



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

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

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CLASIFICADORA DE
PAPAS (*Solanum tuberosum* L.)**

TESIS DE GRADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

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

PRESENTA:

GAUDENCIO GRANDE MARTÍNEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. MARTÍN HIDALGO REYES



APROBADA



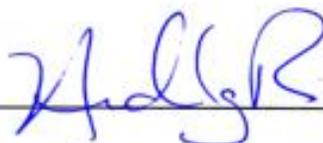
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2021

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CLASIFICADORA DE
PAPAS (*Solanum tuberosum* L.)

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

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____



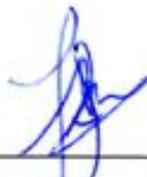
DR. MARTÍN HIDALGO REYES

ASESOR: _____



DR. PEDRO CRUZ MEZA

ASESOR: _____



DR. FEDERICO FÉLIX HAHN SCHLAM

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ACRÓNIMOS	X
DEDICATORIAS	XII
AGRADECIMIENTOS	XIII
DATOS BIOGRÁFICOS	XIV
RESUMEN GENERAL	XV
GENERAL ABSTRACT	XVI
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Referencias	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Origen y distribución	7
2.2 Producción de papa en México	8
2.3 Cosecha de papa	11
2.4 Importancia de las propiedades físico-mecánicas de la papa	12
2.5 Tipos de clasificadoras y limpiadoras de papas	15
2.6 Referencias	19
3 ARTICLE 1: DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS IN POTATOES (FIANNA VARIETY) AS PARAMETERS FOR MECHANICAL DESIGN	27
Determination of physical-mechanical characteristics in potatoes (fianna variety) as parameters for mechanical design	28
Abstract	28
1 Introduction	28
2 Materials and methods	29

2.1 Experimental design	30
2.2 Determination of physical characteristics.....	30
2.3 Determination of the mechanical characteristics.....	31
2.4 Statistical analysis	33
3 Results and discussion.....	33
3.1 Physical characteristics.....	33
3.2 Mechanical characteristics	36
4 Conclusions.....	41
Acknowledgments.....	41
References.....	42
4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CLASIFICADORA DE PAPAS PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES.....	47
Diseño y construcción de una clasificadora de papas para pequeños productores	48
Resumen	48
Abstract	48
1 Introducción.....	49
2 Materiales y métodos	50
2.1 Propiedades físicas de la papa	50
2.2 Área de estudio para el desarrollo del prototipo	50
2.3 Material experimental.....	51
2.4 Diseño conceptual	51
2.5 Consideraciones para el diseño de detalle	52
2.6 Descripción y principio de funcionamiento del prototipo	53
2.7 Validación de la estructura.....	55
2.8 Prueba técnica del prototipo	56

3 Resultados y discusiones	57
3.1 Propiedades físicas de las papas	57
3.2 Validación de la estructura y modelo 3D del prototipo	57
3.4 Prueba técnica y costos de construcción.....	61
5 Conclusiones.....	63
Agradecimientos.....	63
Referencias	64
5 CONCLUSIONES GENERALES	66
6 ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE CUADROS

CAPITULO 2

Cuadro 1. Datos del SIAP de la producción de papa en México de los últimos diez años.....	8
Cuadro 2. Porcentaje de producción mensual de papa a nivel nacional del año 2020.....	9
Cuadro 3. Entidades con mayor volumen de producción de papa en 2020.....	10
Cuadro 4. Principales variedades de papa sembradas en México.	11
Cuadro 5. Propiedades físico-mecánicas con diferentes variedades de algunas investigaciones realizadas.....	13
Cuadro 6. Patentes de clasificadoras y limpiadoras existentes en el mundo....	17

CAPÍTULO 3

Table 1 Mean values, maximums and minimums with standard deviation and coefficient variations of some of the physical characteristics of potatoes	35
Table 2 Mean values with standard deviation of the static friction coefficient and the rolling coefficient of potatoes on different surfaces	37
Table 3 Mean values from the axial compression test with potatoes of different sizes in two positions	39
Table 4 Potato firmness at different heights of fall impact.....	40

CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Características físicas de los tubérculos utilizados para la prueba técnica del prototipo.....	57
Cuadro 2. Valores teóricos de parámetros para el sistema de clasificación del prototipo.....	61
Cuadro 3. Características técnicas del sistema de clasificación del prototipo. .	62
Cuadro 4. Costos de construcción del prototipo.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figure 1 Axial dimensions of the potato tuber	30
Figure 2 Device to determine the static friction coefficient and the rolling angle	32
Figure 3 Diagram of potato positions in the axial compression test: (a) vertical position; (b) horizontal position	33
Figure 4 Means of the axial dimensions of the potato in the four classification groups	34
Figure 5 Weight mean comparisons by Tukey's test in the different groups	36
Figure 6 Load-deformation curves (extension through compression) in the axial compression test: (a) potato from the S1 group in the vertical position; (b) potato from the S3 group in the horizontal position.....	38

CAPÍTULO 4

Figura 1. Función global del prototipo para la clasificación de papas.	51
Figura 2. Análisis de las subfunciones del prototipo.	52
Figura 3. Sistema de desprendimiento de tierra de los tubérculos.	54
Figura 4. Sistema de clasificación de papas.....	55
Figura 5. Tensiones (von Mises) de la estructura.	58
Figura 6. Desplazamiento estático de la estructura.	58
Figura 7. Deformación unitaria estática de la estructura.....	59
Figura 8. Factor de seguridad de la estructura.	59

Figura 9. Vista isométrica del prototipo, compuesto de (01) cepillo rotativo, (02) Lámina desplegada ranurada para filtración de tierra, (03) tolva del sistema de limpieza, (04) motor eléctrico de 2 Hp, (05) tolva de almacén de tierra, (06) tolva de redirección de papas, (07) motor eléctrico de 0.5 Hp, (08) rodillo sin fin, (09) rodillo liso, (10) tolva de clasificación, (11) vaciado de papas S4, (12) vaciado de papas S3, (13) vaciado de papas S2 y (14) vaciado de papas S1..... 60

ACRÓNIMOS

ASAE:	Ejecutivos de la Sociedad Estadounidense de Asociaciones (en inglés).
ASTM:	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (en inglés).
CAD:	Diseño Asistido por Computadora (en inglés).
D_a:	Diámetro aritmético.
D_g:	Diámetro medio geométrico.
Hp:	Caballo de fuerza (En inglés).
MPa:	Mega Pascales.
msnm:	Metros sobre el nivel del mar.
N:	Newton
PTR:	Perfil Tubular Rectangular.
PVC:	Polyvinyl chloride (en español policloruro de vinilo).
rev min⁻¹:	Revoluciones por minuto.
S1:	Grupo de papas de tamaño primera (según productores de la región de Tlaxco, Tlaxcala) o Tamaño 1 (según la Norma Mexicana NMX-FF-022-SCFI-2002).
S2:	Grupo de papas de tamaño segunda (según productores de la región de Tlaxco, Tlaxcala) o Tamaño 2 (según la Norma Mexicana NMX-FF-022-SCFI-2002).
S3:	Grupo de papas de tamaño tercera (según productores de la región de Tlaxco, Tlaxcala) o Tamaño 3 (según la Norma Mexicana NMX-FF-022-SCFI-2002).
S4:	Grupo de papas de tamaño cuarta (según productores de la región de Tlaxco, Tlaxcala) o Tamaño 4 (según la Norma Mexicana NMX-FF-022-SCFI-2002).

S_a:	Área de superficie de la papa.
SIAP:	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
W_t:	Peso del tubérculo de papa.
W_w:	Peso del agua.
Φ:	Esfericidad.
ρ_w:	Densidad del agua.
ρ_t:	Densidad del tubérculo.
μ_s:	Coefficiente de fricción estático de las papas.

DEDICATORIAS

A mi padre, Luis Grande por sus consejos, comprensión, guía y apoyo en las metas y decisiones tomadas.

A mi madre, Hermelinda Martínez por su cariño, sus consejos y apoyo incondicional en cada decisión de mi vida.

A mi hermana Santa Grande y su esposo Cirilo Rodríguez por todo su apoyo.

Gaudencio

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por el apoyo económico (N° de beca 745846) para hacer posible mis estudios de posgrado.

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 posgrado.

Al **Dr. Martín Hidalgo Reyes**, por su apoyo brindado, sugerencias y la confianza que mantuvo en mí para la aprobación, realización y revisión de proyecto de investigación.

Al **Dr. Pedro Cruz Meza** y al **Dr. Federico Félix Hahn Schlam**, por todo su valioso tiempo brindado en la aprobación, realización y revisión de este proyecto, aportando sus conocimientos y experiencias.

Al **M. I. Rabelo** por ofrecer las facilidades para la obtención de información en campo y muestras de papas de la variedad Fianna.

Al **Dr. Pedro Ramón Mayans** por la asesoría dada en la realización de este proyecto de investigación.

Al **Ing. Abraham** y al **Ing. Humberto** por facilitarme el acceso a las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y los diferentes equipos utilizados para la realización de este proyecto de investigación.

Al **Dr. Carlos Villaseñor** y a la **Dra. Rosario Venegas** por facilitarme el acceso a las instalaciones del laboratorio de pruebas biológicas y apoyarme en las pruebas mecánicas de las papas.

Al **Dr. Crescenciano Saucedo** por facilitarme el acceso y hacer uso de las instalaciones del laboratorio de Postcosecha del COLPOS campus Texcoco.

A mis amigos, **Ing. Juan Ismael Temoxtle**, **M. C. Fernando Reyes** y **Ing. Juan Manuel Reyes**, por sus consejos y comentarios.

Al trabajador del DIMA, **C. Juan Antonio Hernández**, por la logística en el transporte de materiales y apoyo en el ensamble general del prototipo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

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

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).

RESUMEN GENERAL

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CLASIFICADORA DE PAPAS (*Solanum tuberosum* L.)

La clasificación de la papa es de gran importancia para su comercialización, los tubérculos clasificados incorrectamente disminuyen las ganancias del productor. En la colonia Profesor Graciano Sánchez, municipio de Tlaxco, Tlaxcala, no existen clasificadoras de ningún tipo, de esta manera, el intermediario obtiene mayores ganancias que el productor solo por limpiar y clasificar los tubérculos. El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir un prototipo para clasificar papas en cuatro grupos (primera-S1, segunda-S2, tercera-S3 y cuarta-S4) de acuerdo con su grosor, para uso de productores en pequeñas escalas. La investigación se realizó en dos fases: la primera se enfocó en determinar las propiedades físico-mecánicas de la papa en la variedad Fianna, y la segunda, en el diseño y la construcción de una clasificadora de papas. Los resultados de la primera fase mostraron que las propiedades físicas evaluadas decrecen a medida que el tamaño del tubérculo disminuye con excepción de la esfericidad; en las pruebas mecánicas mostraron que el coeficiente de fricción estático incrementa mientras el tamaño de la papa disminuye, con el ángulo de rodadura ocurrió lo contrario y en la compresión axial mostraron un decremento del grupo S1 al grupo S4, con excepción del módulo de Young cuyo valor estuvo comprendido desde 1.306 a 3.697 MPa en los cuatro grupos. En la segunda fase, se diseñó y construyó un prototipo que mide 1.95 x 0.66 x 1.74 m, tiene dos sistemas: a) limpieza (tres cepillos rotativos) y, b) clasificación (dos rodillos sin fin y dos rodillos lisos, con una pendiente de 15°), funciona con dos motores eléctricos (0.5 Hp y 2 Hp), su productividad es de 2289.6 kg h⁻¹, con una eficiencia del 34.06 % en la clasificación y con un 3.11 % de papas dañadas.

Palabras clave: diseño, propiedades físicas, propiedades mecánicas, prototipo, clasificación por tamaño.

GENERAL ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A POTATO (*Solanum tuberosum* L.) SORTER

The potato sorting has a great importance for its own commercialization, the incorrect sorted of tubers decrease the profits of the producer. In the Professor Graciano Sánchez neighborhood, municipality of Tlaxco, Tlaxcala, there are no sorter machines of any kind of, so the intermediary obtains greater profits than the producers just by cleaning and sorting the tubers. The main aim of this work was to design and build a prototype to sort potatoes in four sizes (first-S1, second-S2, third-S3, and, fourth-S4) according to their thickness, for being used by producers at small scale. The research was carried out in two phases: the first one focused on determining the physical-mechanical properties of the potato in the Fianna variety, and the second one, on the design and construction of a potato sorter. The results of the first phase showed that the evaluated physical properties decreased as the size of the tuber decreased with the exception of sphericity; the mechanical tests showed that the coefficient of static friction increased while the size of the potato decreased, with the rolling angle the opposite situation occurred and in axial compression showed a decrease from group S1 to group S4, with the exception of Young's modulus whose value ranged from 1.306 to 3.697 MPa for the all four groups. In the second phase, a prototype was designed and constructed, it measures 1.95 x 0.66 x 1.74 m, and it has two systems: a) cleaning (three rotating brushes) and, b) sorting (two endless rollers and two smooth rollers, with a slope of 15°), it operates using two electric motors (0.5 Hp and 2 Hp), its productivity is 2289.6 kg h⁻¹, with an efficiency of 34.06 % in sorting and with 3.11 % of damaged potatoes.

Keywords: design, mechanical characteristics, physical characteristics, prototype, size sorting.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La postcosecha se encarga del tratamiento de productos agrícolas para asegurar su protección, conservación y empaque, con el fin de mantener su integridad física, inocuidad y calidad nutricional, además de su distribución y comercialización para satisfacer las necesidades del consumidor; tal es el caso de la papa, la exposición de estas hortalizas a condiciones desfavorables como la luz y las temperaturas extremas, así mismo la manipulación incorrecta provoca magulladuras, ocasionando la acumulación de glicoalcaloides (Faqeerzada *et al.*, 2018; Musita *et al.*, 2019; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Las magulladuras o daños mecánicos pueden ser ocasionadas en la cosecha, la recolección, el transporte y la manipulación a través de un contacto directo entre los componentes mecánicos de las máquinas y los tubérculos (Ramos *et al.*, 2010). Tadesse *et al.* (2018) afirmaron que la pérdida postcosecha es uno de los principales problemas en la producción de papa, con un rango del 20-25%.

Parfitt *et al.* (2010) señalaron que para el año 2050 se espera alimentar a una población mundial de nueve mil millones de habitantes, de los cuales el 70 % vivirá en entornos urbanos, esto implica que la población dedicada a la agricultura disminuirá. Ante esta problemática, se ha visto la necesidad de tecnificar la producción de papa, creando máquinas más eficientes sin dañar los tubérculos o disminuir el porcentaje de daños mecánicos.

Buitrago *et al.* (2004) refirieron que las propiedades físicas y mecánicas son usadas como referencia para el diseño de máquinas para cosecha y postcosecha. En el mundo han sido desarrolladas investigaciones acerca de las propiedades físicas y mecánicas de las papas, en distintas variedades, algunas de ellas son: Astrix, Diamont y Santana (Abd Elhay, 2017); Kufri Badshah (Patel *et al.*, 2018); Favorita, Netherland 15#, Zaodabai, Youjin y Fujin (Fan *et al.*, 2018); Agria (Ahangarnezhad *et al.*, 2019); Marfona y Sante (Abedi *et al.*, 2019); más

del 60 % de estas investigaciones están basadas en Mohsenin (1986), dicho autor publicó un manual sobre las propiedades físico-mecánicas para productos agrícolas.

Actualmente, la clasificación de las papas se realiza por medio de máquinas basándose en su tamaño, peso, y algunas de ellas por visión artificial. El desarrollo de estas máquinas comenzó alrededor del año 1950 para sustituir la clasificación manual de los productos agrícolas, porque esta requiere más tiempo y es más costosa (Londhe *et al.*, 2013).

Las clasificadoras más comunes se basan en el tamaño de la papa con diferentes principios de funcionamiento, además, suelen ser más económicos. Dentro de estas máquinas se tienen: máquina clasificadora para cuatro tamaños, compuesto de una banda transportadora de rodillos separados entre sí (Widodo *et al.*, 2013); clasificadora tipo hélice para tres tamaños (Valentin *et al.*, 2015); clasificadora compuesta de un tambor con orificios para tres tamaños (Huda *et al.*, 2019); equipo estacionario para clasificar en tres tamaños, que funciona con un sistema de cilindro rotatorio con inclinación (Alemu *et al.*, 2021).

En México, solamente los grandes productores cuentan con clasificadoras de tubérculos y son estacionarias, las cuales son difícil de adquirir por los pequeños productores, y que se adecue a la producción que tienen al año, además, la cosecha la realizan con máquinas mecánicas (extranjeras o improvisadas) que solo desentierran el tubérculo. Por otra parte, los productores venden su cosecha directamente con intermediarios que exigen limpieza (libre de terrones y piedras). Además, contratan mano de obra para recolectarlas y clasificarlas en cuatro tamaños (primeras, segundas, terceras y cuartas), pero con el tiempo, la rapidez y la fatiga, esto no es conveniente para el productor, ya que se pierden ganancias al clasificar las papas en una categoría diferente al que le corresponde y además, llevan tierra en la mayoría de los casos. Dado lo anterior, el objetivo de esta investigación fue diseñar y construir una clasificadora de papas para cuatro tamaños, bajo las condiciones de la zona productora de Tlaxco, Tlaxcala. Esta investigación presenta los siguientes objetivos particulares: determinar las

propiedades físicas de la papa en la variedad Fianna como parámetros para el diseño de detalle; determinar las propiedades mecánicas de la papa en la variedad Fianna; realizar un análisis funcional del sistema para el prototipo considerando las características, etapas, funciones y subfunciones; desarrollar el diseño de detalle, dimensionamiento y modelado 3D en el programa SolidWorks® de la clasificadora de papas; obtener los planos de fabricación y construir el prototipo diseñado.

El presente trabajo está conformado por cuatro capítulos. El capítulo uno presenta la introducción general del proyecto de investigación, compuesto de los antecedentes, problema del estudio y los objetivos. El capítulo dos corresponde a la revisión de literatura referente al problema de investigación. El capítulo tres consta del artículo titulado: “Determination of physical-mechanical characteristics in potatoes (Fianna variety) as parameters for mechanical design”, en donde se presentan los resultados obtenidos de las propiedades físicas y mecánicas de la papa en la variedad Fianna. El capítulo cuatro presenta el segundo artículo titulado: “Diseño y construcción de una clasificadora de papas para pequeños productores”, en donde se presenta el análisis funcional del sistema del prototipo considerando las características, etapas, funciones y subfunciones, el diseño de detalle, dimensionamiento y modelado 3D en el programa SolidWorks, la construcción y la evaluación técnica del prototipo diseñado.

