Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Evaluación de métodos físicos para la extracción y calidad del agua recuperada de residuos agroalimentarios

Evaluation of physical methods for the extraction and quality assessment of water recovered from agri-food waste

Cano-Gómez, C.I.[1], Wong-Arguelles, C.[2], Muñiz-Márquez, D.B.[1], Hinojosa-López, J.I.[1], Soni-Aradillas, C.G.[1], Mata-Guzmán, R.[1], Hernández-Hernández, J.[1], Wong-Paz, J.E.[1]*

[1] Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 79080, Cd. Valles, San Luis Potosí, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8308-7038, https://orcid.org/0000-0002-8070-1194, https://orcid.org/0000-0002-8751-2388,

[2] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Cd. Valles, S.L.P., México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-5023, https://orcid.org/0000-0002-5866-2678*.

christian.cano@uaslp.mx; cynthia.wong@tecvalles.mx; diana.marquez@uaslp.mx; jessica.hinojosa@uaslp.mx; a294857@alumnos.uaslp.mx; a301179@alumnos.uaslp.mx; a324167@alumnos.uaslp.mx; jorge.wong@uaslp.mx*

Innovación tecnológica: Recuperación y valorización de agua contenida en residuos agroalimentarios de mercados municipales mediante métodos físicos de extracción, con evaluación integral de calidad fisicoquímica y microbiológica para su reutilización no potable.

Área de aplicación industrial: Gestión y aprovechamiento de residuos agroalimentarios; tratamiento y reutilización de agua no potable; agricultura y riego indirecto; producción de bioinsumos líquidos; economía circular aplicada a sistemas agroalimentarios y agroindustria.

Recibido: 22 enero 2026
Aceptado: 18 julio 2026

Abstract

Agri-food waste generated in municipal markets represents an environmental concern due to its high volume, rapid degradation, and inadequate disposal practices. Nevertheless, the high moisture content of fruit and vegetable residues makes them a promising feedstock for water recovery through low-cost and easily implementable physical processes. This study aimed to evaluate the recovery yield and the physicochemical and microbiological quality of water obtained from agri-food waste generated in a local market in Ciudad Valles, San Luis Potosí, Mexico, in order to determine its feasibility for non-potable applications under current Mexican regulations. A six-month monitoring period was conducted using biweekly sampling of discarded residues collected from local vendors. The collected waste was classified according to frequency and generation volume, and four representative residues were selected: tomato, carrot, melon, and watermelon.

For each residue, samples of 1,000 ± 0.1 g were processed in triplicate using two physical extraction methods: mechanical pressing and grinding. Extraction yield (% w/w) and optical density at 600 nm were determined as indicators of water recovery efficiency and suspended solids/turbidity, respectively. The obtained extracts were subsequently clarified by vacuum filtration and centrifugation. Physicochemical parameters were assessed, including pH, electrical conductivity, turbidity, total dissolved solids, alkalinity, total hardness, nitrogen compounds, fluorides, and trace metals. Microbiological quality was evaluated by determining total and fecal coliforms, the presence of *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Giardia lamblia*. Results were compared with the Mexican standards NOM-127-SSA1-2021 and NOM-003-SEMARNAT-1997. Water recovery performance depended on the type of residue and the extraction method applied. Mechanical pressing showed higher efficiency for soft matrices such as tomato, whereas grinding improved water release from more compact tissues such as melon and watermelon. Optical density values tended to be slightly higher in ground extracts, suggesting increased carryover of suspended particles. Physicochemical characterization revealed slightly acidic pH values, high turbidity, and elevated concentrations of nitrogen compounds. In addition, trace metals such as Cr, Mn, and Ni were detected at levels exceeding the maximum permissible limits established by NOM-127-SSA1-2021. Microbiological analysis indicated the presence of total and fecal coliforms in all samples and *E. coli* only in carrot extract, while *Salmonella* spp. and *Giardia lamblia* were not detected. Although the recovered water does not meet drinking water quality criteria, its composition suggests potential for non-potable reuse, particularly for indirect agricultural applications or as a base for liquid bioinputs, provided that complementary treatments such as disinfection and metal removal are implemented.

Keywords: agri-food waste, water recovery, physicochemical analysis, microbiological quality, sustainable valorization.

