo de Culturas*, 7. <https://www.fao.org/3/a0015s/a0015s00.htm>
- FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. In *El futuro de la agricultura y la alimentación* (Vol. 1, Issue 1).
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f7ecc7f0-8b58-48b5-ae57-290d5f8808c1/content>
- FAO. (2021). *Frutas y verduras – esenciales en tu dieta: Año Internacional de las Frutas y Verduras, 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb2395es>
- FAO. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022. Leveraging Automation in Agriculture for Transforming Agrifood Systems*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb9479en>

- Fukase, E., & Martin, W. (2020). Economic growth, convergence, and world food demand and supply. *World Development*, 132, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>
- Gajbhiye, A. M. (2024). Design and Development of Solar Powered Automated Agriculture Bot. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(6), 503–506. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63167>
- García-Hernández, R. V., Velázquez-Lopez, N., Cruz, P., & Chávez, N. (2020). *Desarrollo de un sistema de siembra para un vehículo autónomo*. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/9a4b43ae-5781-4570-8327-b7ea24b0fadb>
- Gaytán, I., Fitz, E., Cruz, P., López, G. de J., & Guzmán, R. (2023). *Desarrollo de un Sistema Inteligente para el control mecánico de maleza en cultivos a hilera*. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/106c676c-fadb-45ab-b011-77385452af73>
- Gorjian, S., & Campana, P. E. (2022). Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems. *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, May, 1–479. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03304-9>
- Grande, G., Hidalgo-Reyes, M., Cruz, P., & Velázquez, N. (2024). Evolution and technological development of automatic transplanters for vegetables: a review. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 72(1), 830–847. <https://doi.org/https://doi.org/10.35633/inmateh-72-74>
- Gutiérrez, C., Serwatowski, R., Gracia, C., Cabrera, J. M., & Saldaña, N. (2009). *Design , building and testing of a transplanting mechanism for strawberry plants of bare root on mulched soil*. 7(4), 791–799.
- Han, L., Xiang, D., Xu, Q., Du, X., Ma, G., & Mao, H. (2023). Development of simplified seedling transplanting device for supporting efficient production of vegetable raw materials. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18), 10022. <https://doi.org/10.3390/app131810022>
- INEGI. (2022). *Maquinaria y equipo*. Censo Agroalimentario. https://www.inegi.org.mx/temas/maquinaria/#informacion_general
- INEGI. (2023). Resultados Definitivos Del Censo Agropecuario 2022. *Instituto Nacional de*

- Estadística y Geografía (INEGI)*, 1–13.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def_2022.pdf
- Khozaei, M., Kamgar Haghighi, A. A., Zand Parsa, S., Sepaskhah, A. R., Razzaghi, F., Yousefabadi, V. allah, & Emam, Y. (2020). Evaluation of direct seeding and transplanting in sugar beet for water productivity, yield and quality under different irrigation regimes and planting densities. *Agricultural Water Management*, 238(December 2019), 106230. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106230>
- Lira, R., & Ruiz, M. (2023). Producción de plantas de fresa con calidad genética, fisiológica y fitosanitaria. INIFAP. Folleto Técnico Núm. 37. SADER- INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 36 p.
- López-Gómez, J. A., Patiño-Espejel, J. E., Velázquez-López, N., Sánchez-Chávez, D. I., & Van Loon, J. (2024). Design and Comparison of Two Maize Seeders Coupled with an Agricultural Robot. *Machines*, 12(12), 935. <https://doi.org/10.3390/machines12120935>
- Majeed, Y., Khan, M. U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F., Sultan, M., & Raza, A. (2023). Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, 344–359. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032>
- McPhee, J. E., Antille, D. L., Tullberg, J. N., Doyle, R. B., & Boersma, M. (2020). Managing soil compaction – A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? *Biosystems Engineering*, 195, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.006>
- Minian, I., & Martinez, Á. (2018). El impacto de las nuevas tecnologías en el empleo en México. *Problemas Del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 49(195). <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2018.195.64001>
- Mota-Delfín, C., López-Canteñs, G. de J., López-Cruz, I. L., Romantchik-Kriuchkova, E., & Olguín-Rojas, J. C. (2022). Detection and Counting of Corn Plants in the Presence of Weeds with Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 14(19), 4892.