1.1 Referencias

- Abd Elhay, Y. B. (2017). Misr J. Ag. Eng., 34 (3): 1375 - 1388 PROCESS ENGINEERING. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(July), 1375–1388.
- Abedi, G., AbdollaHpour, S., & Bakhtiari, M. R. (2019). The physical and mechanical properties of potato (*Solanum tuberosum* L .) tubers as related to the automatic separation from clods and stones. *Research in Agricultural Engineering*, 2019(3), 77–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.17221/24/2018-RAE>
- Ahangarnezhad, N., Najafi, G., & Jahanbakhshi, A. (2019). Determination of the physical and mechanical properties of a potato (the Agrida variety) in order to mechanise the harvesting and post-harvesting operations. *Research in Agricultural Engineering*, 2019(2), 33–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.17221/122/2017-RAE>
- Alemu, D., Fanta, A., & Getnet, B. (2021). Performance Evaluation of Engine Operated Potato Grader. *Ethiopian Journal of Agricultural Sciences*, 31(2), 61–71.
- Buitrago, G. V., López, A. P., Coronado, A. P., & Osorno, F. L. (2004). Determinacion de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1), 102–110. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662004000100015>
- Fan, Y., Zhao, P., Qiu, L., & Jizhe Zhao, M. S. (2018). The effect of potatoes' compressive mechanical properties under different moisture contents: An experimental study. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 56(3), 165–174.
- Faqeerzada, M. A., Rahman, A., Joshi, R., Park, E., & Cho, B.-K. (2018). Postharvest technologies for fruits and vegetables in South Asian countries: a review. *Agricultural Science Korean Journal of Agricultural Science*, 45(3), 325–353. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180050>

- Huda, M. N., Sarker, M. K. U., & Munnaf, M. A. (2019). Design, fabrication and performance evaluation of drum type potato grader. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(4), 107–114.
- Londhe, D., Nalawade, S., Pawar, G., Atkari, V., & Wandkar, S. (2013). Grader: A review of different methods of grading for fruits and vegetables. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3), 217–230.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials* (Second Rev). Gordon and Breach Science Publishers, Inc.
- Musita, C. N., Okoth, M. W., & Abong, G. O. (2019). Postharvest handling practices and perception of potato safety among potato traders in Nairobi, Kenya. *International Journal of Food Science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2342619>
- Parfitt, J., Barthel, M., & MacNaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Patel, M., Nath, E. A., & Mayani, J. (2018). Evaluation of physical and mechanical properties of fresh potato. *International Journal of Chemical Studies*, 6(5), 1454–1459. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15777.45929>
- Ramos, M. E., Barreiro, P. E., & Macías, I. S. (2010). Daños mecánicos en patata y evaluación mediante productos electrónicos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(1), 18–23.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *¿Qué es la poscosecha y por qué es importante?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-es-la-poscosecha-y-por-que-es-importante>
- Tadesse, B., Bakala, F., & Mariam, L. W. (2018). Assessment of postharvest loss along potato value chain: The case of Sheka Zone, southwest Ethiopia. *Agriculture and Food Security*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10>

Tadesse.1186/s40066-018-0158-4

Valentin, M., Villota, E., Malamug, V., & Agulto, I. (2015). Design, fabrication and performance evaluation of a potato (*solanum tuberosum* L.) grader for village-level operations. *8th AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering, February*.

Widodo, T. W., Pitoyo, J., Anggit, D., & Rahmarestia, E. (2013). Design and development of potato grading machine. *Acta Horticulturae*, 1011, 125–132. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.1011.14>

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen y distribución

Existen discusiones respecto al origen de la papa, pero se estima que fue alrededor de 8000 años atrás, los cazadores y recolectores que habían migrado a Sudamérica comenzaron a domesticar la planta que crecía alrededor del lago Titicaca, a 3,800 metros sobre el nivel del mar (msnm), en la cordillera de los Andes, entre la frontera de Bolivia y Perú (FAO, 2008; Rodríguez, 2010). Por otro lado, Spooner *et al.* (2005) afirmó que la papa se originó a partir de razas nativas andinas y chilenas desarrolladas por agricultores precolombinos, mismas que están incluidas en el grupo *S. brevicaule*. De este grupo nativo, se cree que se originó la primera papa domesticada llamada *S. stenotomum* (Rodríguez, 2010).

En el continente americano hay alrededor de 200 especies de papas silvestres, se localizan desde el Suroeste de los Estados Unidos, México, Centro América, desde Venezuela hasta el noroeste de Argentina y en las tierras bajas de Chile, Uruguay, Paraguay, Argentina y el sureste de Brasil (Bonavia, 1993).

En México se distribuyen 28 especies de papas silvestres (Spooner *et al.*, 2004; Vera *et al.*, 2016) que representan el 14 % de América (Villa & Rodríguez, 2011) y se localizan en todos los estados, con excepción de Baja California, Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán (Villa & Rodríguez, 2010). El mayor número de especies perteneció a *Solanum stoloniferum* con 738 registros; a diferencia de *S. guerreroense* y *S. bulbocastanum* *S. Cardiophyllum*, son las más escasas, se recolectaron en tres ocasiones cada una de ellas (Rodríguez, 2015; Vera *et al.*, 2016). Sin embargo, las variedades cultivadas probablemente fueron introducidas durante la conquista de los españoles en el siglo XVI y hasta el año de 1960, el tubérculo se producía solamente en zonas de temporal, situadas a

más de 2000 msnm, en las zonas volcánicas del centro del país, con una producción anual de 300,000 t y un rendimiento inferior a 6 t ha⁻¹ (FAO, 2008).

2.2 Producción de papa en México

En México, la producción de papa se lleva a cabo en dos regímenes hídricos (riego y temporal) y ocupa el lugar 35 a nivel mundial en producción. En 2019, la cosecha de este tubérculo disminuyó 1.0% como consecuencia de una menor superficie sembrada (1.0%) y por el aumento de 1200 ha siniestradas (SIAP, 2020). El SIAP (2021) reporta la producción en toneladas de los últimos diez años (2010-2020) tal como se aprecia en el Cuadro 1. Además, muestra la superficie sembrada, cosechada, siniestrada (tubérculos afectados por granizada y plagas) y los rendimientos de la papa, incluyendo las variedades sembradas en el país (Alpha “blanca”, Cambray, Criolla, Fianna “blanca” y otras papas sin clasificar), integrando los dos ciclos del año agrícola (otoño-invierno y primavera-verano).

Cuadro 1. Datos del SIAP de la producción de papa en México de los últimos diez años.

Año	Superficie (ha)			Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada		
2010	55,645.63	55,358.63	287.00	1,536,617.37	27.76
2011	69,054.26	54,551.05	14,503.21	1,433,239.14	26.27
2012	68,928.13	67,199.62	1,728.51	1,801,618.31	26.81
2013	62,201.00	60,874.86	1,326.14	1,629,938.04	26.78
2014	61,454.34	61,409.34	45.00	1,678,833.03	27.34
2015	64,031.52	63,637.52	394.00	1,727,345.51	27.14
2016	64,465.55	64,342.05	123.50	1,796,813.76	27.93
2017	59,302.21	59,256.21	46.00	1,715,498.72	28.95
2018	60,334.48	60,304.48	31.00	1,802,591.68	29.89
2019	59,733.20	58,442.20	1,291.00	1,783,895.95	30.52
2020	61,532.44	60,854.74	677.70	1,943,910.46	31.94

Fuente: (SIAP, 2021)

De acuerdo con SIAP (2021), existen dos periodos de tiempo con mayor producción nacional del tubérculo: febrero-abril (32.49 % de producción mensual) y octubre-noviembre (22.71 %) (Cuadro 2). El 29 % de la papa producida en México, es destinada a la industria (SIAP, 2020), 56 % para consumo en fresco y 15 % para semilla (Salvador *et al.*, 2020).

Cuadro 2. Porcentaje de producción mensual de papa a nivel nacional del año 2020.

Mes	Producción (t)	Producción (%)
Enero	110,820	6.09
Febrero	188,262	10.35
Marzo	201,157	11.06
Abril	201,553	11.08
Mayo	111,925	6.16
Junio	74,461	4.10
Julio	71,912	3.95
Agosto	120,430	6.62
Septiembre	172,598	9.49
Octubre	205,721	11.31
Noviembre	207,338	11.40
Diciembre	152,161	8.37

Fuente:(SIAP, 2021)

En el Cuadro 3, se muestra la superficie de papa sembrada, cosechada y siniestrada de las diez entidades federativas con mayor volumen de producción en el año 2020. Estos datos incluyen todas las variedades sembradas en el país, considerando los regímenes hídricos (riego y temporal) y el año agrícola (otoño-inverno y primavera-verano). Siendo Sonora, la entidad con mayor superficie sembrada y mayor producción, con 26.02 % del volumen nacional, por otra parte, Zacatecas ocupó el décimo lugar, pero obtuvo el rendimiento más alto con 45 t ha⁻¹.

Cuadro 3. Entidades con mayor volumen de producción de papa en 2020.

Entidad	Superficie (ha)			Producción (t)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada	
Sonora	14,158.21	14,148.21	10	505,907.00
Sinaloa	13,249.52	13,249.52	0	462,094.41
Veracruz	8,007.65	8,007.65	0	227,870.98
Puebla	6,014.29	6,014.29	0	143,134.85
México	5,615.21	5,615.21	0	168,883.25
Nuevo León	3,141.00	2,821.00	320	109,502.00
Baja California Sur	2,250.00	2,250.00	0	67,597.50
Jalisco	1,855.05	1,855.05	0	56,380.91
Chihuahua	1,521.10	1,173.40	347.7	41,889.41
Zacatecas	870	870	0	39,251.00

Fuente: (SIAP, 2021)

De acuerdo con Luque (2012), las variedades de papa cultivadas para consumo humano se clasifican en tres grupos de acuerdo al color y tipo de cáscara: 1) color rosado, 2) cáscara lisa “blanca o amarilla” y 3) color rojo. En México, se producen solamente los dos primeros. Las papas de color rosado se producen comúnmente en las zonas de temporal que comprenden los estados de Puebla, Estado de México, Hidalgo, Veracruz y Tlaxcala. Las papas de cáscara lisa y color blanco o amarillo se siembra con más frecuencia y se destina para consumo fresco y uso industrial. Los estados productores son: Sinaloa, Nuevo León, Sonora, Guanajuato, Coahuila, Chihuahua, Estado de México, Puebla, entre otros.

Rubio (2016) presentó las principales variedades en México (Cuadro 4), y la variedad Fianna es la más sembrada, Millán *et al.* (2018) reportaron que la papa

Fianna es un producto muy común en el mercado en fresco y de uso industrial, esto podría deberse a la preferencia del consumidor porque esta variedad tiene la piel delgada que se desprende fácilmente al hervirlo y no presenta manchas al freírse. El SIAP (2021) reportó que solo Chihuahua y Puebla produjeron variedad Fianna durante el año agrícola 2020, con un total de 1,462.41 ha cosechadas.

Cuadro 4. Principales variedades de papa sembradas en México.

Variedad	% superficie
Fianna	40
Alpha	10
Gigant	10
Atlantic	10
Mexicanas: Tollocan, Rosita, Yema, San José, Marciana y Malinche	3
Otras: Caesar, Mondial, Vivaldi, Fabula, Felsina, Elfe, Agata, Adora, Snowden, Hertha, Escort y Timate	27

Fuente: (Rubio, 2016)

2.3 Cosecha de papa

Esta labor se lleva a cabo entre los 90 y 120 días después de la siembra, se define por los días del ciclo vegetativo según sea la variedad (precoz, intermedia o tardía) o bien cuando el follaje del tubérculo empieza a tomar un color amarillo y las hojas comienzan a caerse (Luque, 2012; Román & Hurtado, 2002). Algunas veces es necesario realizar la cosecha del producto aun cuando el follaje está verde ya que las condiciones de los precios (altos y benéficos para el productor) del mercado así lo imponen (Huarte & Capecio, 2016).

Román & Hurtado (2002) recomendaron que el follaje sea cortado 10 días antes de la cosecha, para que el peridermis de los tubérculos sea resistente y se eviten daños mecánicos, porque son la vía principal de enfermedades, así mismo acelerar su madurez y la acumulación de materia seca (condición importante en la calidad del producto). Luque (2012) recomendó que el follaje sea cortado o

quemado con herbicidas (Gramoxone o Paraquat) entre 15 y 20 días antes de la cosecha, dependiendo del mercado (en su mayoría para pequeños productores que no cuentan con distribuidores) y el destino de la producción. Es necesario realizar muestreos de tubérculos, desenterrándolos y después de ser frotados con la mano no deben pelarse. Esos mismos tubérculos se pueden llevar con el distribuidor para la detección de enfermedades. Inostroza *et al.* (2017) recomendaron de tres a cuatro semanas posterior a la aplicación de herbicida para los tubérculos destinados para semilla.

La cosecha de la papa puede ser manual o mecanizada o una combinación de ambas según sea la región y el área a cosechar; la cosecha manual suele ser más costosa que la mecanizada porque requiere de mano de obra y la mecanizada es más barata cuando se tienen altos rendimientos y optimizan el tiempo, pero el producto algunas veces es propenso a daños mecánicos (Inostroza *et al.*, 2017; López, 2003). En la manipulación de tubérculos se pueden identificar tres causas principales de lesiones: 1) impacto del fruto con una superficie dura, 2) compresión debido a la deformación por presión o aplastamiento durante el transporte o almacenamiento, 3) abrasión por el roce de los tubérculos entre sí o con las paredes de la caja o costal (López, 2003).

2.4 Importancia de las propiedades físico-mecánicas de la papa

El mercado exige que la papa cumpla con parámetros y procedimientos para la calificación de la calidad mínima del tubérculo, para su comercialización en fresco y uso industrial (Secretaría de Economía, 2002). Vázquez *et al.* (2012) destacó que las características de mayor importancia son: tamaño, forma y uniformidad del tubérculo, profundidad de las yemas, sin defectos físicos o enfermedades, presencia del corazón hueco, contenido de materia seca y contenido de azúcares reductores. Mientras que la Norma Mexicana vigente (Secretaría de Economía, 2002) destacó las especificaciones que deben cumplir y se verifican sensorialmente: papas enteras, consistencia firme, de forma y color característicos de la variedad. Así mismo deben estar exentas de plagas y enfermedades, podredumbre, materia extraña visible, humedad exterior anormal,

olor y sabor (interno externo) extraño. Otros puntos a considerar son daños por frío, brotes germinativos y que presente un desarrollo y grado de madurez suficiente para permitir su transporte, manejo y llegada al destino, cumpliendo así mismo con los requisitos mínimos establecidos en la Norma Oficial fitosanitaria (SAGARPA, 2003) para su movilización.

Por lo anterior, la calidad de los tubérculos para su comercialización está en función de sus propiedades físico-mecánicas. Estas deben conocerse para su manejo durante la cosecha, limpieza, clasificación y almacenamiento postcosecha. Sus características cualitativas y cuantitativas deben mantenerse a través de tecnología adecuada, creada a partir de dichas propiedades bajo diferentes condiciones de clima, temperatura, entre otras (Abd Elhay, 2017; Ahangarnezhad *et al.*, 2019; Buitrago *et al.*, 2004).

Existen investigaciones sobre el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las papas en distintas variedades (Cuadro 5) y bajo diferentes condiciones, los autores estudiaron propiedades según el objetivo de la investigación. El 53 % de estos autores se basan en el autor Mohsenin (1986), quien contribuyó con un manual en el cual explica la base de los procedimientos para la determinación de las propiedades en plantas y animales.

Cuadro 5. Propiedades físico-mecánicas con diferentes variedades de algunas investigaciones realizadas.

Variedades	Propiedades físicas	Propiedades mecánicas	Autor
Criolla, Parda Pastusa y Capiro	A, B, C, H, I, J, K y Ñ	b, c, d y e	(Buitrago <i>et al.</i> , 2004)
Agria	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, L, M y N	d	(Ahangarnezhad <i>et al.</i> , 2019)
Marfona y Sante	A, B, C, D, E, F, G, H, J, L, M y N	b	(Abedi <i>et al.</i> , 2019)

Continuación del Cuadro 5.

Astrix, Diamont y Santana	A, B, C, D, E, F, G, H y J	a y b	(Abd Elhay, 2017)
Cardinal, Chipsona, Desiree, Lady Rosetta y Satellite	D, J y M	e	(Abbasi <i>et al.</i> , 2019)
Jelly, Milva y Sante	A, B, C, D, G, H, J y M	b	(Altuntas <i>et al.</i> , 2013)
Diamont y Santana	A, B, C, F, G, H, J, M y Ñ	b y e	(Gamea <i>et al.</i> , 2009)
Kufri Badshah	A, B, C, D, F, G, H, I, J, K	b y d	(Patel <i>et al.</i> , 2018)
Vital, Draga, Agria y Ajacks	A, B, C, D, F, G y J		(Tabatabaeefar, 2002)
Agria, Marabel, Marfona y Sante	A, B, C, D, F, G, J, M y Ñ	b y c	(Yurtlu <i>et al.</i> , 2011)
Diamant, Nicola y Lady Rosetta	A, B, C, F, G y H	b, d y e	(Ibrahim & El-heilaly, 2011)
Favorita, Netherland 15#, Zaodabai, Youjin y Fujin		d	(Fan <i>et al.</i> , 2018)
Spunta	A, B, C, F y G		(Al-Hamed <i>et al.</i> , 2018)
Lady Rosetta	A, B, C, I y J	f	(Rady <i>et al.</i> , 2017)
Agria, Atlantic, Courage, Desi, Hermes y Lady Rosetta	D, J y M	e	(Abbasi <i>et al.</i> , 2011)

Propiedades físicas: A - longitud, B - ancho, C - grosor, D - diámetro medio geométrico, E - diámetro medio aritmético, F - masa, G - volumen, H - densidad real, I - densidad aparente, J - esfericidad, K- porosidad, L - relación de aspecto, M - área de superficie, N - área proyectada y Ñ - ángulo de reposo. **Propiedades mecánicas:** a - ángulo de rodadura, b - coeficiente de fricción estático, c - coeficiente de fricción dinámico, d - compresión axial, e - firmeza y f - coeficiente de restitución.

No se encontraron datos de las propiedades físico-mecánicas de la variedad Fianna, por ello, es necesario realizar un estudio de esta variedad que sirvan como referencia para el diseño, rediseño de equipos para la cosecha y postcosecha del tubérculo.

2.5 Tipos de clasificadoras y limpiadoras de papas

Después de la cosecha de papas, algunos productores en México contratan mano de obra para la recolección y selección de las papas directamente en campo para venderlas al distribuidor.

El desarrollo de estas máquinas comenzó hace cinco décadas con el fin de sustituir la clasificación de frutos manualmente porque requiere más tiempo respecto a una máquina y es costosa (Londhe *et al.*, 2013). Por otro lado, Hameed *et al.* (2018) afirmó que actualmente existen técnicas de clasificación de frutos a través de visión por computadora, pero aun es complejo por las características irregulares y el estado actual de la técnica se ha desarrollado para clases limitadas y pequeños conjuntos de datos. Por otro lado, Beyaz & Gerdan (2020) desarrollaron un sistema en LabVIEW a través de sensores ultrasónicos para la clasificación de este tubérculo.

En el mundo existen diferentes equipos para clasificar tubérculos bajo diferentes principios, las más comunes se basan según su tamaño y peso.

Los siguientes autores realizaron investigaciones de clasificadoras tipo hélice. Farhadi *et al.* (2012a, 2012b) desarrollaron un prototipo clasificador estacionario de papa por tamaño compuesta de hélices rotatorias con pendiente de 20° a 9 rev min⁻¹ con capacidad de 0.1094 kg s⁻¹, la graduación de las separaciones de dichas hélices se basaron en semillas de papa con rango de 50-80 g, el sistema requiere de un torque de 75 N m y una potencia de 71, obtuvieron una precisión de 70.45 % y 67.05 % para las variedades Marfona y Agria respectivamente y menos de 5 % de papas dañadas. Valentin *et al.* (2015, 2016) desarrollaron y evaluaron una clasificadora de tubérculos tipo hélice a una velocidad de rotación de 15 rev min⁻¹ y una inclinación de 10°, el equipo clasifica tres tamaños de papa

(pequeño, mediano y grande), tiene un rendimiento de 883.16 kg h⁻¹, una eficiencia de 92.56 % con menos del 1.83 % de papas dañadas y un consumo de 11.3 W h.