Resumen

La generación de residuos agroalimentarios en mercados municipales representa un problema ambiental debido a su alta disponibilidad, rápida degradación y disposición inadecuada. Sin embargo, su elevado contenido de humedad convierte a estos materiales en una fuente potencial para la recuperación de agua mediante métodos físicos de bajo costo y fácil implementación. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de recuperación y la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua obtenida a partir de residuos agroalimentarios generados en un mercado local de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, con el fin de determinar su viabilidad para usos no potables conforme a la normativa mexicana vigente. Durante un periodo de seis meses se realizó un muestreo quincenal de residuos descartados por comerciantes, clasificándolos por frecuencia y volumen de generación. Con base en esta caracterización se seleccionaron residuos representativos de tomate, zanahoria, melón y sandía. Cada muestra (1,000 ± 0.1 g) se procesó por triplicado mediante dos métodos físicos de extracción: prensado mecánico y trituración. Se determinó el rendimiento de extracción (% p/p) y la densidad óptica a 600 nm como indicador indirecto de turbidez y sólidos suspendidos. Posteriormente, los extractos fueron clarificados mediante

filtración al vacío y centrifugación, y se analizaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos totales disueltos, alcalinidad, dureza, compuestos nitrogenados, fluoruros y metales) y microbiológicos (coliformes totales y fecales, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia*), comparando los resultados con la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-003-SEMARNAT-1997. Los rendimientos obtenidos dependieron del tipo de residuo y del método aplicado, observándose mayor eficiencia del prensado mecánico en matrices blandas como el tomate, mientras que la trituración favoreció la recuperación en residuos más compactos como melón y sandía. La densidad óptica mostró valores ligeramente superiores en los extractos obtenidos por trituración. El análisis fisicoquímico evidenció pH ligeramente ácido, turbidez elevada y concentraciones significativas de compuestos nitrogenados, además de la presencia de metales como Cr, Mn y Ni por encima de los límites de la NOM-127-SSA1-2021. En el análisis microbiológico se detectaron coliformes totales y fecales en todas las muestras y *E. coli* únicamente en el extracto de zanahoria, mientras que *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia* estuvieron ausentes. Aunque el agua recuperada no cumple criterios de potabilidad, sus características sugieren potencial de aprovechamiento en usos agrícolas indirectos o como base para bioinsumos líquidos, siempre que se apliquen tratamientos complementarios de desinfección y control de metales.

Palabras clave: residuos agroalimentarios, recuperación de agua, análisis fisicoquímico, calidad microbiológica, valorización sostenible.

1. Introducción

La generación de residuos agroalimentarios en mercados municipales representa un problema ambiental relevante debido a su alto volumen, rápida degradación y disposición inadecuada. En México, estos residuos están constituidos principalmente por frutas y hortalizas descartadas por razones comerciales, lo que contribuye a la contaminación ambiental y al desperdicio de recursos asociados a su producción (Martínez et al., 2024a). A nivel global, se estima que cerca del 45% de las frutas y verduras producidas se pierden o desperdician, implicando un uso ineficiente del agua y la energía involucradas en los sistemas agroalimentarios (Angeles-Segoviano et al., 2023).

Debido a su elevada humedad (75–95 %), los residuos vegetales constituyen una fuente potencial para la recuperación de agua mediante procesos físicos simples. Estudios previos han demostrado que métodos como el prensado mecánico y la trituración permiten recuperar fracciones líquidas de manera eficiente, con bajo consumo energético y sin el uso de reactivos químicos, lo que los hace compatibles con esquemas de economía circular y valorización de residuos (Tedesco et al., 2021).

La creciente presión sobre los recursos hídricos en México, donde más del 70% del agua disponible se destina a la agricultura, refuerza la necesidad de explorar fuentes alternativas de agua no convencional (Bautista-Capetillo et al., 2025). En este contexto, la recuperación de agua a partir de residuos agroalimentarios representa una estrategia complementaria que permite reducir la carga ambiental de estos desechos y, simultáneamente, generar corrientes líquidas con potencial de reutilización agrícola o biotecnológica (Lee et al., 2024).