<https://doi.org/10.3390/rs14194892>

- Moya, S. Y. (2023). *Nuevas guías alimentarias para la población mexicana y el Plato del Bien Comer*. Coordinación de Nutrición Del CIAD. <https://www.ciad.mx/nuevas-guias-alimentarias-para-la-poblacion-mexicana-y-el-plato-del-bien-comer/>
- Nage, S. M., Mathur, S. M., & Meena, S. S. (2023). Vegetable Transplanters for India: A Review. *Agricultural Science Digest*, 43(2), 129–134. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5548.Submitted>
- NOM-043-SSA2-2012. (2013). Norma Oficial Mexicana Nom-043-Ssa2-2012, Servicios Básicos De Salud. Promoción Y Educación Para La Salud En Materia Alimentaria. Criterios Para Brindar Orientación. In *Diario Oficial de la Federación* (Vol. 24, pp. 1–35).
- Sajuria, C. (2014). La agricultura y la ciencia. *Idesia*, 32(3), 3–5. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292014000300001>
- Santos, S., & Kienzle, J. (2021). Agricultura 4.0-Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible. *Gestión Integrada de Cultivos. Rome, Italy: FAO*, 24.
- Sarandón, S. J. (2020). El papel de la agricultura en la transformación social-ecológica de América Latina. In *Friedrich-Ebert-Stiftung (FES)*. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/16550.pdf>
- Schattman, R. E., Jean, H., Faulkner, J. W., Maden, R., McKeag, L., Nelson, K. C., Grubinger, V., Burnett, S., Erich, M. S., & Ohno, T. (2023). Effects of irrigation scheduling approaches on soil moisture and vegetable production in the Northeastern U.S.A. *Agricultural Water Management*, 287(June), 108428. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108428>
- Secretaría de Economía. (2025). *Hortalizas, plantas, raíces y tubérculos alimenticios*. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/vegetables-roots-and-tubers?timeNetTradeSelector=Year&sourceTradeBalance=inegiOption>
- SIAP. (2024). *Panorama Agroalimentario 2018-2024*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

- Steffen, W., Noone, K., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Wit, C. A. De, Hughes, T., Leeuw, S. Van Der, Rodhe, H., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., ... Foley, J. (2009). Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/%0AVitousek>,
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. De, Wit, C. A. De, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries : Guiding changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855–1259866. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Taha, M. F., Mao, H., Zhang, Z., Elmasry, G., & Awad, M. A. (2025). Emerging Technologies for Precision Crop Management Towards Agriculture 5 . 0 : A Comprehensive Overview. *Agriculture (Switzerland)*, 15(06), 582–612. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060582>
- Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H., & Shah, M. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>
- Tripathi, A. D., Mishra, R., Maurya, K. K., Singh, R. B., & Wilson, D. W. (2019). Estimates for world population and global food availability for global health. In *The Role of Functional Food Security in Global Health* (pp. 3–24). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813148-0.00001-3>
- Vargas-Canales, J. M. (2023). Technological Capabilities for the Adoption of New Technologies in the Agri-Food Sector of Mexico. *Agriculture (Switzerland)*, 13(6), 1177. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061177>
- Vázquez-Casarrubias, G., Alberto Escalante-Estrada, J. S., Teresa Rodríguez-González, M., Ramírez-Ayala, C., & Enrique Escalante-Estrada, L. (2011). Edad al trasplante y su efecto en el crecimiento y rendimiento de chile aplaxtleco. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 61–65.

Postprint

Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., Yin, Z., Huang, L., Fu, Y., Li, L., Chang, S. X., Zhang, L., Rinklebe, J., Yuan, Z., Zhu, Q., Xiang, L., Tsang, D. C. W., Xu, L., Jiang, X., ... Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *Innovation*, 2(4).
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>

8. CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo de investigación comprende cinco etapas, en las cuales se desarrollaron artículos de revisión, investigaciones originales y un ensayo científico, según correspondió a los objetivos de cada etapa. En conjunto, el compendio aporta información sobre las propiedades físico-mecánicas de las plántulas de jitomate y su aplicación como base para el desarrollo de sistemas automatizados de extracción para el trasplante.

En la primera etapa, se identificó que el desarrollo de equipos de trasplante automatizado de hortalizas representa una oportunidad estratégica para incrementar la competitividad del sector agrícola en México, particularmente en unidades de producción pequeñas y medianas. A diferencia de países como China, India y Estados Unidos, donde esta tecnología ha alcanzado un mayor grado de desarrollo, en México su adopción continúa limitada, entre otros factores, por la dependencia de maquinaria importada y sus elevados costos de adquisición. Esta situación dificulta el acceso de los productores con menor capacidad de inversión y evidencia la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas adaptadas a las condiciones productivas y económicas del país.

En la segunda etapa, se establecieron bases para el diseño de equipos automatizados mediante la caracterización físico-mecánica de plántulas de jitomate representativas de la región centro de México. Los híbridos F1 evaluados –*Natalie*, *CID* y *Gavilán*– mostraron que el contenido de humedad del cepellón constituye un factor determinante en las características de las plántulas, debido a que representa aproximadamente el 70% de su masa total y presenta una relación directa con este. Asimismo, el contenido de humedad influyó en propiedades mecánicas como la fuerza de adhesión, el coeficiente de fricción y la fuerza de punzonamiento del cepellón. Los resultados también evidenciaron

diferencias entre híbridos en algunas características de las plántulas, lo que confirma la importancia de considerar la variabilidad asociada al material vegetal en el diseño de sistemas automatizados de manipulación.