De igual forma, existen prototipos con el principio de tambor rotatorio, Huda *et al.* (2019) desarrollaron un prototipo de clasificación de papas para productores de pequeña escala, el cual se compone de un tambor con orificios e inclinación de 3° por donde pasan los tubérculos. El equipo funciona a 6 rev min⁻¹, clasifica tres tamaños de tubérculos con una eficiencia del 91.57 % y menos del 1.17 % de papas dañadas, el prototipo tiene una capacidad del 420.10 kg h⁻¹ y consume 9.30 W h. Alemu *et al.* (2021) desarrollaron un equipo estacionario para clasificar papas por tamaños (chico, mediano y grande) para pequeños y medianos productores que funciona con un sistema de cilindro rotatorio con inclinación, obtuvieron un rendimiento de 30 kg min⁻¹ y una eficiencia del 97.67 %.

Widodo *et al.* (2013) desarrollaron una máquina clasificadora para cuatro tamaños de clasificación de acuerdo con los estándares de Indonesia. El equipo consiste en una banda transportadora de rodillos separados entre sí, que gira a una velocidad de 0.3 m s⁻¹, y utiliza dos motores eléctricos de 1 Hp y 2 Hp. La productividad del equipo es de 1800 kg h⁻¹, las papas dañadas son menos del 1 % y reduce en 43 % los costos económicos comparado con 25 personas que seleccionan manualmente 15 t ha⁻¹ de papa durante un día. Ghanbarian *et al.* (2010) diseñaron y desarrollaron una máquina clasificadora de papas usando red de capron (policaprolactama o Nylon 6). La máquina clasifica papas en tres tamaños, requiere de 368 W y tiene una productividad 2500 kg h⁻¹ en condiciones óptimas comparado con una persona que selecciona 125 kg h⁻¹, la operación de la máquina necesita cuatro personas alimentado con un motor eléctrico de 368 W, tiene una eficiencia del 70 % en la clasificación, con 5.5 % de papas dañadas. Villota & Pantoja (2018) diseñaron y construyeron un prototipo para clasificar y lavar papa para pequeños productores, requiere de un motor de 0.5 Hp, clasifica tres tamaños diferentes (chica, mediana y grande) bajo el principio de rodillos (uno liso y otro con espiral) que se abren a lo largo.

Torres *et al.* (2021) desarrollaron un modelo para la regulación de una clasificadora compuesta de una banda inclinada siendo versátil para diferentes productos agrícolas, las ecuaciones obtenidas son principalmente para tubérculos de papas.

Además de las investigaciones realizadas, existen patentes de limpiadoras y clasificadoras de tubérculos, algunas de ellas se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Patentes de clasificadoras y limpiadoras existentes en el mundo.

Número de patente	Tipo de limpiadora y clasificadora	Número de tamaños de clasificación	Fecha	Inventor
5,860,533	Móvil para campo, separa los tubérculos de piedras y tierra		19-01-1991	(James, 1999)
1,828,066	Estacionario, solo selecciona por medio de rodillos rotatorios	Cuatro tamaños	20-10-1931	(Paulson, 1931)
3,004,663	Estacionario	Ajustable según se requiera	27-02-1945	(Hodecker, 1945)
4,184,598	Estacionario	-	22-01-1980	(Cowlin <i>et al.</i> , 1990)
1,528,502	Móvil para campo	No especifica	03-03-1925	(Murphy, 1925)
US 8,499,938 B2	Móvil para campo, Cuenta con sistema de limpieza de piedras y terrones	No clasifica en tamaños, solo limpia	06-08-2013	(Nyborg & Geyer, 2013)
CN 204448598 U	Estacionario con cambio de sitio fácil, Sistema de limpieza con rodillos y sistema de clasificación	Cuatro tamaños	08-07-2015	(Xie <i>et al.</i> , 2015)

Continuación del Cuadro 6.

CN 210094595 U	Estacionario. Limpia tubérculos en seco con cepillos rotatorios	-	21-02-2020	(Zhu <i>et al.</i> , 2020)
CN 203762247 U	Estacionario. Limpia tubérculos en seco con cepillos rotatorios	-	13-08-2014	(Jia <i>et al.</i> , 2014)
CN 203378533 U	Estacionario. Limpia tubérculos con sinfín y cepillos rotatorios	-	08-01-2014	(Liu <i>et al.</i> , 2014)

2.6 Referencias

- Abbasi, Kashif S., Masud, T., Gulfraz, M., Ali, S., & Imran, M. (2011). Physico-chemical, functional and processing attributes of some potato varieties grown in Pakistan. *African Journal of Biotechnology*, 10(84), 19570–19579. <https://doi.org/10.5897/AJB11.566>
- Abbasi, Kashif Sarfraz, Qayyum, A., Mehmood, A., Mahmood, T., Khan, S. U., Liaquat, M., Sohail, A., & Ahmad, A. (2019). Analysis of selective potato varieties and their functional assessment. *Food Science and Technology*, 39(2), 308–314. <https://doi.org/10.1590/fst.26217>
- Abd Elhay, Y. B. (2017). Misr J. Ag. Eng., 34 (3): 1375 - 1388 PROCESS ENGINEERING. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(July), 1375–1388.
- Abedi, G., Abdollahpour, S., & Bakhtiari, M. R. (2019). The physical and mechanical properties of potato (*Solanum tuberosum* L .) tubers as related to the automatic separation from clods and stones. *Research in Agricultural Engineering*, 2019(3), 77–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.17221/24/2018-RAE>
- Ahangarnezhad, N., Najafi, G., & Jahanbakhshi, A. (2019). Determination of the physical and mechanical properties of a potato (the Agria variety) in order to mechanise the harvesting and post-harvesting operations. *Research in Agricultural Engineering*, 2019(2), 33–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.17221/122/2017-RAE>
- Al-Hamed, S. A., Wahby, M. F., Aboukarima, A. M., Ahmed, K. A., Mohamed, & Marazky, S. El. (2018). Effect of primary tillage implements on physical properties of harvested Spunta potato tubers. *Current Science*, 114(10), 2142–2146. <https://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2142-2146>
- Alemu, D., Fanta, A., & Getnet, B. (2021). Performance Evaluation of Engine Operated Potato Grader. *Ethiopian Journal of Agricultural Sciences*, 31(2), 61–71.

- Altuntas, E., Yilmaz, G., Karan, Y. B., & Dulger, E. (2013). Assessment of the physico-mechanical, chemical and colour characteristics of potatoes depending on tuber size and cultivar. *International Journal of Food Engineering*, 9(4), 487–497. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2012-0212>
- Beyaz, A., & Gerdan, D. (2020). Potato classification by using ultrasonic sensor with labview. *Agricultural Science Digest*, 40(4), 376–381. <https://doi.org/10.18805/ag.D-173>
- Bonavia, D. (1993). La papa: apuntes sobre sus orígenes y su domesticación. *Journal de La Société Des Américanistes*, 79(1993), 173–187. <http://www.jstor.org/stable/24605665>
- Buitrago, G. V., López, A. P., Coronado, A. P., & Osorno, F. L. (2004). Determinacion de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1), 102–110. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662004000100015>
- Cowlin, R., Long, P., Sapsed, L., & Steward, J. (1990). *Manually operated position detector for a conveyor article sorter* (Patent No. 4,184,598). <https://patents.google.com/patent/US4184598>
- Fan, Y., Zhao, P., Qiu, L., & Jizhe Zhao, M. S. (2018). The effect of potatoes' compressive mechanical properties under different moisture contents: An experimental study. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 56(3), 165–174.
- FAO. (2008). *Año Internacional de la Papa*. FAO. <http://www.fao.org/potato-2008/es/index.html>
- Farhadi, R., Sakenian, N., & Azizi, P. (2012a). Design and construction of rotary potato grader (part I). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(2), 304–314.
- Farhadi, R., Sakenian, N., & Azizi, P. (2012b). Rotary potato grader optimization. Part II. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(6), 987–990.

- Gamea, G. R., Abd El-Maksoud, M. A., & Abd El-Gawad, A. M. (2009). Physical Characteristics and Chemical Properties of Potato Tubers Under Different Storage Systems. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 26(1), 385–408. <https://doi.org/10.21608/mjae.2020.110155>
- Ghanbarian, D., Kolchin, N. N., Hasan Beigi, S. R., & Ebrahimi, R. (2010). Design and development of a small potato-grading machine using capron net. *Journal of Food Process Engineering*, 33(6), 1148–1158. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00331.x>
- Hameed, K., Chai, D., & Rassau, A. (2018). A comprehensive review of fruit and vegetable classification techniques. *Image and Vision Computing*, 80(September), 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2018.09.016>
- Hodecker, F. (1945). *Grader or sizer* (Patent No. 2,370,539). <https://patents.google.com/patent/US2370539A/en>
- Huarte, M. A., & Capecio, S. (2016). Cultivo de Papa Cultivo de Papa. In *Cultivo de papa* (Vol. 1, Issue August 2013, p. 2). https://www.researchgate.net/publication/256195293_Cultivo_de_papa
- Huda, M. N., Sarker, M. K. U., & Munnaf, M. A. (2019). Design, fabrication and performance evaluation of drum type potato grader. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(4), 107–114.
- Ibrahim, M. M., & El-heilaly, M. A. (2011). Effect of Gibberellic Acid (GA 3) on the Physical and Mechanical Properties for Some Potato Varieties. *Creating a Competitive Edge through Agricultural Mechanization and Post-Harvest Technology in Developing Countries. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life, Valencia, Spain, 8-, March*, 1–6.
- Inostroza, J., Méndez, P., Espinoza, N., Acuña, I., Navarro, P., Cisternas, E., & Larraín, P. (2017). Manual Del Cultivo De La Papa En Chile. In *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)*. (Issue 10).

- James, W. P. (1999). *Grader* (Patent No. 5,860,533). <https://patents.google.com/patent/US5860533A/en>
- Jia, W., Feng, C., & Zhou, J. (2014). *Dry cleaning machine for potatoes* (Patent No. CN 203762247 U). <https://patents.google.com/patent/CN203762247U/en?q=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&oq=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&page=3>
- Liu, F., Yin, X., Xu, Z., & Yang, Y. (2014). *Cleaning machine for tuber materials* (Patent No. CN 203378533 U). <https://patents.google.com/patent/CN203378533U/en?q=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&oq=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&page=2>
- Londhe, D., Nalawade, S., Pawar, G., Atkari, V., & Wandkar, S. (2013). Grader: A review of different methods of grading for fruits and vegetables. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3), 217–230.
- López, C. A. F. (2003). *Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas (Del campo al mercado)*. Boletín de Servicios Agrícolas N° 151. FAO. <http://www.fao.org/3/y4893s/y4893s00.htm#Contents>
- Luque, S. E. de J. (2012). Nuevas variedades de papa en el norte de Sinaloa. In *Nuevas variedades de papa en el norte de Sinaloa*. <http://docplayer.es/9820387-Nuevas-variedades-de-papa-en-el-norte-de-sinaloa.html>
- Millán, L. N. T., Zazueta, B. H. G., Díaz, V. T., & Fragoza, S. U. (2018). Estrategias innovadoras de producción y comercialización de papa en el noroeste de México. *Cofín Habana*, 12(1), 256–267.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials* (Second Rev). Gordon and Breach Science Publishers, Inc.
- Murphy, E. R. (1925). *Machine for digging, sorting, and delivering potatoes* (Patent

- No. 1,528,502). <https://patents.google.com/patent/US1528502A/en>
- Nyborg, B. D., & Geyer, W. C. (2013). *Cleaning and Separation System For Tubers*. <https://patents.google.com/patent/US8499938B2/en>
- Patel, M., Nath, E. A., & Mayani, J. (2018). Evaluation of physical and mechanical properties of fresh potato. *International Journal of Chemical Studies*, 6(5), 1454–1459. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15777.45929>
- Paulson, J. E. (1931). *Potato grader* (Patent No. 1,828,066). <https://patents.google.com/patent/US1828066A/en>
- Rady, A. M., Soliman, S. N., & El-Wersh, A. (2017). Effect of mechanical treatments on creep behavior of potato tubers. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 10(4), 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2017.06.001>
- Rodríguez, A. (2015). Riqueza de papas silvestres (*Solanum* sección Petota) y patrones de distribución geográfica en México. *Agroproductividad*, 8(1), 3–8. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=101102825&site=ehost-live>
- Rodríguez, L. E. (2010). Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 9–17.
- Román, M., & Hurtado, G. (2002). Cultivo de la Papa. In *Centro Nacional De Tecnología Agropecuaria y Forestal*.
- Rubio, C. O. (2016). *Situación del cultivo de la papa en México*. http://www.abbabatabrasileira.com.br/site/wp-content/uploads/2016/06/2-mexico_oswaldo2.pdf
- SAGARPA. (2003). *NORMA Oficial Mexicana NOM-040-FITO-2002, Requisitos y especificaciones para la producción y movilización nacional de papa comercial*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=705135
- Salvador, P., Gómez, D., Sanz, J., & Casanova, J. L. (2020). Estimation of potato yield using satellite data at a municipal level: A machine learning approach.

ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(6), 343–356.
<https://doi.org/10.3390/ijgi9060343>

Secretaría de Economía. (2002). *Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Tubérculo. Papa (Solanum tuberosum L.). Especificaciones y método de prueba. Normas mexicanas. Dirección general de normas. NMX-FF-022-SCFI-2002.* (2002nd ed., pp. 1–9).
https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_C107_NMX-FF-022-SCFI-2002_R0_9AGO2002.pdf

SIAP. (2020). *Panorama Agroalimentario 2020* (S. de I. A. y Pesquera (Ed.); Edición, 2).
https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020

SIAP. (2021). *Cierre de la producción agrícola.*
<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Spooner, D. M., Berg, R. G. van den, Rodríguez, A., Bamberg, J., Hijmans, R. J., & Cabrera, S. I. L. (2004). Wild Potatoes (Solanum section Petota; Solanaceae) of North and Central America. *Systematic Botany Monographs*, 68, 1–209.
<https://doi.org/10.2307/25027915>

Spooner, D. M., McLean, K., Ramsay, G., Waugh, R., & Bryan, G. J. (2005). A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(41), 14694–14699.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0507400102>

Tabatabaeefar, A. (2002). Size and shape of potato tubers. *International Agrophysics*, 16(4), 301–305.

Torres, C. R., Martínez, R. A., & Rosario, A. (2021). Model and Software for the Regulation of an Inclined Belt Sorter for Agricultural Products Modelo y software para la regulación de una clasificadora de banda inclinada para productos agrícolas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(1), 102–

112.

- Valentin, M., Villota, E., Malamug, V., & Agulto, I. (2015). Design, fabrication and performance evaluation of a potato (*solanum tuberosum* L.) grader for village-level operations. *8th AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering, February*.
- Valentin, M., Villota, E., Malamug, V., & Agulto, I. (2016). Evaluation of a Helix Type Potato Grader. *CLSU International Journal of Science & Technology*, 1(1). <https://doi.org/10.22137/ijst.2016.v1n1.05>
- Vázquez, C. M. G., Rubio, C. O. Á., Salinas, M. Y., & Santiago, R. D. (2012). *Usos alternativos de la papa en el Estado de México* (No. 15, Issue 15). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Vera, S. K. S., Cadena, I. J., Latournerie, M. L., Santiaguillo, H. J. F., Rodríguez, C. A., Basurto, P. F. A., & Ríos, S. E. (2016). *Conservación y utilización sostenible de las Hortalizas Nativas de México*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas.
- Villa, V. J. L., & Rodríguez, A. (2010). Report on the cultivation of Mexican wild potato species [*Solanum cardiophyllum* Lindl., *S. ehrenbergii* (Bitter) Rydb. y *S. stoloniferum* Schlttdl.] in jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 85–88.
- Villa, V. J. L., & Rodríguez, C. A. (2011). Cultivo de papas silvestres *Solanum cardiophyllum* y *S. ehrenbergii* en San Ignacio, municipio de Villa Hidalgo, Jalisco, México. *Revista de Geografía Agrícola*, 46–47, 19–27.
- Villota, R. J. A., & Pantoja, M. M. A. (2020). *Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Máquina Cosechadora De Papa En El Municipio De Yacuanquer* [Doctoral dissertation, AUNAR]. <http://repositorio.aunar.edu.co:8080/xmlui/handle/20.500.12276/531>
- Widodo, T. W., Pitoyo, J., Anggit, D., & Rahmarestia, E. (2013). Design and development of potato grading machine. *Acta Horticulturae*, 1011, 125–132.

<https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.1011.14>

Xie, J., Wang, J., Zhang, H., Shi, L., Li, H., Zhang, R., Li, R., Zhao, Z., Li, D., & Xin, K. (2015). *A kind of packaged type potato automatic classification sack filling machine* (Patent No. CN 204448598 U). <https://patents.google.com/patent/CN204448598U/en?q=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&oq=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato>

Yurtlu, Y. B., Yeşiloğlu, E., Vursavuş, K. K., & Saçılık, K. (2011). Coefficient of friction of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers in different surfaces. *Journal of Adnan Menderes University, Agricultural Faculty*, 8(2), 35–40.

Zhu, Z., Gan, X., & Sun, D. (2020). *Dry cleaning machine with roller brushes* (Patent No. CN 210094595 U). <https://patents.google.com/patent/CN210094595U/en?q=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&oq=Rotating+brush+cleaning+system+for+potato&page=2>

3 ARTICLE 1: DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS IN POTATOES (FIANNA VARIETY) AS PARAMETERS FOR MECHANICAL DESIGN

El artículo se enfocó en determinar las propiedades físico-mecánicas de la papa en la variedad Fianna. Las propiedades físicas determinadas fueron: diámetro polar, diámetro ecuatorial, grosor, diámetro medio geométrico, diámetro aritmético, esfericidad, área de superficie, peso, volumen y densidad. Las propiedades mecánicas determinadas fueron: coeficiente de fricción estático, ángulo de rodadura, pruebas de compresión axial (carga de compresión, deformación, porcentaje de deformación y módulo de Young) y pruebas de impacto y firmeza. Los resultados mostraron que las propiedades físicas evaluadas decrecen a medida que el tamaño del tubérculo disminuye con excepción de la esfericidad; en las pruebas mecánicas mostraron que el coeficiente de fricción estático incrementa mientras el tamaño de la papa disminuye, con el ángulo de rodadura ocurrió lo contrario y en la compresión axial mostraron un decremento del grupo S1 al grupo S4, con excepción del módulo de Young cuyo valor estuvo comprendido desde 1.306 a 3.697 MPa en los cuatro grupos. El artículo fue enviado a una revista internacional.