El presente estudio evalúa la recuperación y caracterización del agua obtenida a partir de

residuos agroalimentarios generados en un mercado local de Ciudad Valles, San Luis Potosí, mediante métodos físicos de extracción. Se analizan los rendimientos y la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua recuperada, con el objetivo de determinar su viabilidad para usos no potables, particularmente en aplicaciones agrícolas indirectas, conforme a la normativa mexicana vigente. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 es el marco jurídico vigente en México que establece los límites permisibles de calidad para el agua destinada al uso y consumo humano. Si se pretende evaluar la viabilidad de potabilizar el agua obtenida de residuos agroalimentarios generados en un mercado local, es indispensable contrastar sus parámetros fisicoquímicos con esta norma para garantizar la protección de la salud pública y prevenir enfermedades crónicas o agudas. En cambio, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público; por lo tanto, permite evaluar el agua obtenida desde la perspectiva de la economía circular y reutilización de subproductos industriales. Al buscar reintroducir este recurso al ciclo antropogénico, la legislación mexicana obliga a cumplir con los límites establecidos en esta norma para garantizar que no represente un riesgo para la salud pública o los ecosistemas.

2. Materiales y métodos

2.1 Recolección y caracterización del material vegetal

La recolección de residuos agroalimentarios se realizó en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, durante un periodo de seis meses (febrero-julio 2025) mediante muestreo quincenal. Los residuos seleccionados correspondieron a frutas y hortalizas descartadas por daño mecánico, madurez avanzada o defectos estéticos, se excluyó el material que presentaba signos evidentes de putrefacción, mal olor intenso, crecimiento fúngico visible o contaminación externa. El material recolectado fue trasladado al Laboratorio de Investigación en Alimentos de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca (UASLP). Para obtener muestras representativas, se aplicó el método de cuarteo conforme a la NOM-AA-015-1985. Con base en la frecuencia y volumen de generación, se seleccionaron cuatro residuos vegetales predominantes, los cuales se emplearon como materia prima en las etapas experimentales subsecuentes.

Las muestras no fueron sometidas a desinfección química previa, con el fin de conservar las condiciones reales del residuo generado en el mercado y evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua recuperada bajo un escenario representativo. Únicamente se retiró manualmente material extraño visible cuando fue necesario. Las muestras se procesaron en un periodo no mayor de 4 h.

2.2 Métodos de extracción

Los residuos vegetales seleccionados se segmentaron manualmente en piezas de entre 2 y 5 cm, para facilitar su manejo y extracción. Posteriormente, se pesaron 1,000 ± 0.1 g de cada tipo de residuo en una balanza analítica (Ohaus, Pioneer PA214, USA), procesándose cada muestra por triplicado.

Se compararon dos métodos físicos de extracción para determinar su eficiencia: prensado mecánico y trituración. El primer método consistió en la extracción directa de la fracción líquida mediante prensado mecánico. Se empleó una prensa mecánica manual de laboratorio modelo YZQ-6A, equipada con cubeta de acero inoxidable, placa compresora y bolsa de nylon grado alimentario. Los residuos fueron cortados manualmente en fragmentos de 2–5 cm y se procesaron 1,000 ± 0.1 g por corrida. La

muestra se colocó dentro de la bolsa de nylon y se distribuyó uniformemente en la cubeta interior del equipo, cuya capacidad útil fue de 5.43 L. La presión fue aplicada manualmente mediante el sistema de rosca trapezoidal y mango en forma de T, girando lentamente en sentido horario hasta alcanzar el límite físico de presión manual o hasta observar una reducción significativa del flujo de extracción. El tiempo de prensado fue de aproximadamente 10–30 min, dependiendo del tipo de residuo vegetal.

El segundo método consistió en la extracción por trituración mediante un Extractor Metálico Tipo Turmix (Modelo 7000, México) equipado con presionador de frutas y verduras, tapa, disco rallador de acero inoxidable, canastilla metálica perforada y recipiente colector. Los residuos fueron presegmentados en piezas de 5–8 cm y se procesaron hasta 1,000 g por corrida. La muestra se introdujo por porciones a través de la abertura superior del equipo y se empujó de forma controlada hacia el disco rallador mediante el presionador. La trituración se realizó en ciclos de 30–45 s hasta obtener una pulpa fluida homogénea. El tiempo total de trituración fue de aproximadamente 10–30 min por cada 1,000 g de muestra, dependiendo de la textura del residuo. Los extractos obtenidos por ambos métodos fueron conservados a 4 ± 1 °C y analizados en un periodo máximo de 12 h posterior a la extracción.