En la tercera etapa, se determinó la importancia de la fuerza de compresión radial (RCF) durante la sujeción de las plántulas por el tallo. Se establecieron dos niveles de referencia: RCF1, correspondiente al inicio de la formación de microfracturas en el tallo, y RCF2, asociado con su ruptura. Las velocidades de carga (LR) no presentaron un efecto significativo sobre la RCF en ninguna de las fases evaluadas. No se observaron diferencias significativas entre los híbridos en RCF1; sin embargo, en RCF2 se identificaron diferencias estadísticamente significativas, las cuales pueden estar relacionadas con características intrínsecas y variaciones genéticas entre los materiales evaluados. A partir de estos resultados, se estableció una RCF_{perm} de 20 N como límite de referencia para la sujeción de los tallos, con el propósito de evitar daños mecánicos durante su manipulación. Este valor constituye un parámetro cuantitativo de utilidad para el diseño y ajuste de efectores finales destinados a la manipulación durante su extracción automatizada de plántulas de jitomate.

En la cuarta etapa, se diseñó un dispositivo para la extracción de plántulas de jitomate de charolas germinadoras, empleando principios de biomimetismo a partir de la acción de los dedos índice y pulgar durante la extracción manual tradicional. El prototipo obtenido presenta dimensiones generales de $1.2 \times 0.5 \times 1.0$ m, una masa estimada de 33 kg y capacidad para extraer simultáneamente 10 plántulas. Las características del diseño permiten plantear su posible adaptación a equipos mecánicos de trasplante existentes, constituyendo una alternativa tecnológica para avanzar hacia sistemas de extracción automatizada. No obstante, la validación de su desempeño en condiciones reales de operación, así como la determinación de su capacidad para incrementar la productividad y reducir los costos de operación, requieren evaluaciones experimentales posteriores.

Finalmente, se reconoce que la automatización del trasplante de hortalizas puede contribuir a la modernización del sector agrícola mexicano; sin embargo, su implementación debe considerar sus posibles efectos sobre el empleo rural y las desigualdades existentes entre productores de diferente escala. Por ello, la transición hacia sistemas automatizados debería acompañarse de políticas públicas orientadas a una modernización tecnológica justa e inclusiva, mediante programas de capacitación técnica, apoyos financieros para pequeños y medianos productores y mecanismos de reconversión laboral para los trabajadores que pudieran verse afectados. Asimismo, resulta necesario fomentar en las nuevas generaciones una cultura tecnológica orientada al desarrollo agrícola, con el propósito de avanzar hacia sistemas productivos menos dependientes del trabajo manual intensivo, sin dejar de considerar las condiciones sociales y económicas del sector rural.

Se recomienda el análisis de las plántulas a nivel multiescalar incluyendo variables como la estructura de las paredes internas del tallo, la presión de turgencia y contenido de lignina para analizar con detalle la variabilidad que existe de un tallo a otro aun cuando sea del mismo híbrido ya que al poseer propiedades anisotrópicas, estas no se comportan de manera similar. Además, se deben incluir sensores que midan en tiempo real este tipo de variables al realizar las pruebas. De la misma manera, se recomienda explorar otras hortalizas que tengan valor económico en el extranjero para desarrollar equipos que involucren las características físico-mecánicas adecuadas y simulación dinámica multiescalar de las plántulas a estudiar.

9. ANEXOS: Congresos internacionales y Simposios

CINCA 2025

The poster features a background of light blue and white hexagons. At the top, there is a horizontal bar with a red and orange wavy pattern on the left and a solid orange bar on the right. The top section contains four logos: the 'XXVII Congreso Internacional de Ciencias Agronómicas 2025' logo, the 'UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO' logo, and two circular logos. The main title 'CONSTANCIA' is written in large, orange, sans-serif capital letters. Below it, the author's name 'a: GAUDENCIO GRANDE MARTINEZ' is in black. Further down, the text 'Por su participación como' is followed by 'PONENTE' in large, bold, red capital letters, and then 'en la modalidad Oral del trabajo titulado'. The title of the presentation, 'DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE PLÁNTULAS DE JITOMATE EN CHAROLAS GERMINADORAS', is in black. Below this, the authors are listed: 'cuyos autores son: Gaudencio Grande-Martínez; Martín Hidalgo-Reyes; Pedro Cruz-Meza; Noé Velázquez-López'. The location and date, 'Chapingo, Estado de México, del 22 al 25 de abril de 2025', are in red. At the bottom right, there is a signature and the text 'Dr. Noé Velázquez López Presidente'. The bottom right corner has a decorative orange and red hexagonal pattern.