Determination of physical-mechanical characteristics in potatoes (Fianna variety) as parameters for mechanical design

Gaudencio Grande¹, Martín Hidalgo^{2*}, Pedro Cruz², Federico Hahn³

1. Chapingo Autonomous University, km 38.5 Mexico-Texcoco Street, Mexico. Graduate Program of Agricultural Engineering and Integral Use of Water.
2. Chapingo Autonomous University, km 38.5 Mexico-Texcoco Street, Mexico. Agricultural Mechanical Engineering Department.
3. Chapingo Autonomous University, km 38.5 Mexico-Texcoco Street, Mexico. Irrigation Engineering Department.

Abstract: Potatoes are one of the most important agricultural products due to their great nutritional and industrial value. However, the mechanization of this crop is low in many countries. The main aim of this investigation was to characterize the Fianna potato variety. The potatoes were characterized morphologically (polar diameter, equatorial diameter, thickness, geometric diameter, arithmetic diameter, sphericity, and weight), mechanically (static friction coefficient, rolling angle, and axial compression), and by impact and firmness tests. The sample potatoes were distributed into four groups (S1, S2, S3, and S4) according to their size. A random complete blocks design was used to determine the mean values of their characteristics. The results of the physical characteristics showed a higher coefficient of variation in the S1 group. All values tended to decrease except sphericity. The results of the mechanical tests show that the coefficient of static friction increases as the size of the potato decreases, while the relationship of the rolling angle was the opposite. The axial compression results showed values that decreased from Group S1 to Group S4 except for Young's modulus, which ranged from 1,306 to 3,697 MPa in the four groups. Determining these data is necessary because they represent design parameters useful for the development of mechanical equipment.

Keywords: Characterization, coefficient of friction, design parameters, rolling angle, Young modulus.

1 Introduction

Potato (*Solanum tuberosum* L.) is the fourth-largest production crop in the world, only after rice, wheat, and corn. China ranks first in production, close to a quarter of the world volume (SIAP, 2019). In Mexico, potato production oscillates around approximately 1.8 million tons annually; Sonora State has the highest production (26% of the national volume), and the country's per capita consumption is 15.1 kg (SIAP, 2020).

Around the world, potatoes are harvested mechanically, manually or by a combination of both, depending on the target market (fresh consumption or processed), the land area to harvest (López, 2003), and the availability and access to adequate technology in place. Currently, small-farmland producers are opting for mechanical harvesting to increase their profits. According to Mejia and Castellanos (2018), a producer who uses agricultural

machinery obtains at least double the profits compared with a producer who uses low or scarce mechanization. The purpose of the design of machines is to create elements that are used daily in different spheres of production to benefit the producer; therefore, the characterization of the potatoes is important, and it is necessary to establish design parameters to create technology appropriate to the conditions of a place of production. Knowing the physical-mechanical characteristics of potatoes helps to generate adequate technology capable of performing tasks that satisfy specific needs in production processes, providing the best quality conditions and generating economic benefits. Considering that the market requires potato minimum characteristics of quality, potatoes selected for size and quality do not affect their physical appearance and internal tissue for consumption (NMX-FF-022-2002).

During potatoes' postharvest, it is necessary to comply with minimum quality specifications in relation to the percentage of defects present on its surface (Quality: A with 0–5%, B with 6–15%, and C with 16%–25%). According to the current Mexican Norm, NMX-FF-022-2002, the three categories are described according to their weight, equatorial diameter, and color. For the commercialization of potatoes, the quality of the tubers depends on their physical and mechanical characteristics, which must be known for their handling during harvesting, cleaning, classification, and storage, maintaining their quality and quantitative characteristics (Buitrago et al., 2004; Abd Elhay, 2017; Ahangarnezhad et al., 2019).

There are previous investigative works about the physical and mechanical characteristics of different varieties of potato tubers: Spunta (Al-Hamed et al., 2018); Kufri Badshah (Patel et al., 2018); Agria (Ahangarnezhad et al., 2019), Marfona and Sante (Abedi et al., 2019), and Cardinal, Chipsona, Desiree, Lady Rosetta, and Satellite (Abbasi et al., 2019). Vázquez et al. (2012) mentioned that in Mexico, a variety of white-colored potatoes (Fianna, Alpha, Gigant, Mondial, Atlantic, among others) are allocated for fresh consumption markets and industrial use (SIAP, 2020); however, information on the properties of the Fianna variety is scarce, and no studies have characterized the physical-mechanical properties of the Fianna variety to obtain data that support the design of harvest and postharvest machines.

The main aim of this study was to determine the physical and mechanical properties of the Fianna potato variety, such as axial dimensions (length, width, and thickness), geometric mean diameter, arithmetic diameter, sphericity, surface area, weight, volume, density, static friction coefficient, rolling angle, impact, firmness tests, and axial compression. The obtained data will be used as a design parameter for future technological developments in the potato postharvest process.

2 Materials and methods

Potato tubers of the Fianna variety were collected in the field in the Profesor Graciano Sánchez area, which belongs to the municipality of Tlaxco, Tlaxcala, Mexico (19°43'08.1" N, 98°18'12.0" W). The tubers are seasonal and grown during the June–October cycle in 2020. They were harvested manually and transported in eight plastic boxes to avoid mechanical damage.

2.1 Experimental design

The potatoes were distributed into four groups (S1, S2, S3 and S4) according to their size (the width of the potato), based on the Mexican Norm NMX-FF-022-2002, which for each group is S1 (66–75 mm), S2 (56–65 mm), S3 (51–55 mm) and S4 (44–50 mm). The sample size in each group was 220 potatoes, randomly chosen. The applied experimental design was that of random complete blocks.

2.2 Determination of physical characteristics

Three perpendicular axial measurements were established as shown in Figure 1: length (the longest tuber diameter or polar diameter), width (median diameter or equatorial diameter), and thickness (small diameter or thickness) of the potato tubers were measured with a digital Insize Vernier caliper (0–300 mm - series 1114 - Germany) with a 0.01 mm resolution.

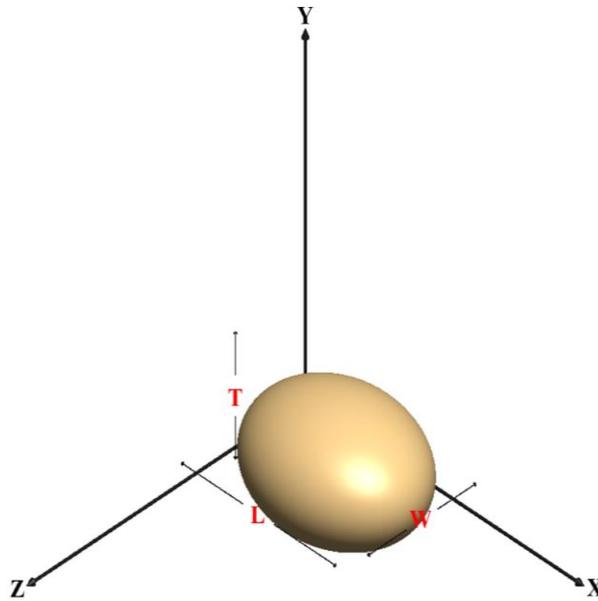


Figure 1 Axial dimensions of the potato tuber

The geometric mean diameter (D_g , mm), arithmetic diameter (D_a , mm), sphericity (ϕ , %), and surface area (S_a , mm²) were calculated with Equations (1) to (4) (Mohsenin, 1986; El-Raie et al., 1996; Goyal et al., 2007):

$$D_g = (L * W * T)^{1/3} \quad (1)$$

$$D_a = \frac{(L + W + T)}{3} \quad (2)$$

$$\phi = \left(\frac{D_g}{L}\right) * 100 \quad (3)$$

$$S_a = \pi(D_g)^2 \quad (4)$$

where L is the length of the potato tuber in mm, W is the width of the potato tuber in mm, and T is the thickness of the potato tuber in mm.

The weight of each potato tuber (W_t) was measured with a digital scale (DyNamic- MS-K07-China) with a 0.1 g graduation. Volume (V) was determined through the Archimedes principle, where in the potato was submerged in a previously weighed 2000 ml glass beaker and filled with water until 1400 ml (Rady et al., 2017). The registered change represented the weight of displaced water, which was divided by the known density of water at room temperature (20.20 ± 3.18 °C); the weight of displaced water was the reading on the scale of the submerged object minus the weight of the recipient and the water (Ibrahim, 2012). Equation (5) was used to determine the volume (Mohsenin, 1986; Wilhelm et al., 2005):

$$V = \frac{W_w}{\rho_w} \quad (5)$$

where W_w is the weight of the displaced water in g, and ρ_w is the density of the water, which is equal to 0.998 g cm^{-3} .

The density (ρ_t , g cm^{-3}) of each tuber was calculated with Equation (6) (Mohsenin, 1986; Wilhelm et al., 2005):

$$\rho_t = \frac{W_t}{V} \quad (6)$$

where W_t is the weight of the tuber in g, and V is the volume of the tuber in cm^3 .

2.3 Determination of the mechanical characteristics

The static friction coefficient of the tubers was determined with a device (own design) that consisted of a wooden board where a galvanized steel sheet or a commercial neoprene sheet could be attached, adjustable to different degrees with increments of 0.25° (Figure 2). The platform design was based on the authors (Junwei et al., 2018; Shafaei et al., 2020; Onwe et al., 2020). Three potatoes were held together with masking tape and placed on the device. The inclination angle was gradually incremented until the tubers started to slide without rolling. After each repetition, a dry cloth was used to clean the different platforms. (Mohsenin, 1986; Teye and Abano, 2012; Abd Elhay, 2017). Thirty repetitions were performed for each size and material. Equation (7) was used to calculate the static friction coefficient (Mohsenin, 1986; Nam et al., 2018):

$$\mu_s = \tan \theta_s = \frac{h_s}{b_s} \quad (7)$$

where θ is the inclination angle when the tubers started to slide in degrees, ($^\circ$); h_s is the elevated height in mm, and b_s is the distance of the base in mm.

The rolling angle of the tubers was determined with the same device used to determine the static friction coefficient (Figure 2) and with the same samples. Tubers were

individually placed, and the inclination angle was varied until they started to roll (Abd Elhay, 2017). Thirty repetitions were performed for each size group and material.



Figure 2 Device to determine the static friction coefficient and the rolling angle

To perform the axial compression test, potatoes were stored for five days after being harvested at a room temperature of 19 ± 1 °C with a relative humidity of $56 \pm 10\%$. Tests were made with unwashed potatoes to simulate field conditions. Thirty tubers of each size were selected, and two treatments were applied (15 tubers in the horizontal position and 15 in the vertical position), as shown in Figure 3. The axial compression tests to determine the mechanical characteristics of the potato tubers only considered the compression load (N), extension through compression as deformation (mm), deformation percentage (%), and Young modulus (MPa). A universal machine was used for mechanical tests, and the INSTRON equipment (Model 3382, Norwood, MA, EUA) was controlled through a computer by means of Bluehill® 2 INSTRON software. The vertical displacement speed of the controller of the machine was 50 mm/min (ASAE, 2005) with a load cell of 100 kN. Parallel plates 15 cm in diameter were used. The moisture content of the tubers obtained was 79%, and the test was performed at a room temperature of 19 ± 1 °C and $41 \pm 1.46\%$ relative humidity.

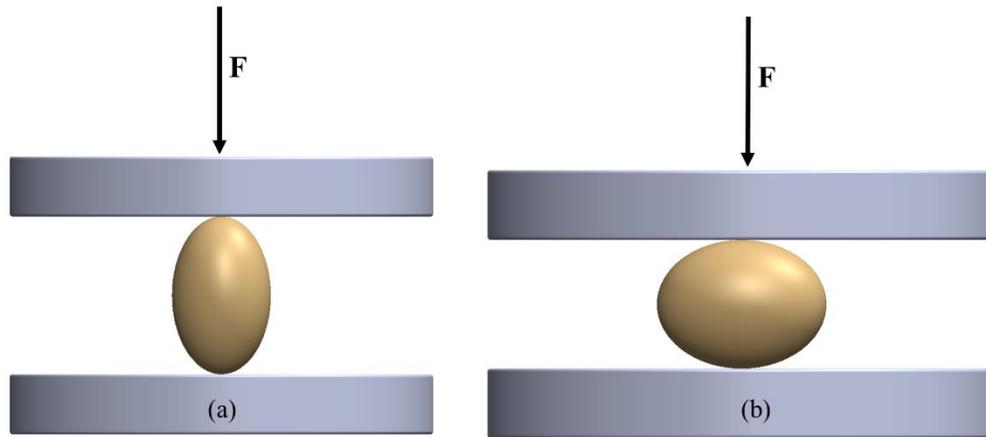


Figure 3 Diagram of potato positions in the axial compression test: (a) vertical position; (b) horizontal position

In the impact and firmness test, sample potatoes were stored for eight days after harvest at a room temperature of 20 ± 1 °C with a relative humidity of $44 \pm 3\%$ without being washed. They were dropped at different heights (50, 75, and 100 cm) in plastic boxes and galvanized steel sheets, and five repetitions were performed for each group (S1, S2, S3, and S4). The firmness was determined with a Wagner Force Five model FDV-30 texture analyzer. The test was performed using the same samples as in the impact test from zero to three days later, and the control samples (healthy potatoes) for all groups were tested.

2.4 Statistical analysis

The statistical analysis was developed using RStudio, a statistical software through comparisons of multiple means with the Tukey test to determine the significant differences among the different tuber group sizes.

3 Results and discussion

3.1 Physical characteristics

The width mean values for each group were S1=74.80 mm, S2=61.57 mm, S3=52.88 mm, and S4=46.88 mm. These data showed that they are within the ranges established by Mexican Norm NMX-FF-022-2002 for each group. According to the results shown in Figure 4, potatoes in Group S4 showed the largest dispersion in length (12.19%) and width (8.84%). The thickness of the S4 group potatoes showed the largest coefficient variation at 13.49%, followed by that of the S1 group at 10.80%. The S1 group potatoes (66–75 mm) are in the upper range limit since the producers in the region place giant sized potatoes (>76 mm) together with the potatoes in the S1 group since they are the closest similar group and because they have no market on their own.

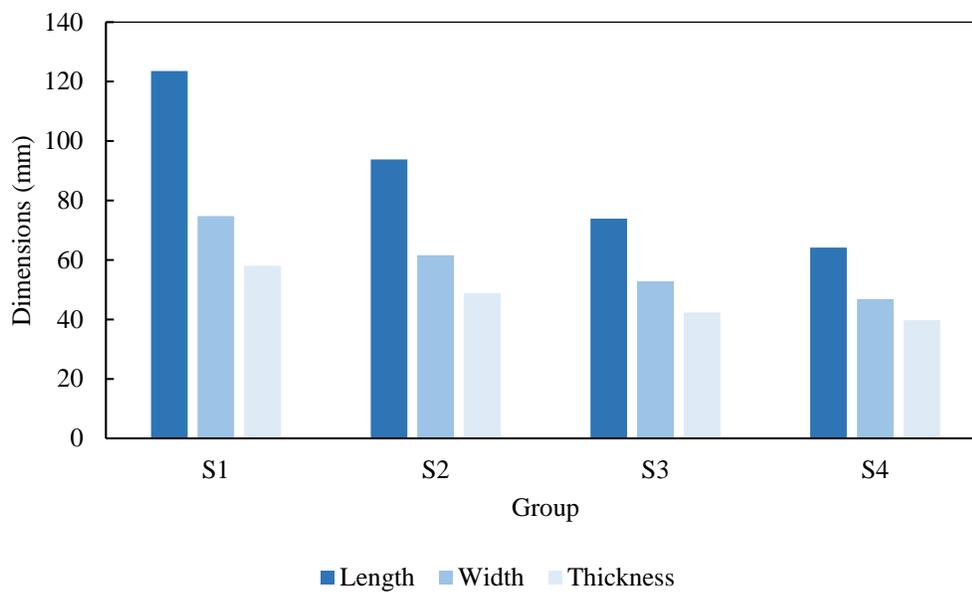


Figure 4 Means of the axial dimensions of the potato in the four classification groups

The geometric mean diameter and arithmetic diameter results are shown in Table 1. A larger dispersion was observed in the S1 group, with values of 7.19% and 7.43%, while the S3 group showed the lowest coefficient variations, with values of 5.87% and 6.05%, respectively.

The potatoes' sphericity is shown in Table 1. This parameter increases from the S1 to the S4 group. In previous investigations by Tabatabaeefar (2002), Gamea et al. (2009), Altuntas et al. (2013), Abd Elhay (2017), and Ahangarnezhad et al. (2019), a similar mean sphericity was reported with values of 71%, 76.3%, 75.97%, 75.4%, and 74.1% for the Agria, Diamont, Jelly, Diamont and Agria varieties, respectively, while in this investigation, the value of mean sphericity in the four size groups was 72.07%.

The values of mean weight (Table 1) are within the ranges established by Mexican Norm NMX-FF-022-2002, and these values are shown as follows: S1=231–360 g, S2=141–230 g, S3=71–140 g, and S4=40–70 g. The potatoes in the S4 group turned out with a mean that was very close to the upper range limit with a coefficient variation of 13%, while those in the S1 group had a coefficient variation of 21.81% because the weight range in the S1 group was larger than that in the S4 group because of the producers included giant potatoes in the S1 group (>371 g).

Volume and density results are shown in Table 1. The dispersion of data obtained for the potato volume decreased from the S1 group to the S4 group, which means that the potatoes in the S4 group were more uniform. The mean density value in Groups S1, S2, and S3 was 1.08 g cm^{-3} , and for the S4 group, it was 1.07 g cm^{-3} , while the general average was 1.077 g cm^{-3} , which is similar to the results obtained by authors such as Rady et al. (2017) with a value of 1.08 g cm^{-3} , Patel et al. (2018) with a value of 1.067 g cm^{-3} , Abedi et al. (2019) with values of 1.069 g cm^{-3} and 1.082 g cm^{-3} , respectively, and Ahangarnezhad et al. (2019) with a value of 1.05 g cm^{-3} .

According to mean comparisons, using the Tukey test, a significant difference ($p < 0.001$) was confirmed between the weights for each chosen size group (Figure 5). Significant differences ($p < 0.001$) in geometric mean diameter, arithmetic diameter, surface area and volume are shown in Table 1. All these values are directly proportional regarding the size, with lower values in the smaller potatoes (S4) and values increasing until the S1 group. While in sphericity the difference is significant with $p < 0.001$, higher values were obtained in the smaller sized potatoes (S3 and S4) and mentioned values decreased while the size increased, this being because, in this variety, the biggest potatoes tend to be more oval, and the smaller ones tend to be more spherical. Regarding the density, the significant difference is significant ($p < 0.001$), tuber sizes group are classified by density into two groups, the first group including S1, S2, and S3 groups and the second group only consisting of the S4 group.