Como limitación metodológica, la presión exacta de prensado, el tamaño de poro de la bolsa de nylon, la velocidad real del extractor y la distribución de tamaño de partícula de la pulpa no fueron cuantificados instrumentalmente. No obstante, se estandarizaron las condiciones operativas mediante la masa inicial de muestra, el tamaño de corte, el tiempo de operación, el criterio de reducción del flujo en prensado y la obtención de una pulpa homogénea en trituración.

El rendimiento de extracción (% p/p) se calculó conforme a la Ecuación 1, considerando la relación entre la masa del líquido extraído y la masa inicial del residuo vegetal:

$$Rendimiento\ (\%) = \frac{m_{liquído\ recuperado}}{m_{muestra\ inicial}} x100. \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Asimismo, se midió la densidad óptica del extracto mediante un espectrofotómetro Vis (Thermo Scientific™ Genesys 50, USA) a 600 nm, como parámetro complementario para estimar la concentración de sólidos suspendidos y carga orgánica total.

Ambos métodos fueron comparados con base en sus rendimientos de extracción y su densidad óptica. Los resultados fueron procesados estadísticamente para determinar diferencias significativas ($p < 0.05$).

2.3 Análisis fisicoquímico

Con base en los rendimientos obtenidos, se seleccionó una muestra representativa por cada tipo de residuo (sandía, melón, zanahoria y tomate) correspondiente al método de extracción que presentó el mayor rendimiento de recuperación de agua. Estas muestras fueron utilizadas para las etapas analíticas posteriores, tanto fisicoquímicas como microbiológicas.

Las muestras seleccionadas fueron sometidas a un tratamiento previo de depuración para eliminar partículas sólidas y compuestos coloidales que pudieran interferir con los análisis. Cada muestra fue filtrada con bomba de vacío (Rocker 300, USA) utilizando papel de celulosa Whatman No. 1, y posteriormente centrifugada durante 15 minutos a 4000 rpm

en una centrífuga BioBase (China). El sobrenadante clarificado fue recolectado y almacenado en recipientes de vidrio a 4 ± 1 °C hasta su análisis.

Se determinaron los parámetros físicos: pH, turbidez, color aparente, olor, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD); y los parámetros químicos: alcalinidad, dureza total ($CaCO_3$), fluoruros, nitratos, nitritos, metales y metaloides (Pb, Cd, Cr, Zn, Ni, Mn, Al, Mg, Ca).

Las determinaciones se realizaron mediante el fotómetro multiparamétrico para agua y aguas residuales modelo HI 83399 (Hanna Instruments, Italia), con los métodos específicos para cada parámetro de acuerdo con la Tabla 1. Los valores de pH, CE y STD se determinaron con un medidor multiparamétrico Oakton PC2700 (USA). Todos los análisis se efectuaron por triplicado.

Tabla 1. Métodos y rangos de concentración de parámetros químicos del fotómetro multiparamétrico HI 83399.

Parámetro	Método	Rango
Alcalinidad	Colorimétrico	0 a 500 mg/L ($CaCO_3$)
Dureza total	Adaptado de Método 130.1 de EPA	0 a 250 mg/L ($CaCO_3$)
Fluoruros	Adaptado del Método SPADNS de Métodos estandarizados para el análisis de agua y agua residual 18th edición.	0 a 2 mg/L (F^-)
Nitratos	Adaptado del Método de Reducción de Cd	0 a 30 mg/L (NO_3^--N)
Nitritos	Adaptado del Método de Diazotización 354.1 de la EPA	0 a 600 mg/L (NO_2^- -N)
Nitrógeno Total	Ácido cromotrópico	0 a 150 mg/L (N)
Calcio	Oxalato	0 a 400 mg/L (Ca^{2+})
Magnesio	Calmagita	0 a 150 mg/L (Mg_2^+)
Aluminio	Aluminón	0 a 1 mg/L (Al_3^+)
Manganeso	PAN	0 a 300 mg/L (Mn)
Níquel	PAN	0 a 1 mg/L (Ni)
Cromo	Adaptado del método difenilcarbohidrazida D1687 (ASTM)	0 a 300µg/L (Cr VI)
Zinc	Colorimétrico del zincon	0 a 3 mg/L (Zn)

2.4 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico se realizó sobre las mismas muestras utilizadas para la caracterización fisicoquímica. Se evaluaron coliformes totales y fecales mediante la técnica del número más probable (NMP), así como la presencia de *Escherichia coli*, *Salmonella spp*. y quistes de *Giardia lamblia*, conforme a la NOM-210-SSA1-2014.