Congreso Internacional de Ciencias Agronómicas 2025
XXVII Congreso Nacional
del 22 al 25 de abril de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
CHAPINGO

Otorga la presente

CONSTANCIA

a: **GAUDENCIO GRANDE MARTINEZ**

Por su participación como
PONENTE
en la modalidad Oral del trabajo titulado

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE PLÁNTULAS DE JITOMATE EN CHAROLAS GERMINADORAS

cuyos autores son:
Gaudencio Grande-Martínez; Martín Hidalgo-Reyes; Pedro Cruz-Meza; Noé Velázquez-López

Chapingo, Estado de México, del 22 al 25 de abril de 2025.

Dr. Noé Velázquez López
Presidente



XXVIII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas

"Innovación Biotecnológica: Retos y Oportunidades En la Agricultura Moderna"

Universidad Autónoma de Baja California Instituto de Ciencias Agrícolas

Otorga la presente
Constancia
a

Grande Gaudencio, Hidalgo-Reyes Martín, Cruz Pedro y Velázquez-López Noé

CICA 2025

Por su participación como PONENTES en el trabajo titulado:

FUERZA DE ADHESIÓN DE LAS PLÁNTULAS DE JITOMATE PARA SU RECOLECCIÓN EN EL TRASPLANTE AUTOMÁTICO

En la Modalidad de Ponencia Oral


Dr. Daniel González Mendoza
Director del
Instituto de Ciencias Agrícolas


Dra. Claudia Yared Michel López
Presidenta del
XXVIII Congreso Internacional en Ciencias
Agrícolas

Mexicali, Baja California, 23 y 24 de octubre del 2025



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO

VALLE DEL DIABLO



II Simposio

Avances en la Investigación Básica y Aplicada
en el Agro Mexicano



LA UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Otorga la presente

CONSTANCIA

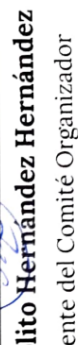
A: GAUDENCIO GRANDE MARTÍNEZ

Por su participación como **PONENTE** en su modalidad **ORAL** con el trabajo “*Caracterización física de plántulas de jitomate para el diseño de sistemas de trasplante automático.*”, cuyos autores son: Gaudencio Grande Martínez, Martín Hidalgo Reyes, Pedro Cruz Meza, Noé Velázquez López, Raúl Vidal García Hernández. Durante el II Simposio: “Avances en la Investigación Básica y Aplicada en el Agro Mexicano”, llevado a cabo los días 27 y 28 de noviembre de 2025.

Loma Bonita Oaxaca, México 28 de noviembre de 2025


M.C. Héctor López Arjona
Vice-Rector Académico de la
Universidad del Papaloapan




Dr. Hipolito Hernández Hernández
Presidente del Comité Organizador




UNPA
terro abertima, aua apato
tina la tana, el
**VICE-RECTORIA
ACADEMICA**



II Simposio

Avances en la Investigación Básica y Aplicada
en el Agro Mexicano



LA UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: GAUDENCIO GRANDE MARTÍNEZ

Por su participación como **PONENTE** en su modalidad **ORAL** con el trabajo “*Evolución de los sistemas automáticos del trasplante de hortalizas.*”, cuyos autores son : Gaudencio Grande Martínez, Martín Hidalgo Reyes, Pedro Cruz Meza, Noé Velázquez López, Raúl Vidal García Hernández. Durante el II Simposio: “Avances en la Investigación Básica y Aplicada en el Agro Mexicano”, llevado a cabo los días 27 y 28 de noviembre de 2025.

Loma Bonita Oaxaca, México 28 de noviembre de 2025

M.C. Héctor López Arjona
Vice-Rector Académico de la
Universidad del Papaloapan



**VICE-RECTORIA
ACADEMICA**



Dr. Hipolito Hernández Hernández
Presidente del Comité Organizador

Agrociencias 2026

AGRO CIENCIAS

UNAH

CONGRESO INTERNACIONAL
DE LAS CIENCIAS AGROPECUARIAS

*"Universidad verde: siente, crece y transforma
por un desarrollo sostenible"*

El Comité Organizador, otorga el presente

CERTIFICADO

A: Gaudencio Grande Martínez; Martín Hidalgo Reyes; Pedro Cruz Meza;
Noé Velázquez López

POR LA PRESENTACIÓN DE

MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA ESTIMACIÓN DEL CENTRO DE MASA DE
PLÁNTULAS DE JITOMATE

EN VI CONGRESO INTERNACIONAL DE LAS CIENCIAS AGROPECUARIAS. AGROCIENCIAS

Agrociencias. UNAH, del 1 al 04 de Junio de 2026

ISBN: 978-959-16-5217-1

Dr. C. Tania Pérez Castro
Secretaría Científica

Dr. C. Antihus A. Hernández Gómez
Presidente Comité Organizador