Table 1 Mean values, maximums and minimums with standard deviation and coefficient variations of some of the physical characteristics of potatoes

Parameter	Group	Mean	Max.	Min.	SD	CV (%)	ANOVA
Geometric mean diameter (mm)	S1	81.10 ^a	101.89	71.72	5.83	7.19	***
	S2	65.44 ^b	77.13	58.42	4.33	6.62	
	S3	54.73 ^c	64.07	47.67	3.21	5.87	
	S4	49.14 ^d	65.36	40.38	3.02	6.15	
Arithmetic diameter (mm)	S1	85.51 ^a	106.99	75.44	6.36	7.43	***
	S2	68.07 ^b	79.85	60.78	4.68	6.88	
	S3	56.40 ^c	65.89	50.11	3.41	6.05	
	S4	50.29 ^d	66.78	40.40	3.05	6.07	
Sphericity (%)	S1	66.09 ^c	80.47	53.04	5.58	8.45	***
	S2	70.30 ^b	86.82	54.20	6.00	8.54	
	S3	74.83 ^a	90.15	51.76	7.68	10.26	
	S4	77.09 ^a	96.47	52.27	7.03	9.12	
Surface area (mm ²)	S1	20770.12 ^a	32617.40	16157.56	3078.78	14.82	***
	S2	13509.98 ^b	18689.97	10723.45	1820.58	13.25	
	S3	9440.89 ^c	12894.77	7138.71	1116.31	11.82	
	S4	7614.98 ^d	13420.82	5121.96	968.45	12.72	
Weight (g)	S1	311.37 ^a	614.20	217.60	67.90	21.81	***
	S2	161.86 ^b	238.00	119.40	31.25	19.15	

	S3	95.72 ^c	152.00	63.30	17.47	18.25	
	S4	67.44 ^d	87.40	44.10	8.76	13.00	
Volume (cm ³)	S1	289.10 ^a	574.65	201.80	63.46	21.95	***
	S2	150.47 ^b	224.75	111.52	29.15	19.37	
	S3	89.12 ^c	139.78	59.52	16.12	18.08	
	S4	63.14 ^d	82.46	41.38	8.14	12.89	
Density (g cm ⁻³)	S1	1.08 ^a	1.16	1.05	0.02	1.47	***
	S2	1.08 ^a	1.10	1.02	0.01	1.18	
	S3	1.08 ^a	1.15	1.04	0.02	1.57	
	S4	1.07 ^b	1.10	1.04	0.01	1.07	

Note: SD – Standard deviation, CV – Variation coefficient, *** - They are significantly different according to the Tukey test (p <0.001).

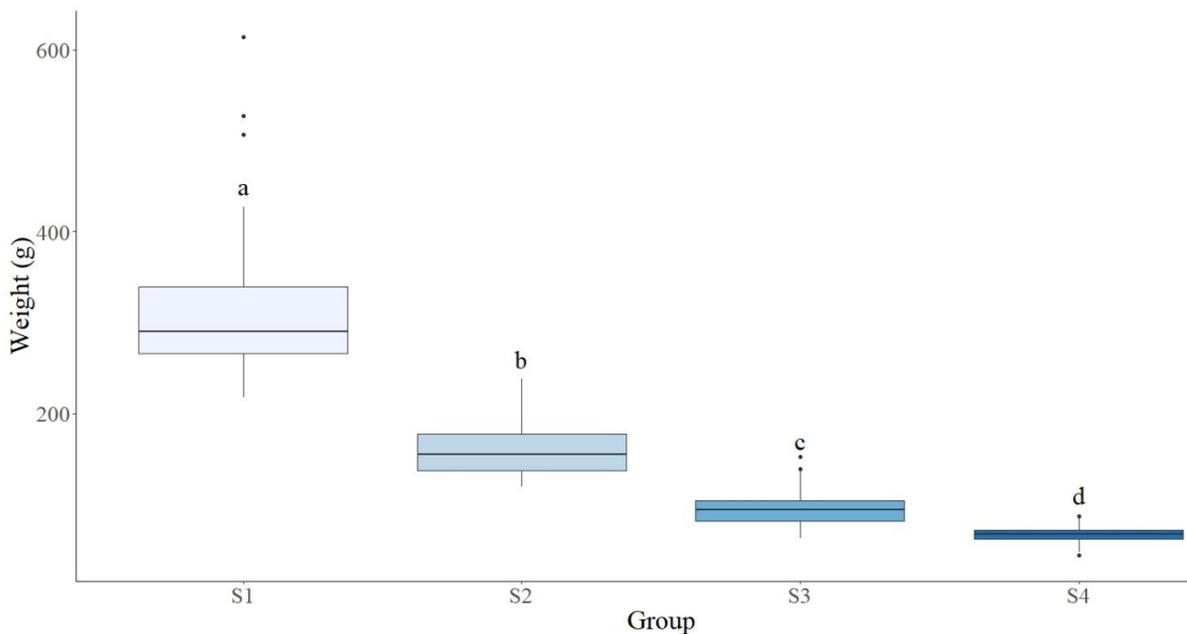


Figure 5 Weight mean comparisons by Tukey's test in the different groups

3.2 Mechanical characteristics

The mean values with their standard deviation of the static friction coefficient and the rolling coefficient are shown in Table 2. Three different surfaces were used. It was observed that on the galvanized steel sheet, lower coefficients were obtained with a mean of 0.400. Similar results were obtained by Yurtlu et al. (2011) with the Marabel variety, with a value of 0.396, while Patel et al. (2018) reported a value of 0.567 for the Kufri

Badshah variety. The static friction coefficient increased in relation to sphericity for the three materials. The lowest were from Group S1, and the highest were from Group S4, except for the commercial neoprene material. The results obtained for the rolling angle were the opposite of the static friction coefficient. In Group S1, higher data were obtained compared to those in the S4 group; the only exception was the S3 group, which was less round than the S2 group, for which higher results were obtained. A mean rolling angle of a minimum of 15.05° was obtained on the galvanized steel sheet, and the maximum rolling angle on commercial neoprene was 15.58°. Abd Elhay (2017) obtained similar results with the Astrix variety on galvanized steel sheets, with a value of 14.80°.

The mean comparisons for the static friction coefficient and rolling angle are shown in Table 2. The mean values are significantly different, except when comparing the average of the materials used in the rolling angle test. For the static friction coefficient, statistically, there were two groups of mean classifications: the S3 group obtained the highest values, and the S1 group obtained the lowest values, while the S2 and S4 groups were within a combination of the mentioned groups. At the rolling angle, it was observed that the galvanized steel sheet showed a lower mean than the wooden and commercial neoprene sheets. There were two mean groups: the highest mean was obtained in the S1 group, and the corresponding lowest means were obtained in S3, S2, and S4. When comparing the average value of the rolling angle between the three materials, it was observed that the material did not present a significant difference.

Table 2 Mean values with standard deviation of the static friction coefficient and the rolling coefficient of potatoes on different surfaces

Parameter	Group	Surface			General mean	ANOVA
		Wooden board	Galvanized steel sheet	Commercial neoprene		
Static friction coefficient	S1	0.534 ± 0.079	0.334 ± 0.055	0.800 ± 0.103	0.556 ^b	**
	S2	0.551 ± 0.078	0.373 ± 0.042	0.859 ± 0.117	0.594 ^{ab}	
	S3	0.592 ± 0.074	0.428 ± 0.063	0.860 ± 0.135	0.626 ^a	
	S4	0.596 ± 0.104	0.457 ± 0.058	0.794 ± 0.111	0.615 ^{ab}	
	Mean	0.568 ^b	0.398 ^c	0.828 ^a		***
Rolling angle (°)	S1	18.78 ± 5.07	16.81 ± 2.74	18.83 ± 5.00	18.14 ^a	***
	S2	14.81 ± 4.74	14.69 ± 3.56	14.57 ± 4.71	14.69 ^b	
	S3	14.99 ± 4.53	14.88 ± 3.55	15.22 ± 4.89	15.03 ^b	
	S4	13.18 ± 2.75	13.96 ± 2.73	13.28 ± 2.69	13.47 ^b	
	Mean	15.44 ^a	15.08 ^a	15.47 ^a		NS

Note: NS – It is not significant, *** They are significantly different according to the Tukey test (p <0.001).

The axial compression results in all four size groups and in the two positions are shown in Table 3. The potatoes in a vertical position fractured lengthwise along the tuber (polar diameter), as shown in Figure 6 (a), while those in the horizontal position fractured through their width (equatorial diameter), as shown in Figure 6 (b). In the potatoes placed in the vertical position, the values obtained for compression loads and the Young modulus were lower (1050.056 N and 1.297 MPa, respectively) compared to those in the horizontal position (1430.043 N and 3.123 MPa, respectively), while the extension through compression and the compression deformation percentage showed opposite results: in the vertical position, with mean values of 29.995 mm and 27.314%, and in the horizontal position, with mean values of 19.588 mm and 17.432%, respectively. Patel et al. (2018) reported a similar relationship between the positions of the potatoes in the axial compression results with mean weights of 88.12 g and 89.58 g. The values obtained from the Young modulus spanned from 1.306 to 3.697 MPa, which are within the range (1.04 to 5.76 MPa) that ASAE (2005) presented. The mean comparison results were significantly different ($p < 0.0001$), except for the mean weight comparisons, which did not present a significant difference because the potato tubers had physical similarities.

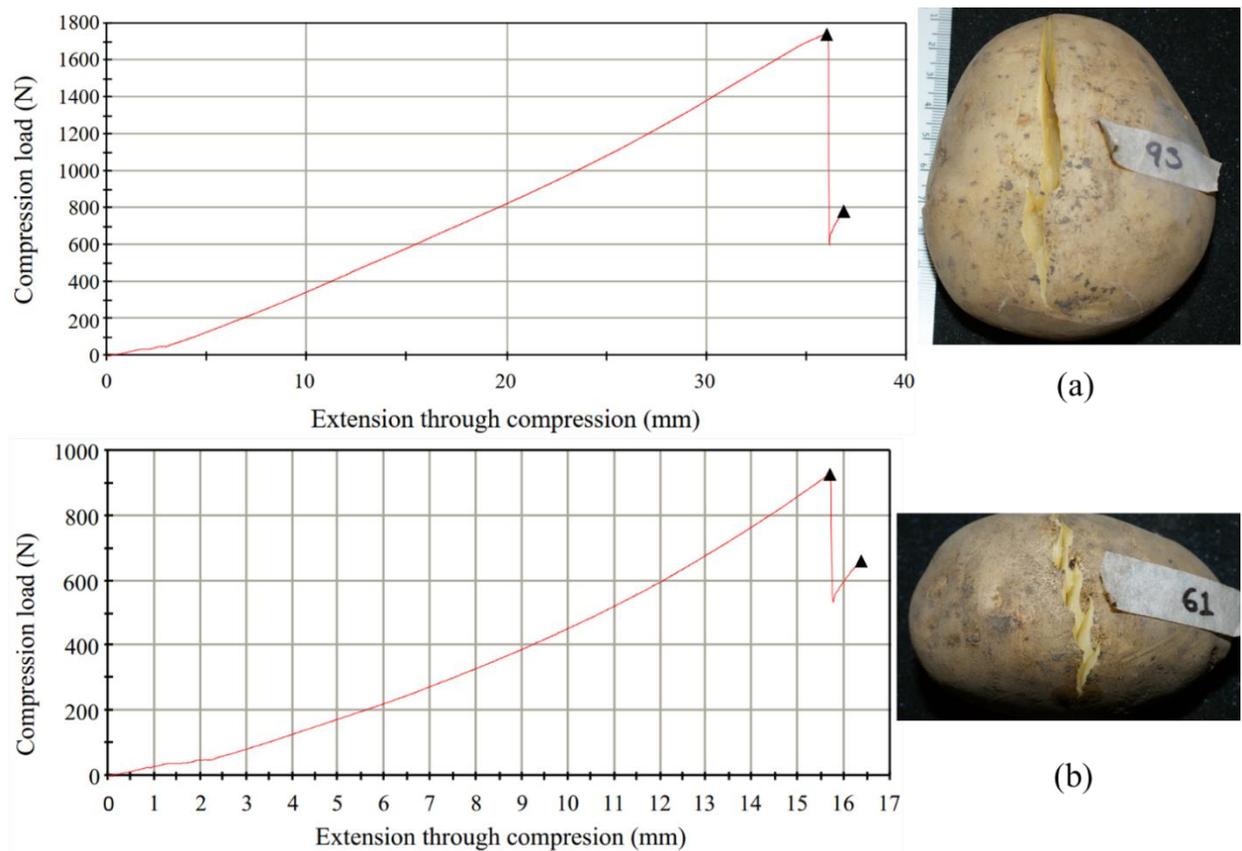


Figure 6 Load-deformation curves (extension through compression) in the axial compression test: (a) potato from the S1 group in the vertical position; (b) potato from the S3 group in the horizontal position

Table 3 Mean values from the axial compression test with potatoes of different sizes in two positions

Parameter	Group	Vertical position	Horizontal position	General mean	ANOVA
Weight (g)	S1	284.267 ± 46.848	316.080 ± 57.211	300.174 ^a	***
	S2	197.540 ± 29.494	203.327 ± 17.326	200.434 ^b	
	S3	101.407 ± 18.857	106.853 ± 16.770	104.130 ^c	
	S4	69.707 ± 8.894	66.933 ± 9.511	68.32 ^d	
	Mean	163.230 ^a	173.298 ^a	NS	
Max. compression load (MPa)	S1	1343.231 ± 258.551	2059.810 ± 288.738	1701.521 ^a	***
	S2	1184.198 ± 208.101	1607.989 ± 141.654	1396.094 ^b	
	S3	929.157 ± 173.225	1198.920 ± 146.781	164.038 ^c	
	S4	743.639 ± 139.973	853.451 ± 122.539	798.545 ^d	
	Mean	1050.056 ^b	1430.043 ^a	***	
Extension through compression (mm)	S1	36.174 ± 4.828	24.057 ± 4.941	30.115 ^a	***
	S2	35.555 ± 7.341	20.663 ± 1.715	28.109 ^a	
	S3	26.290 ± 4.502	17.882 ± 1.546	22.086 ^b	
	S4	21.963 ± 3.522	15.750 ± 1.391	18.856 ^c	
	Mean	29.995 ^a	19.588 ^b	***	
Max. compression deformation (%)	S1	33.134 ± 4.212	21.371 ± 5.278	27.253 ^a	***
	S2	33.060 ± 5.048	17.958 ± 1.601	25.509 ^a	
	S3	23.713 ± 3.893	16.365 ± 1.546	20.039 ^b	
	S4	19.348 ± 3.477	14.033 ± 1.356	16.691 ^b	
	Mean	27.314 ^a	17.432 ^b	***	
Young modulus (MPa)	S1	1.343 ± 0.237	3.697 ± 0.478	2.520 ^a	***
	S2	1.214 ± 0.183	3.356 ± 0.304	2.285 ^{ab}	
	S3	1.326 ± 0.180	2.956 ± 0.393	2.141 ^{bc}	
	S4	1.306 ± 0.329	2.482 ± 0.554	1.894 ^c	
	Mean	1.297 ^b	3.123 ^a	***	

Note: NS – It is not significant. *** - They are significantly different according to the Tukey test (p <0.001).

Table 4 shows the firmness results obtained using control sample potatoes and potatoes used in the impact tests. The firmness test results at zero days did not present a clear tendency, while at three days of storage, a firmness decrease was observed. According to the obtained mean values in the four groups, the firmness at zero days using potatoes in the impact tests decreased by 1.93 N compared to the control sample potatoes in all four size groups, while at three days after impact, the highest value was 2.63 N. Both values were obtained with the galvanized steel sheet at an impact height of 100 cm. Statistically different mean values were obtained ($p < 0.001$), with a higher firmness in the control sample potatoes and the potatoes with impact tests at 100 cm height three days later on a galvanized steel sheet a lower firmness was obtained.

Table 4 Potato firmness at different heights of fall impact

	Days after impact	Height of fall (cm)	S1 (N)	S2 (N)	S3 (N)	S4 (N)	Average (N)	ANOVA
Impact on Plastic	Zero	50	9.30	9.33	9.24	9.77	9.41 ^{ab}	***
		75	10.41	8.20	11.12	7.87	9.40 ^{ab}	
		100	10.86	7.62	11.17	8.42	9.52 ^{ab}	
	Three	50	8.23	7.99	9.45	8.84	8.63 ^{ab}	
		75	6.90	7.85	8.43	7.88	7.76 ^{ab}	
		100	7.56	7.22	8.88	7.38	7.76 ^{ab}	
Impact on Galvanized steel sheet	Zero	50	8.44	8.99	6.46	10.81	8.67 ^{ab}	
		75	7.47	7.14	7.12	11.52	8.31 ^{ab}	
		100	7.74	8.28	7.57	8.57	8.04 ^{ab}	
	Three	50	9.06	7.86	8.22	8.78	8.48 ^{ab}	
		75	8.34	8.30	7.68	7.48	7.95 ^{ab}	
		100	7.20	7.62	7.60	8.13	7.64 ^b	
Control sample potato			10.33	9.02	11.16	9.36	9.97 ^a	

Note: *** - They are significantly different according to the Tukey test ($p < 0.001$).

4 Conclusions

The physical-mechanical characteristics of the Fianna potato variety were determined to help understand its behavior during harvest, postharvest operations, and transportation. Furthermore, they function as support for designing and redesigning mechanical equipment that improves the performance and efficacy of these operations at a lower cost. Currently, in the study zone, there is low technology both in harvest and postharvest. The potatoes are collected and classified in the field manually and subjectively based on the experience of the worker only; however, the workers become confused due to the variation in shape among the tubers. The fatigue of the worker during the workday also affects these operations, provoking classification errors. Many potatoes are placed in a range that does not correspond, which represents an economic loss for the producer and an additional profit for the buyer or middleman. This error is mainly due to the axial dimensions of the potato. There are 7.25% long tubers with a width less than what is established, but with a mean weight within the range and with a constant relation that this potato variety presents, that the sphericity decreases while the size increases, having a rounder shape in the S4 group and more oblong one in the S1 group. The parameters obtained represent important data, necessary to make a design, the machines can improve their functionality with these data, such as: the static friction coefficient, the potatoes in the S4 group showed higher values and they decrease as the potato become bigger in size; the rolling angle increased while the potatoes increased in size, although exceptions were detected due to the shape of the potato being changeable. At the beginning of the compression tests, it was determined that the potatoes in the horizontal position can withstand a higher compression load with less deformation than the potatoes in the vertical position, but in both positions, the compression load incremented proportionally with the size of the tubers. The firmness results showed a slow decrease over time since the impact, and these characteristics changed directly with the material type, area and height of the impact, temperature, relative humidity, and quantity of exposed light from the tubers. All these values obtained will be very useful in the development of technology for the mechanization of the harvest and postharvest stages of potatoes.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council of Science and Technology (CONACyT) for economic support as well as the Universidad Autonoma Chapingo and the Graduate Program of Agricultural Engineering and Integral Use of Water for economic support and the use of the facilities and laboratories to go through with this research.

References

- Abbasi, K. S., A. Qayyum, A. Mehmood, T. Mahmood, S. U. Khan, M. Liaquat, A. Sohail, and A. Ahmad. 2019. Analysis of selective potato varieties and their functional assessment. *Food Science and Technology*, Campinas, 39(2): 308-314, Apr.-June 2019.
- Abd Elhay, Y. B. 2017. Determination of some physical and mechanical properties of potato tubers related to design of sorting, cleaning and grading machine. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(3): 1375-1388.
- Abedi, G., S. Abdollahpour, and M. R. Bakhtiari. 2019. The physical and mechanical properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers as related to the automatic separation from clods and stones. *Research in Agricultural Engineering*, 65 (3): 77-84.
- Ahangarnezhad, N., G. Najafi, and A. Jahanbakhshi. 2019. Determination of the physical and mechanical properties of a potato (the Agria variety) in order to mechanise the harvesting and post-harvesting operations. *Research in Agricultural Engineering*, 65(2): 33-39.
- Al-Hamed, S. A., M. F. Wahby, A. M. Aboukarima, K. A. Ahmed, and M. S. El Marazky. 2018. Effect of primary tillage implements on physical properties of harvested Spunta potato tubers. *Current Science* (00113891): 114(10).
- Altuntas, E., G. Yilmaz, Y. B. Karan, and E. Dulger. 2013. Assessment of the Physico-mechanical, Chemical and Colour Characteristics of Potatoes Depending on Tuber Size and Cultivar. *International Journal of Food Engineering*, 9(4): 487-497.