Los resultados se expresaron en NMP/100 mL o como presencia/ausencia, según correspondiera, y se interpretaron con base en los límites normativos aplicables.

2.5 Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media ± desviación estándar. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, seguido de una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey), considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó utilizando Graphpad prism 10.

3. Resultados

3.1 Clasificación de los residuos agroalimentarios recolectados

Durante seis meses de muestreo quincenal en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, se recolectaron y clasificaron los residuos agroalimentarios descartados por los comerciantes locales. Los residuos identificados se agruparon en función de su origen vegetal y frecuencia de aparición, obteniéndose una distribución porcentual que se muestra en la Figura 1.

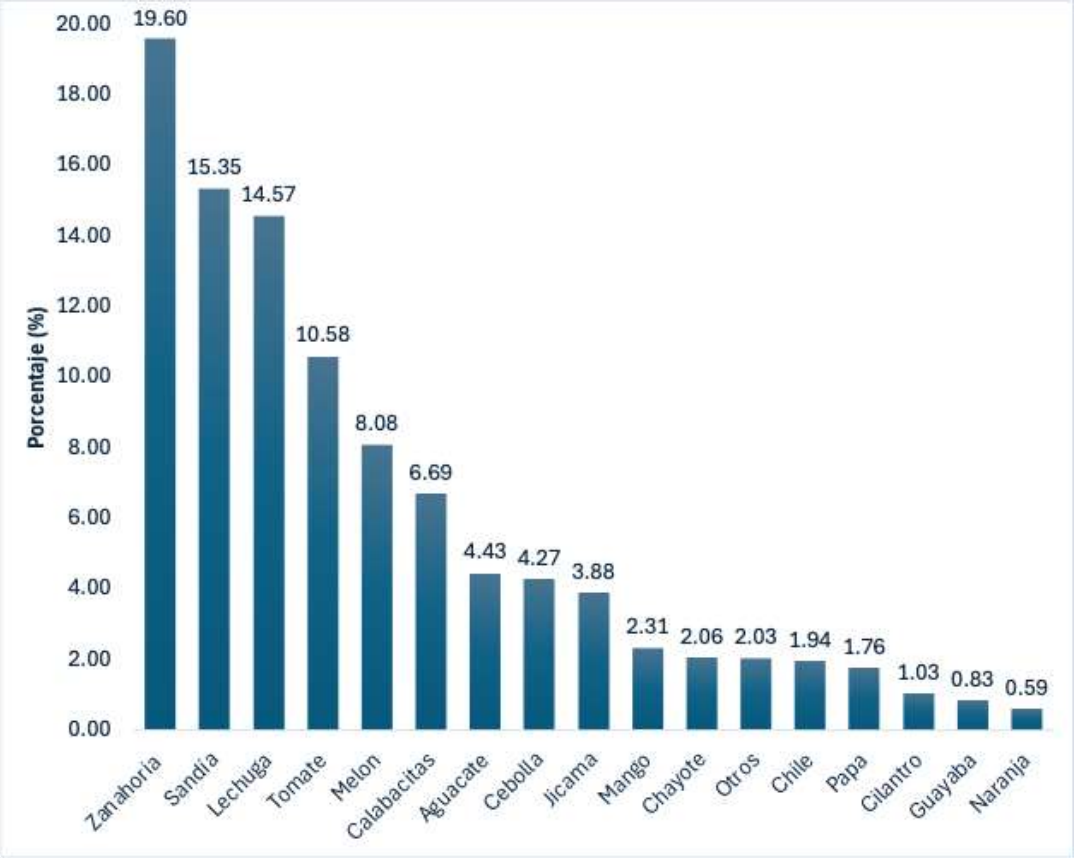


Figura 1. Distribución porcentual de los residuos agroalimentarios recolectados en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Los resultados evidenciaron que los residuos con mayor proporción fueron zanahoria (19.60%), sandía (15.35%), lechuga (14.57%) y tomate (10.58%), los cuales en conjunto representaron más del 60% del total recolectado durante el periodo de estudio. En menor proporción se registraron melón (8.08%), calabacita (6.69%), aguacate (4.43%) y cebolla (4.27%), mientras que otros residuos como jícama, mango, chayote, chile y papa presentaron frecuencias inferiores al 3%.