- ASAE Standards 2005. S368.4. Compression Test of Food Material of Convex Shape. American Society for Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan.
- Buitrago, G. V., A. P. López, A. P. Coronado, y F. L. Osorno. 2004. Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1): 102-110.
- El-Raie, A. E. E., N. A. Hendawy and A.Z. Taib. 1996. Study of physical and engineering properties for some agricultural products. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 13 (1): 211-226.
- Gamea, G. R., A. El-Maksoud, and A. El-Gawad. 2009. Physical characteristics and chemical properties of potato tubers under different storage systems. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 26 (1): 385-408.
- Goyal, R. K., A. R. P. Kingsly, P. Kumar, and H. Walia. 2007. Physical and mechanical properties of aonla fruits. *Journal of Food Engineering*, 82(4): 595-599. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.03.019.
- Ibrahim, M. M., and A. Mostafa. 2012. Effect of gibberellic acid (GA3) on the physical and mechanical properties for some potato varieties. *In Creating a competitive edge through agricultural mechanization and post-harvest technology in developing countries*. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012. CIGR-EurAgEng.

- Junwei, L., M. Yunhai, T. Jin, M. Zichao, W. Lidong, and Y. Jiangtao. 2018. Mechanical properties and microstructure of potato peels. *International journal of food properties*, 21(1): 1395-1413.
- López, A. F. 2003. Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas (Del campo al mercado). Boletín de Servicios Agrícolas N° 151. FAO. <http://www.fao.org/3/y4893s/y4893s00.htm#Contents>
- Mejía, G., and J. A. Castellanos (2018). Costos de producción y rentabilidad del cultivo de la papa en Zacapoaxtla, Puebla. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(8): 1651-1661.
- Mohsenin, N.N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2nd Ed. New York, Gordon and Breach Science Publishers (No. 581.1 M64 1986).
- Nam, J. S., J. H. Byun, T. H. Kim, M. H. Kim, and D. C. Kim. 2018. Measurement of Mechanical and Physical Properties of Pepper for Particle Behavior Analysis. *Journal of Biosystems Engineering*, 43(3): 173-184.
- NMX-FF-022-2002. Productos alimenticios no industrializados para uso humano. tubérculo. papa (*Solanum tuberosum* L.). Especificaciones y método de prueba. Normas mexicanas. Dirección general de normas. 9 pp.
- Onwe, D. N., K. C. Umani, W. A. Olosunde, and I. S. Ossom. 2020. Comparative analysis of moisture-dependent physical and mechanical properties of two varieties of African star apple (*Chrysophyllum albidum*) seeds relevant in engineering design. *Scientific African*, 8, e00303.

- Patel, M. B., E. A. Nath, and J. M. Mayani. 2018. Evaluation of physical and mechanical properties of fresh potato. *International Journal of Chemical Studies*, 6(5): 1454-1459. DOI: 10.13140/RG.2.2.15777.45929.
- Rady, A. M., S. N. Soliman, and A. El-Wersh. 2017. Effect of mechanical treatments on creep behavior of potato tubers. *Engineering in agriculture, environment and food*, 10(4): 282-291. DOI: 10.1016/j.eaef.2017.06.001.
- Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). 2019. La papa, el cuarto cultivo de mayor producción en el mundo. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/la-papa-el-cuarto-cultivo-de-mayor-produccion-en-el-mundo?idiom=es>
- Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). 2020. Panorama agroalimentario 2020. Ed. 2020, México. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020
- Shafaei, S. M., A. Nourmohamadi-Moghadami, S. Kamgar, and M. Eghtesad. 2020. Development and validation of an integrated mechatronic apparatus for measurement of friction coefficients of agricultural products. *Information Processing in Agriculture*, 7(1): 93-108.
- Tabatabaeefar, A. 2002. Size and shape of potato tubers. *International agrophysics*, 16(4): 301-305.

- Teye, E., and E. E. Abano. 2012. Physical properties of two varieties of sweet potato grown in the coastal savannah zone of Ghana. *International Journal of Science and Nature*, 3(1): 105-109.
- Vázquez, M. G., O. Á. Rubio, Y. Salinas, y D. Santiago. 2012. Usos alternativos de la papa en el Estado de México. Texcoco, Estado de México. *INIFAP*.
- Wilhelm, L.R., D.A. Suter, and G.H. Brusewitz. 2005. Physical Properties of Food Materials. *Food and Process Engineering Technology*. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
- Yurtlu, Y. B., E. Yeşiloğlu, K. K. Vursavuş, and K. Saçilik. 2011. Coefficient of friction of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers in different surfaces. *Journal of Adnan Menderes University, Agricultural Faculty*, 8(2).

4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CLASIFICADORA DE PAPAS PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES

Este capítulo presenta el artículo en revisión sobre el diseño y construcción del prototipo para clasificar papas en cuatro tamaños. Este apartado se apoya del capítulo tres para la determinación de los parámetros de diseño de la máquina. El prototipo fue modelado en el programa CAD SolidWorks®, mide 1.95 x 0.66 x 1.74 m y cuenta con dos sistemas: limpieza y clasificación. La construcción de la máquina fue llevada a cabo en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, en el Área de procesos de manufactura, así mismo, la realización de sus pruebas técnicas con 450 muestras de papas (variedad Fianna) adquiridas de Perote, Veracruz. La productividad del prototipo es de 2289.6 kg h⁻¹, con una eficiencia del 34.06 % en la clasificación y con un porcentaje de papas dañadas del 3.11 %. El costo de la construcción del prototipo fue de \$ 24 mil pesos mexicanos.

Diseño y construcción de una clasificadora de papas para pequeños productores

Gaudencio **Grande Martinez**¹ y Martin **Hidalgo Reyes**²

Resumen

La clasificación de las papas es de gran importancia para su comercialización, dicho proceso evita pérdidas en las ganancias del productor y esto conlleva a la necesidad de desarrollar máquinas clasificadoras para optimizar el tiempo y los costos. El objetivo principal de este estudio fue diseñar y construir una máquina clasificadora de papas en cuatro grupos (primera-S1, segunda-S2, tercera-S3 y cuarta-S4) de acuerdo con su grosor, para uso de productores en pequeñas escalas. El diseño fue desarrollado considerando los resultados de mediciones experimentales y las propiedades físico-mecánicas obtenidas de los tubérculos. El prototipo fue modelado en el programa CAD SolidWorks®, mide 1.95 x 0.66 x 1.74 m y cuenta con dos sistemas: limpieza y clasificación. El sistema de limpieza está compuesto de tres cepillos rotativos (444.5 mm de longitud y 254 mm de diámetro) que giran a 200 rev min⁻¹; dos rodillos sin fin y dos rodillos lisos (1511.3 mm de longitud y 73.025 mm de diámetro) posicionados con una pendiente de 15° conforman el sistema de clasificación. Funciona con dos motores eléctricos (0.5 Hp y 2 Hp), su productividad es de 2289.6 kg h⁻¹, con una eficiencia del 34.06 % en la clasificación y con un porcentaje de papas dañadas del 3.11 %. El costo de la construcción del prototipo fue de \$ 24 mil pesos mexicanos.

Palabras clave: clasificación, diseño, prototipo, sistema, tamaño.

Abstract

The potatoes sorting has a great importance for their commercialization, this process avoids losses in the producer's profits and consequently, the sorter machines development is required to optimize time and costs. The main aim of this study was to design and to construct a potato sorter machine in four groups (first-S1, second-S2, third-S3 and fourth-S4) according to their thickness, for be used by producers at small scales. The design was developed according to the

experimental measurements results and the physical-mechanical characteristics obtained of the tubers. The prototype was modeled in the SolidWorks® CAD software, measures 1.95 x 0.66 x 1.74 m and has two systems: cleaning and sorting. The cleaning system is composed of three rotating brushes (length of 444.5 mm and a diameter of 254 mm) these rotates at 200 rev min⁻¹; two endless rollers and two smooth rollers (1511.3 mm in length and 73.025 mm in diameter) which are positioned with a slope of 15° compose the sorting system. It operates using two electric motors (0.5 Hp and 2 Hp), its productivity is 2289.6 kg h⁻¹, with an efficiency of 34.06 % in sorting and with 3.11 % of damaged potatoes. The prototype construction cost was \$ 24,000 Mexican pesos.

Keywords: sorting, design, prototype, system, size.

¹Tesista

²Director

1 Introducción

Actualmente, la papa se ha convertido en un parte integral de la alimentación a nivel mundial, consumida por millones de personas y es el cuarto cultivo alimentario más grande, sólo después del arroz (*Oriza sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.); tiene más de 3200 variedades y es cultivado en más de 100 países (FAOSTAT, 2008; Mahgoub *et al.*, 2015). La comercialización de la papa requiere que sea clasificada según su peso, color y tamaño que aplica para todas las variedades como lo establecen las diferentes normas existentes, en el caso de México, la Norma Mexicana (Secretaría de Economía, 2003). Gran parte de la maquinaria utilizada para la clasificación de la papa se realiza de acuerdo a su tamaño y peso.

Hay una gran variedad de máquinas clasificadoras con diferentes principios. Farhadi *et al.* (2012a, 2012 b) diseñaron y construyeron un prototipo clasificador de papas compuesta de hélices rotatoria a 20 rev min⁻¹ con capacidad de 3 t h⁻¹ y funciona con la toma de fuerza de un tractor. Huda *et al.* (2019) desarrollaron un prototipo para clasificar papas que se compone principalmente de un tambor

inclinado con orificios por donde pasan los tubérculos, funciona a 6 rev min⁻¹, tiene una eficiencia del 91.57 % y una capacidad del 420.10 kg h⁻¹. Alemu *et al.* (2021) desarrollaron un equipo estacionario para clasificar papas en tamaños para pequeños y medianos productores que funciona con un sistema de cilindro rotatorio con inclinación, obtuvieron un rendimiento de 30 kg min⁻¹ y una eficiencia del 97.67 %. Por otro lado, Torres *et al.* (2021) desarrollaron un modelo para la regulación de una clasificadora compuesta de una banda inclinada siendo versátil para diferentes productos agrícolas, las ecuaciones obtenidas son para tubérculos de papas. Actualmente, en México existen clasificadoras estacionarias para grandes productores, pero no hay suficiente información de equipos de clasificación de tubérculos para los pequeños productores que sea funcional y versátil.

Por ello, el objetivo de esta investigación es el diseño y construcción de un prototipo con la capacidad de clasificar papas por tamaño para pequeños productores de la región de Tlaxco, Tlaxcala; ya que actualmente no cuentan con algún equipo para la postcosecha para mejorar la comercialización y mejorar los costos en la venta de sus productos.

2 Materiales y métodos

2.1 Propiedades físicas de la papa

Para el diseño del prototipo se tomaron como referencia los resultados del estudio de las propiedades físico-mecánicas de la papa para la variedad Fianna, obtenidas durante la cosecha de la temporada verano-otoño 2020.

2.2 Área de estudio para el desarrollo del prototipo

El desarrollo y prueba técnica del prototipo se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, en el área de procesos de manufactura.

2.3 Material experimental

La muestra se compone de 450 papas de la variedad Fianna, provenientes de la región de Perote Veracruz. Las papas se clasificaron en cuatro grupos de tamaño según la norma mexicana: primera (grupo S1) con n=35 muestras (9.40 kg), segunda (grupo S2) con n=142 muestras (25.27 kg), tercera (grupo S3) con n=145 muestras (14.48 kg) y cuarta (grupo S4) con n=128 muestras (6.66 kg).

2.4 Diseño conceptual

La función general de la máquina fue clasificar las papas en cuatro grupos de tamaños (S1, S2, S3 y S4) basados en la Norma Mexicana (Secretaría de Economía, 2003), los tubérculos de tamaño mayor a S1, llamadas tamaño gigante, se mezclan con las del grupo S1. La Figura 1 presenta la caja negra del funcionamiento del prototipo:

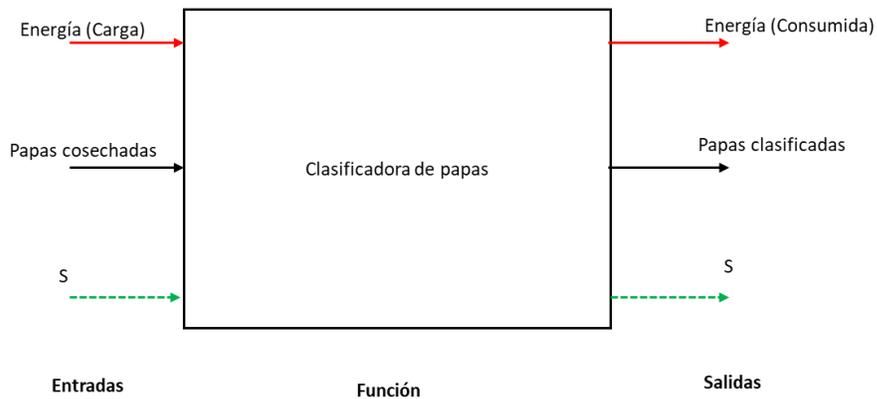


Figura 1. Función global del prototipo para la clasificación de papas.

En la Figura 2 se presenta un diagrama que detalla las subfunciones propuestas para el prototipo, incluyendo la energía que utiliza para su funcionamiento, las señales necesarias para cada subsistema y la energía perdida a lo largo del proceso de clasificación de las papas.

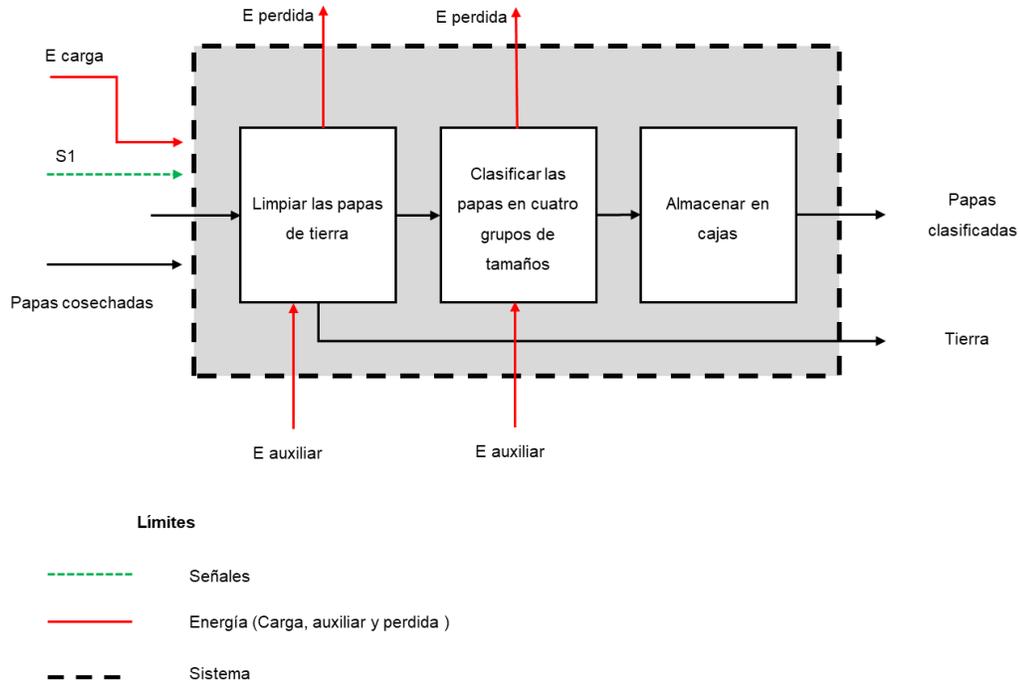


Figura 2. Análisis de las subfunciones del prototipo.

2.5 Consideraciones para el diseño de detalle

Para la remoción de la tierra se diseñaron tres cepillos rotativos, colocados con una pendiente de 15° para propiciar la rodadura de las papas. Se utilizó la siguiente ecuación para determinar la reducción de velocidad de los cepillos rotativos a partir de las revoluciones del motor ($1750 \text{ rev min}^{-1}$):

$$V_{CR} = \frac{D_1 * D_3 * V_M}{D_2 * D_4} \quad (1)$$

donde: V_{CR} - Velocidad de giro de los cepillos rotativos en rev min^{-1} , D_1 - Diámetro de la polea 1 que va conectado al motor en mm, D_2 - diámetro de la polea 2 de reducción en mm, D_3 - diámetro de la polea 2 de reducción en mm, D_4 - diámetro de la polea 2 de reducción en mm y V_M - Velocidad del motor en rev min^{-1} .

Se determinó la cantidad de papas alineadas en los rodillos por metro lineal, utilizando la ecuación 2 (Torres *et al.*, 2021):

$$n_t = \frac{1}{l_t} \quad (2)$$

donde: n_t - número de papas alineadas en los rodillos por metro lineal en piezas o unidades, l_t - longitud media de los tubérculos en m.

Velocidad de desplazamiento lineal del rodillo sinfín para el transporte de papas:

$$V_r = \frac{p * n}{60}, \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3)$$

donde: p - paso del rodillo sinfín en m, y n - velocidad de giro del rodillo sinfín en rev min⁻¹.

Determinación de flujo de tubérculos transportados por cada rodillo sinfín por segundo (Torres *et al.*, 2021):

$$q_t = n_t * V_r, \quad \left(\frac{tub}{s}\right) \quad (4)$$

El flujo de masa de los tubérculos que pasan a lo largo del rodillo sinfín fue determinado por la siguiente ecuación (Torres *et al.*, 2021):

$$q = q_t * m, \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (5)$$

donde, m – masa media de los tubérculos en kg.

La productividad efectiva del prototipo está determinada por la ecuación (6):

$$W = \frac{Q}{t} \quad (6)$$

donde, Q - cantidad de tubérculos clasificados en kg día⁻¹ y t – horas de trabajo efectivas por día en h día⁻¹.

2.6 Descripción y principio de funcionamiento del prototipo

El desarrollo CAD del prototipo, así como los planos de fabricación se obtuvieron en el programa SolidWorks. La estructura del prototipo está constituida por perfiles PTR cuadrado de 25.4 mm (1 in) calibre 14 , ángulos de 38.1 mm (1.5 in) x 3.175 mm (0.125 in) y 50.8 mm (2 in) x 3.175 mm (0.125 in) en acero ASTM A36, las dimensiones generales del prototipo son 1.95 x 0.66 x 1.74 m. Consta

principalmente de dos sistemas: desprendimiento de tierra de los tubérculos y clasificación de los tubérculos.

En la Figura 3 se muestra el sistema de desprendimiento de tierra de los tubérculos, está compuesto de tres cepillos rotativos limpiadores de 444.5 mm (17.5 in) de longitud por 254 mm (10 in) de diámetro y 19.05 mm (0.75 in) para los ejes (622.3 equivalente a 24.5 in de longitud), accionados por medio de un motor eléctrico de 2 Hp. La tierra desprendida cae a través de una lámina desplegada calibre 16 con orificios de 11 x 22 mm conectado a una tolva para el almacenamiento de la tierra removida, en seguida dichos tubérculos caen a una lámina de redirección para continuar con la clasificación.

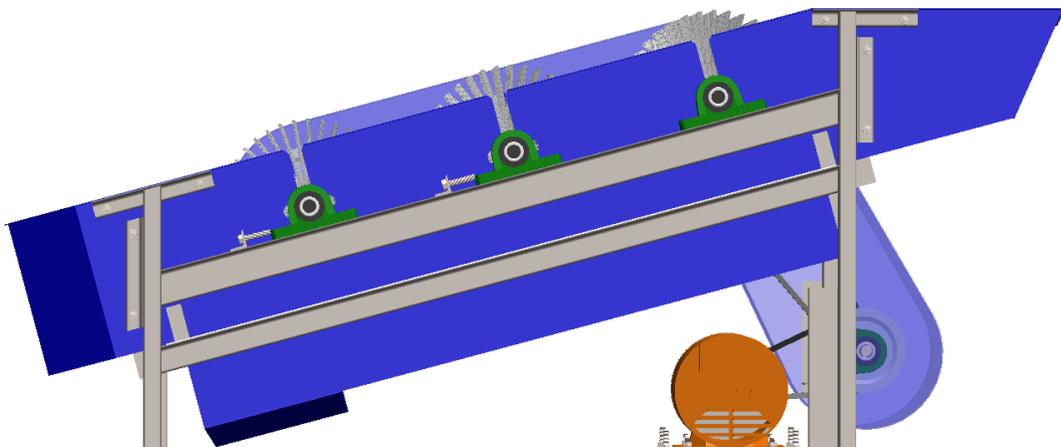


Figura 3. Sistema de desprendimiento de tierra de los tubérculos.

La clasificación de los tubérculos se realizó en función de su grosor por medio de dos rodillos sin fin compuestos de PVC hidráulico de 50.8 mm (2 in) diámetro, cédula 40 y 1511.3 mm (59.5 in) de longitud y una hélice hecha de barra sólida de 6.35 mm (0.25 in) de diámetro que está adherida a lo largo del perfil con un paso de 152.4 mm (6 in); además, un rodillo liso compuesto por tubo PVC hidráulico de 63.5 mm (2.5 in) de diámetro, cédula 80 y de 1511.3 mm (59.5 in) de largo. Estos rodillos llevan tapas a los costados y ejes sólidos de 19.05 mm (0.75 in) de diámetro, el material utilizado para dichos componentes fue acero ASTM A36. Los rodillos sin fin y los rodillos lisos están posicionados con una

pendiente de 15° (Figura 4), tienen una separación que se prolonga de inicio a fin de acuerdo a los rangos de clasificación de los tubérculos. En primera instancia se clasifican los tubérculos más chicos (S4) y de manera progresiva hasta los del tamaño S1. La transmisión de movimiento de los rodillos sin fin se realiza a través de nudos conectados al motor eléctrico de 0.5 Hp, los rodillos lisos giran sin transmisión de potencia.

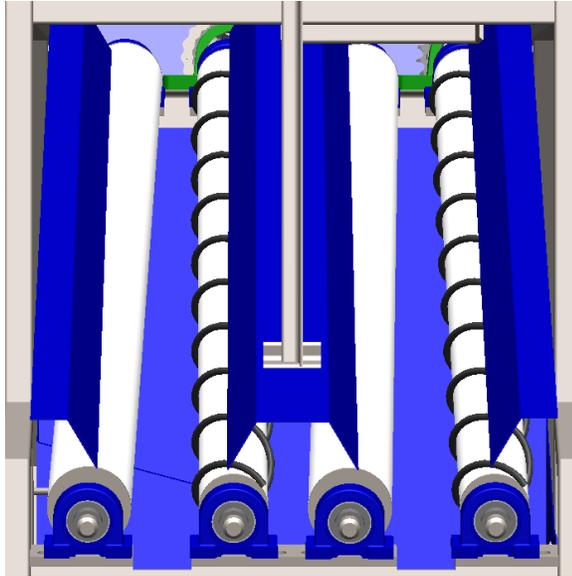


Figura 4. Sistema de clasificación de papas.

Para cada grupo de tamaño, los tubérculos seleccionados caen en las tolvas según corresponda, para los grupos S4, S3, S2 en el lado frontal y para el grupo S1 en el lado derecho del prototipo. Las tolvas tienen una pendiente de 15° y cuentan con sistema de compuerta para controlar el flujo de las papas y evitar su caída al suelo mientras se cambian las cajas llenas.

2.7 Validación de la estructura

El análisis estático fue realizado con el complemento SolidWorks Simulation para la validación de la estructura del prototipo, constituido por PTR cuadrada de 25.4 mm, calibre 14 y ángulos de 38.1 mm x 3.175 mm y 50.8 mm x 3.175 mm, el material fue acero A36.

Las consideraciones para el análisis fueron, el peso de la estructura más el peso de las demás piezas del prototipo (200 kg) y el peso de las papas (100 kg); se consideró como geometría fija la base de la estructura(restricciones) y se aplicó un mallado fino mixto predeterminado. Los análisis realizados fueron: la tensión de von Mises, el desplazamiento estático, la deformación unitaria estática y el factor de seguridad de la estructura.

2.8 Prueba técnica del prototipo

Se realizaron las pruebas de funcionamiento del prototipo para encontrar posibles fallas y defectos de construcción de cada uno de sus sistemas que lo componen.

La muestra está compuesta de 450 papas elegidas aleatoriamente. Dichos tubérculos fueron pesados con una balanza digital (DyNamic- MS-K07-China) con una graduación de 0.1 g. Se tomaron medidas axiales perpendiculares de los tubérculos con un vernier-calibrador digital Insize (0 - 300 mm - serie 1114 - Alemania) con una resolución de 0.01 mm. Las medidas establecidas son: longitud (diámetro más largo del tubérculo o diámetro polar), ancho (diámetro medio o diámetro ecuatorial) y grosor (diámetro chico). Se realizaron tres repeticiones de pruebas de clasificación para cada grupo de tamaño.

La eficiencia del sistema de clasificación del prototipo fue determinada en los cuatro tamaños de papas (Valentin *et al.*, 2016):

$$ESC (\%) = \left(\frac{NPCC_{S4}}{NTP_{S4}} * \frac{NPCC_{S3}}{NTP_{S3}} * \frac{NPCC_{S2}}{NTP_{S2}} * \frac{NPCC_{S1}}{NTP_{S1}} \right) * 100 \quad (8)$$

donde: $NPCC_{S4}$ - número de papas tamaño S4 clasificadas correctamente, NTP_{S4} - número total de papas tamaño S4 en la muestra, $NPCC_{S3}$ - número de papas tamaño S3 clasificadas correctamente, NTP_{S3} - número total de papas tamaño S3 en la muestra, $NPCC_{S2}$ - número de papas tamaño S2 clasificadas correctamente, NTP_{S2} - número total de papas tamaño S2 en la muestra, $NPCC_{S1}$ - número de papas tamaño S1 clasificadas correctamente y NTP_{S1} - número total de papas tamaño S1 en la muestra.

El porcentaje de tubérculos dañados fue determinado considerando tubérculos con una abrasión >5% de su área de superficie, se inspeccionaron visualmente (Valentin *et al.*, 2016):

$$D_T(\%) = \frac{\text{Número total de tubérculos con abrasión}}{\text{Número total de tubérculos en la muestra}} * 100 \quad (9)$$

3 Resultados y discusiones

3.1 Propiedades físicas de las papas

En el Cuadro 1 se presentan las medias con desviación estándar (SD) de las propiedades físicas de las papas utilizadas para la prueba técnica del prototipo clasificadas en cuatro grupos.

Cuadro 1. Características físicas de los tubérculos utilizados para la prueba técnica del prototipo.

Parámetro	Media ± SD			
	S1	S2	S3	S4
Largo (mm)	109.73 ± 10.74	93.32 ± 9.00	72.40 ± 9.22	57.48 ± 7.15
Ancho (mm)	75.12 ± 4.10	65.43 ± 4.28	54.45 ± 8.18	43.33 ± 3.34
Grosor (mm)	60.38 ± 6.57	52.61 ± 5.41	45.05 ± 3.87	36.45 ± 1.98
Peso (g)	269.33 ± 40.98	177.92 ± 21.86	99.87 ± 20.38	52.03 ± 6.24

3.2 Validación de la estructura y modelo 3D del prototipo

En la Figura 8 se presentan los resultados del análisis estático de la tensión de von Mises, el valor mínimo fue de $1.290 \times 10^3 \text{ N m}^{-2}$ (MPa) en el elemento 15829 y el valor máximo fue de $4.702 \times 10^7 \text{ N mm}^{-2}$ (MPa) en el elemento 14426, al compararse con el límite elástico mínimo del acero ASTM A36 (250 MPa) no excedió dichos valores.

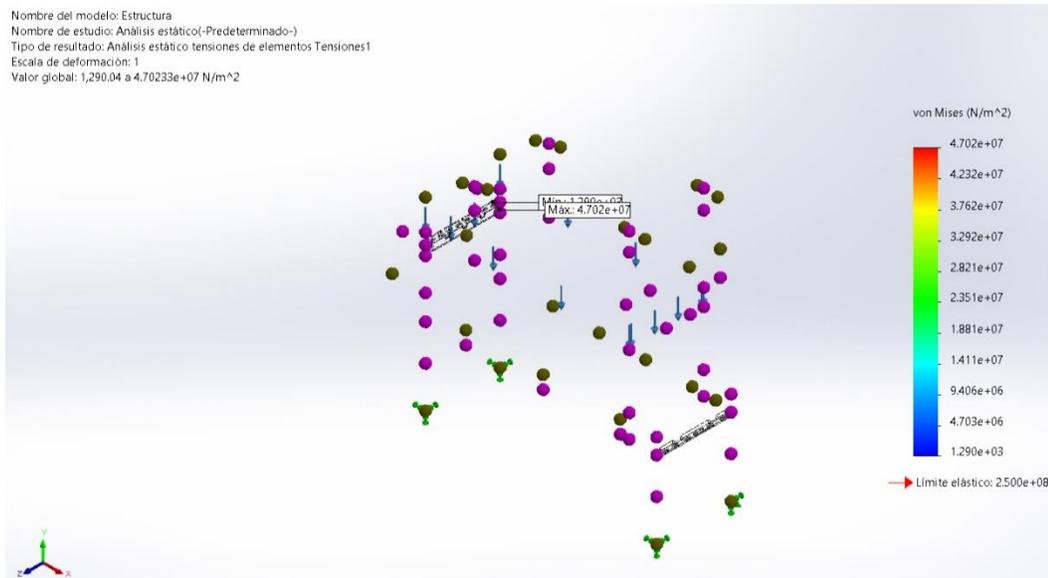


Figura 5. Tensiones (von Mises) de la estructura.

La Figura 6 muestra los resultados del desplazamiento resultante máximo fue de 1.002 mm en el nodo 148125, se distingue gráficamente que se localiza en medio de la estructura. Los resultados de la deformación unitaria estática fueron de 0 a 1.975×10^{-4} , siendo la máxima en el elemento 14426 (Figura 7).

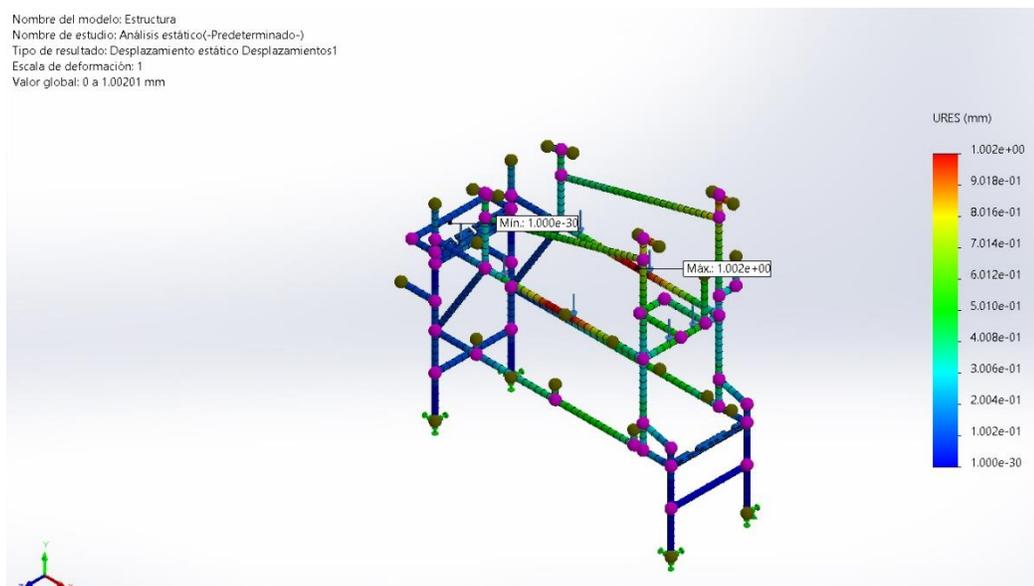


Figura 6. Desplazamiento estático de la estructura.

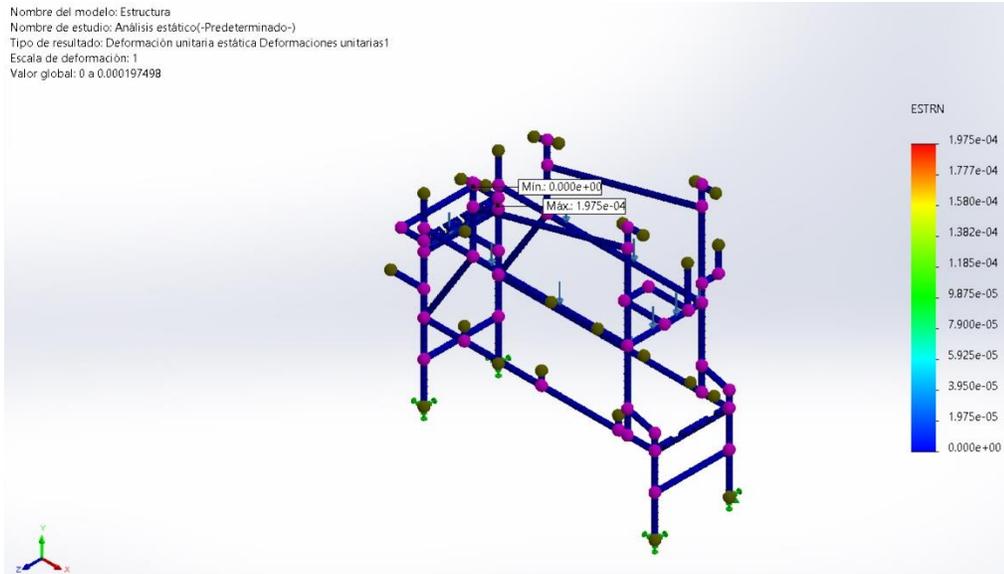


Figura 7. Deformación unitaria estática de la estructura.

La estructura del prototipo tiene un factor de seguridad mínimo de 2.958 en el nodo 14671 y un máximo de 7.721×10^{15} , es decir la estructura soporta tres veces el peso aplicado (Figura 8).

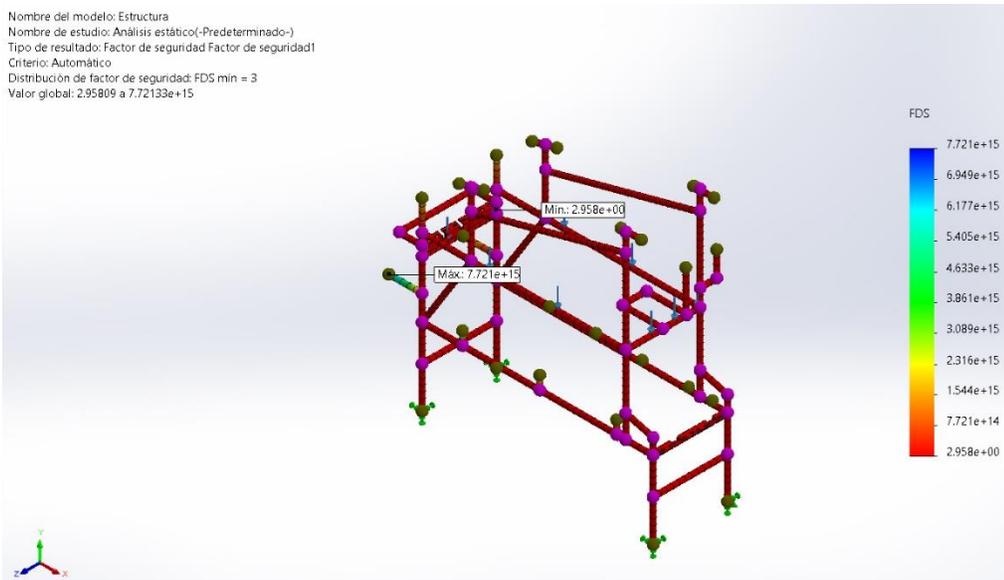


Figura 8. Factor de seguridad de la estructura.

En la Figura 9 se presenta el resultado en CAD del prototipo diseñado en vista isométrica con los principales componentes que lo conforman. El sistema de

limpieza está conformado de tres cepillos rotativos que giran a 200 rev min^{-1} y el sistema de clasificado funciona con dos rodillos sin fin que giran a 40 rev min^{-1} y dos rodillos lisos sin transmisión de potencia. El prototipo funciona con apoyo de cuatro personas, dos de ellas vacían las cajas de tubérculos y dos cambian las cajas llenas.

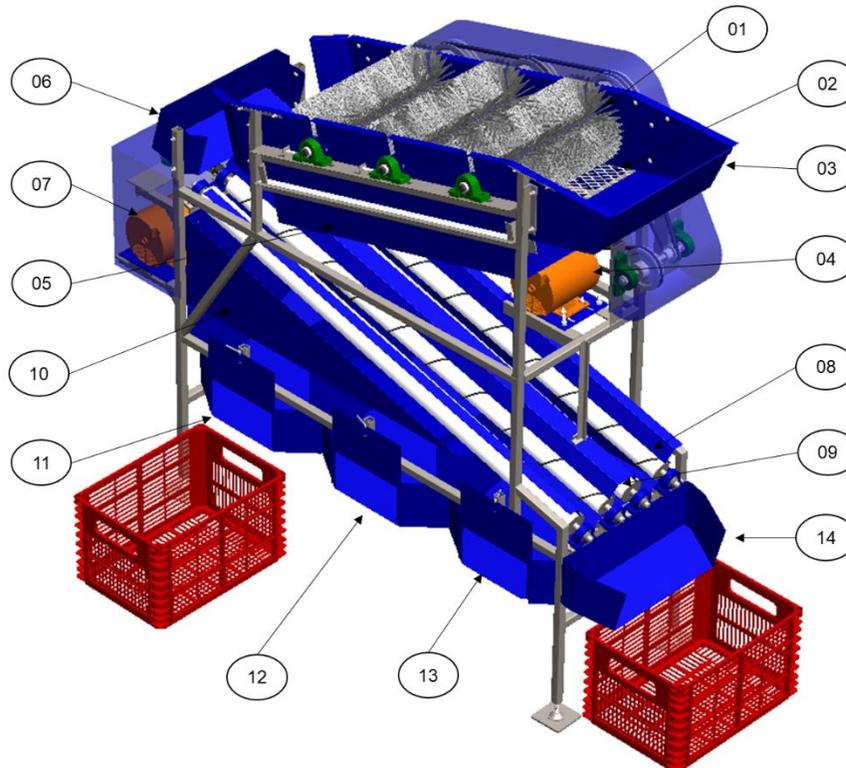


Figura 9. Vista isométrica del prototipo, compuesto de (01) cepillo rotativo, (02) Lámina desplegada ranurada para filtración de tierra, (03) tolva del sistema de limpieza, (04) motor eléctrico de 2 Hp, (05) tolva de almacén de tierra, (06) tolva de redirección de papas, (07) motor eléctrico de 0.5 Hp, (08) rodillo sin fin, (09) rodillo liso, (10) tolva de clasificación, (11) vaciado de papas S4, (12) vaciado de papas S3, (13) vaciado de papas S2 y (14) vaciado de papas S1

3.3 Valores teóricos del prototipo

En el Cuadro se presentan los valores teóricos calculados para los parámetros más sobresalientes del prototipo. La máquina tiene una capacidad de 32 papas

alineadas a lo largo de los rodillos con un peso aproximado de 5.4 kg, tiene un flujo promedio de 4 tubérculos s⁻¹ equivalente a 0.636 kg.