A partir de estos resultados, se seleccionaron cuatro tipos de residuos representativos: tomate, sandía, melón y zanahoria, para las fases experimentales de extracción de agua recuperada.

3.2 Métodos de extracción

Se evaluó el rendimiento de extracción de agua a partir de los cuatro residuos vegetales seleccionados (tomate, sandía, melón y zanahoria) mediante dos métodos físicos: prensado mecánico y trituración. Los extractos líquidos obtenidos se muestran en la Figura 2, donde se aprecia la variación en el aspecto y color del líquido extraído según el tipo de residuo y el método aplicado.



Figura 2. Extractos obtenidos de los residuos vegetales.

Los rendimientos obtenidos presentaron variaciones significativas entre métodos y tipos de residuo. En el prensado mecánico, los valores más altos se registraron para el tomate (80.5–81.5 %) y el melón (61.5–65.0 %), mientras que la zanahoria mostró los valores más bajos (40.5–43.5 %). En contraste, el método de trituración alcanzó rendimientos superiores en sandía (76.5–80.0 %) y melón (64.0–69.0 %), superando ligeramente al prensado en estos casos. Los valores promedio de rendimiento obtenidos se presentan en la Figura 3.

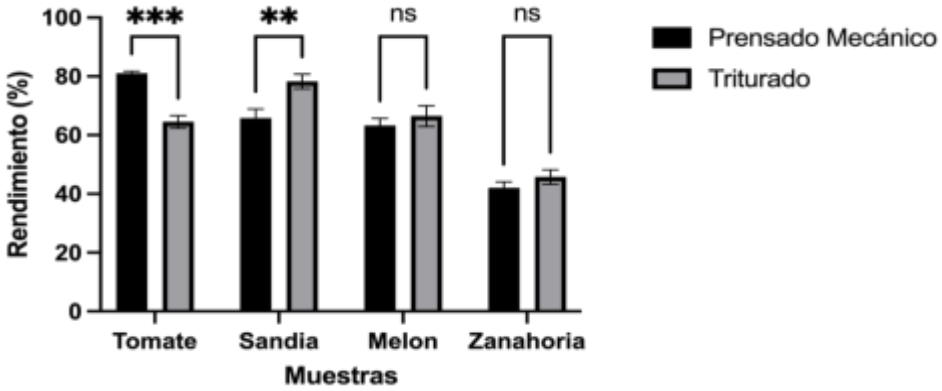


Figura 3. Rendimiento promedio de extracción de agua (% p/p) a partir de residuos de tomate, zanahoria, melón y sandía mediante prensado mecánico y trituración. Los valores corresponden a la media ± desviación estándar (n = 3). * indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, ANOVA de dos vías, prueba de Tukey).

De acuerdo con los valores observados, el rendimiento promedio del método de prensado mecánico osciló entre 40% y 81%, mientras que el método de trituración presentó un rango de 44% a 78%.

De manera complementaria, se evaluó la densidad óptica (DO) del líquido extraído como parámetro indicativo de la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos. Los resultados se ilustran en la Figura 4. En general, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre los métodos de extracción; sin embargo, se registraron valores ligeramente superiores en las muestras obtenidas por trituración, particularmente en sandía, melón y zanahoria.