Cuadro 2. Valores teóricos de parámetros para el sistema de clasificación del prototipo.

Parámetro	Valor
Número de papas en 1511.3 mm (59.5 in) por rodillo sinfín (tubérculos)	17
Peso promedio de las papas por cada rodillo sinfín a lo largo (kg)	2.705
Velocidad de desplazamiento lineal de cada rodillo sinfín (m s ⁻¹)	0.102
Flujo de tubérculos transportados por cada rodillo sinfín (tubérculos s ⁻¹)	2
Potencia del motor eléctrico uno (Hp)	0.5
Potencia del motor eléctrico dos (Hp)	2

3.4 Prueba técnica y costos de construcción

En el Cuadro se presentan las características técnicas del sistema de clasificación del prototipo. Widodo *et al.* (2013) reportaron que la capacidad de la clasificación manual es de 75 kg h⁻¹ persona⁻¹ y en una jornada laboral (8 h) obtiene una productividad de 600 kg día⁻¹ mientras que el prototipo desarrollado de esta investigación fue de 2289.6 kg h⁻¹ y 18316.8 kg día⁻¹, es decir, con el prototipo se obtiene 30 veces la productividad manual de una persona.

De acuerdo con el resultado general de eficiencia mostrada en el Cuadro 3, se obtuvo un porcentaje 77.14 % de papas clasificadas correctamente en el grupo S1, 74.88 % para los del grupo S2, 78.62 % para los del grupo S3 y 75.00 % para los del grupo S4. Farhadi *et al.* (2012b) obtuvieron una eficiencia promedio cercano del 68.75 % y Ghanbarian *et al.* (2010) obtuvieron una eficiencia del 70 %, mientras que, Alemu *et al.* (2021) obtuvieron una eficiencia del 97.67 %, Valentin *et al.* (2016) obtuvieron una eficiencia del 92.56 %, Huda *et al.* (2019) obtuvieron un 91.57 % de eficiencia. Estos resultados de eficiencia pueden

deberse al que los principios de clasificación son diferentes, además las variedades también son diferentes, así mismo el número de grupos de tamaño también difiere. La eficiencia de cada grupo no rebasó el 80 % debido a la forma irregular de las muestras con las que se trabajó, algunas papas tenían el peso del grupo correspondiente pero sus dimensiones no coincidieron con los de la Norma Mexicana (Secretaría de Economía, 2002) debido a que son alargadas y otras redondas. Además, el prototipo no clasificó adecuadamente las papas con un peso cercano al límite superior e inferior de los rangos establecidos.

Cuadro 3. Características técnicas del sistema de clasificación del prototipo.

Parámetro	Valor
Consumo de energía (kW h ⁻¹)	0.367
Productividad del prototipo (kg h ⁻¹)	2289.6
Eficiencia del sistema de clasificación (%)	34.06
Papas dañadas (%)	3.11

Cabe resaltar que las papas del grupo S3 son las papas utilizadas como semilla por los productores de la región de Tlaxco, sin embargo, también utilizan papas del grupo S4 para abarcar más área de siembra con menos kilogramos optimizando costos en la siembra, por ello, frecuentemente no separan estos dos grupos.

En el Cuadro 4 se presentan los costos de fabricación del prototipo, se consideraron dos motores eléctricos, los materiales de construcción que incluyeron PTR cuadrada, ángulos, barra redonda para los ejes, lámina, cepillos, tubo PVC hidráulico, chumaceras, tornillería y consumibles que incluyeron discos de corte, desbaste, acabados y soldadura.

Cuadro 4. Costos de construcción del prototipo.

Artículo/factor	Costo (\$)
Materiales y consumibles	16500.00
Motor eléctrico de 0.5 Hp (con motorreductor)	5000.00
Motor eléctrico de 2 Hp	2500.00
Total (\$)	24000.00

5 Conclusiones

Se desarrolló un análisis funcional del sistema para el prototipo, considerando las características, etapas, funciones y subfunciones. Se desarrolló el diseño de detalle, dimensionamiento y modelado 3D en el programa SolidWorks de la clasificadora de papas, se obtuvieron los planos de fabricación. Se construyó el prototipo para clasificar tubérculos de papa para pequeños productores con una productividad de 2289.6 kg h⁻¹ con dos pares de rodillos sin fin y lisos. El prototipo puede clasificar en cuatro tamaños de papas como lo indica la Norma Mexicana con una eficiencia de 34.06 % y con 3.11 % de papas dañadas, su costo de fabricación fue de \$ 24 mil pesos mexicanos. Las muestras de las papas obtenidas para la prueba técnica variaron en sus dimensiones y sus pesos, las cuales no coincidieron con los establecidos en la Norma Mexicana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología -CONACyT- por el apoyo económico, también a la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el apoyo económico, así mismo al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola por las facilidades del uso de sus instalaciones para la realización de este estudio de investigación.

Referencias

- Alemu, D., Fanta, A., & Getnet, B. (2021). Performance Evaluation of Engine Operated Potato Grader. *Ethiopian Journal of Agricultural Sciences*, 31(2), 61–71.
- FAOSTAT. (2008). Food and Agricultural Organization of United Nations, Rome, Italy. <http://faostat.fao.org>.
- Farhadi, R., Sakenian, N., & Azizi, P. (2012a). Design and construction of rotary potato grader (part I). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(2), 304–314.
- Farhadi, R., Sakenian, N., & Azizi, P. (2012b). Rotary potato grader optimization. Part II. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(6), 987–990.
- Ghanbarian, D., Kolchin, N. N., Hasan Beigi, S. R., & Ebrahimi, R. (2010). Design and development of a small potato-grading machine using capron net. *Journal of Food Process Engineering*, 33(6), 1148–1158. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00331.x>
- Huda, MN, Uddin K. (2019). Design, fabrication and performance evaluation of a small drum type potato grader. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(4), 107-114.
- Mahgoub, H, Eisa G. & Youssef M. (2015). Análisis molecular, bioquímico y anatómico de algunos cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) que crecen en Egipto. *Revista de ingeniería genética y biotecnología*, 13 (1), 39-49.
- Secretaría de Economía. (2002). Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Tubérculo. Papa (*Solanum tuberosum* L.). Especificaciones y método de prueba. Normas mexicanas. Dirección general de normas. NMX-FF-022-SCFI-2002.
- Torres R., Martínez A., & Rosario A. (2021). Model and Software for the Regulation of an Inclined Belt Sorter for Agricultural Products. *Revista*

Ciencias Técnicas Agropecuarias, 30(1).

Valentin, M., Villota, E., Malamug, V., & Agulto, I. (2016). Evaluation of a Helix Type Potato Grader. *CLSU International Journal of Science & Technology*, 1(1). <https://doi.org/10.22137/ijst.2016.v1n1.05>

Widodo, T. W., Pitoyo, J., Anggit, D., & Rahmarestia, E. (2013). Design and development of potato grading machine. *Acta Horticulturae*, 1011, 125–132. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.1011.14>

5 CONCLUSIONES GENERALES

Se determinaron algunas propiedades físico-mecánicas de papa de la variedad Fianna, las cuales ayudan a comprender su comportamiento durante operaciones de cosecha, postcosecha y transporte. Además, sirven como soporte en el diseño y rediseño de equipos mecánicos para mejorar la eficiencia de estas operaciones y lograr obtener un menor costo de estas. El coeficiente de fricción estático de las papas del grupo S4 mostró los valores más altos, estos disminuyen conforme la papa aumenta de tamaño; el ángulo de rodadura aumentó mientras las papas aumentan de tamaño, pero se detectaron excepciones, debido a que su forma es variable. A partir de las pruebas de compresión axial, se concluyó que las papas en posición horizontal soportan más carga de compresión con una deformación menor en comparación con las papas en posición vertical, pero en ambas posiciones, la carga a compresión aumenta proporcionalmente con el tamaño de los tubérculos. La firmeza fue obtenida con pruebas de impacto, se demostró una disminución lenta con respecto al tiempo transcurrido a partir del impacto, esta propiedad cambia en función directa del material, el área y la altura de impacto, la temperatura, la humedad relativa y la cantidad de luz a la que exponga el tubérculo. Se diseñó y construyó un prototipo para clasificar papas, la eficiencia obtenida puede deberse a la forma irregular de las muestras con las que se trabajó, algunas papas tenían el peso del grupo correspondiente pero sus dimensiones no coincidieron con lo que establece la Norma Mexicana debido a la variación en su forma, unas son alargadas y otras redondas. El prototipo no clasificó adecuadamente las papas con un peso cercano al límite superior e inferior de los rangos establecidos.

La máquina puede adaptarse para clasificar otros productos más uniformes en su esfericidad y forma, como es el caso de la naranja, además de ser un producto agrícola menos propenso a los daños mecánicos.

La productividad del prototipo podría aumentar en una hora de trabajo limpio, para ello es necesario añadir más rodillos sin fin y rodillos lisos. Otra mejora a futuro, puede ser la adaptación de un sistema para la transmisión de potencia (para omitir los motores eléctricos) con la toma de fuerza del tractor.

6 ANEXOS

Construcción del prototipo



Figura 1. Vista frontal del prototipo.



Figura 2. Vista posterior del prototipo



Figura 2. Vista isométrica y lateral izquierdo del prototipo.

Prueba técnica del prototipo



Figura 3. Muestras de papas utilizadas en la prueba técnica.



Figura 4. Prueba del prototipo con papas del grupo S4.

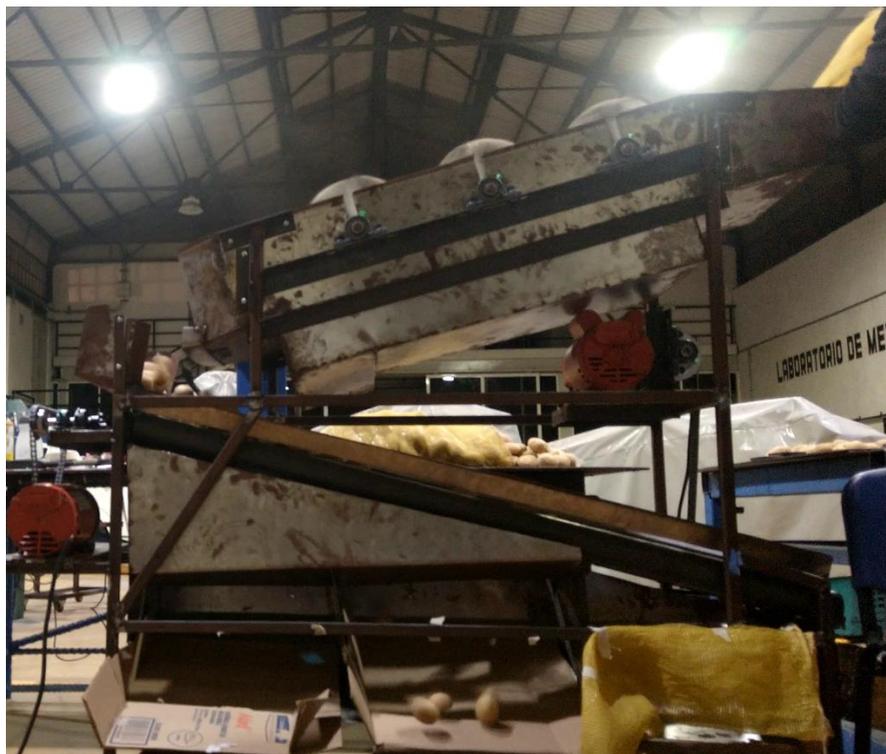


Figura 5. Prueba del prototipo con papas S3.



Figura 6. Clasificación de papas S2.

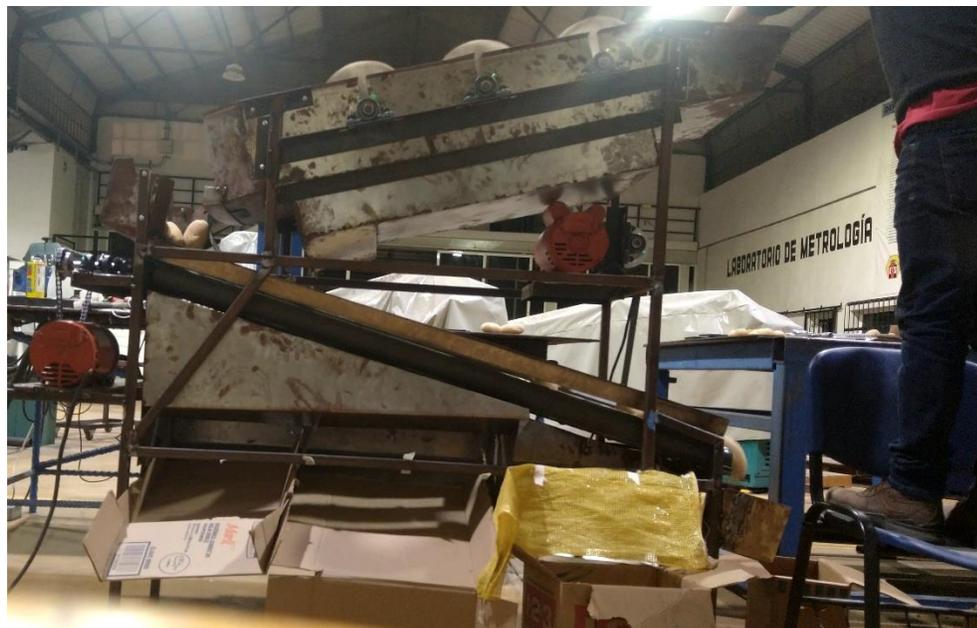
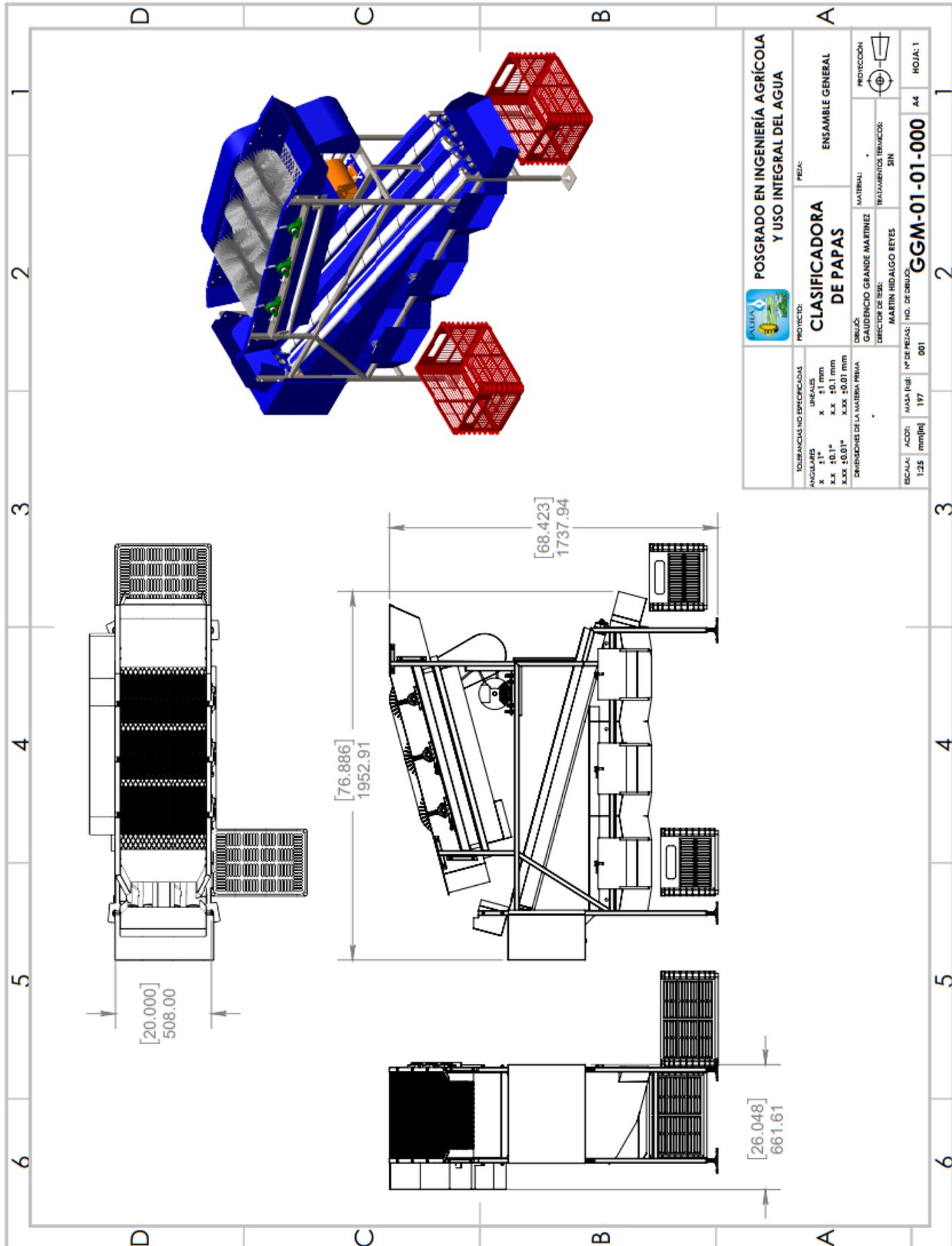


Figura 7. Clasificación de papas S1.



 POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA		CLASIFICADORA DE PAPAS		ENSAMBLE GENERAL	
TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS: ANGULARES X ±1° LINEALES X ±1 mm X.X ±0.1° X.X ±0.1 mm X.XX ±0.01° X.XX ±0.01 mm		PROYECTO: GAUDENCIO GRANDE MARTINEZ		MATERIAL: TRATAMIENTOS TERMICOS: SIN	
DIMENSIONES DE LA MATERIA PRIMA:		DEBILIDAD: MARTIN HIDALGO REYES		PROTECCIÓN:	
ESCALA: 1:25		ACOD: 197		NO. DE PIEZAS: 001	
MASSA [kg]: 197		Nº DE PIEZAS: 001		GGM-01-01-000	
				A4	
				HOJA: 1	