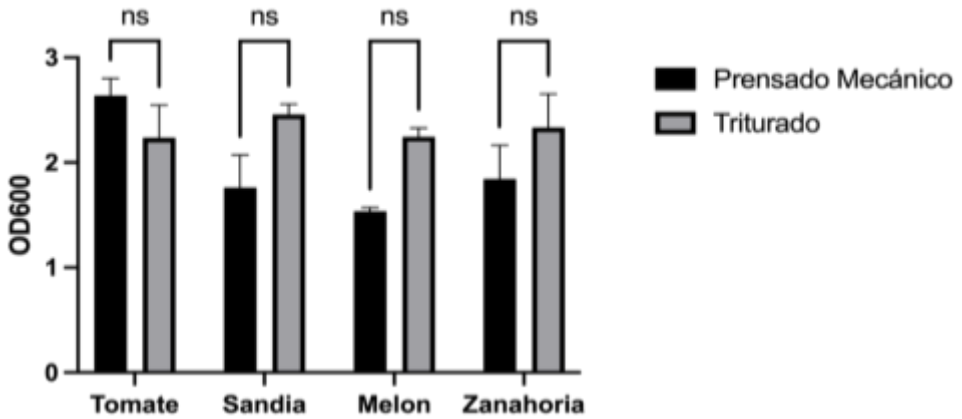


Figura 4. Densidad óptica (600 nm) del líquido recuperado de residuos agroalimentarios mediante prensado mecánico y trituración. Los valores representan la media ± desviación estándar (n = 3). No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre métodos ($p > 0.05$).

Los valores de DO oscilaron aproximadamente entre 1.5 y 2.6 unidades de absorbancia a 600 nm, con tendencia a valores mayores en los líquidos provenientes del método de trituración. En contraste, los líquidos obtenidos por prensado mecánico mostraron valores menores de DO, especialmente en tomate y melón.

3.3 Análisis fisicoquímico

Previo a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, los extractos líquidos obtenidos mediante prensado mecánico y trituración fueron sometidos a postratamiento mediante filtración al vacío y centrifugación. Los rendimientos finales de recuperación de agua clarificada variaron en función del tipo de residuo y del método de extracción empleado. En todos los casos, el primer valor corresponde al prensado mecánico y el segundo a la trituración: tomate 62.79 y 41.10 %, sandía 64.56 y 55.93 %, melón 50.60 y 33.93 %, y zanahoria 38.05 y 35.20 %, respectivamente. Estos resultados indican que, después del postratamiento, el prensado mecánico presentó los mayores rendimientos finales de agua clarificada en los cuatro residuos evaluados.

En cuanto a la densidad óptica posterior al postratamiento, también se observaron diferencias entre métodos. El primer valor corresponde al prensado mecánico y el segundo a la trituración: tomate 0.64 y 0.44 UA, sandía 0.19 y 0.30 UA, melón 0.14 y 0.12 UA, y zanahoria 1.09 y 0.37 UA, respectivamente. Estos valores fueron menores que los obtenidos en los extractos crudos, lo que evidencia la reducción de sólidos suspendidos, partículas finas y material coloidal durante la filtración al vacío y la centrifugación, tal como se muestra en la Figura 5.

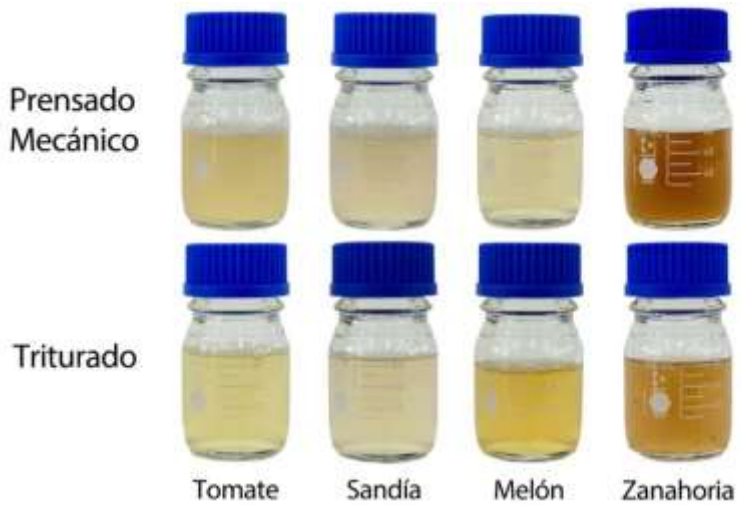


Figura 5. Extractos obtenidos del post-tratamiento de ambos métodos de extracción.

Con base en los rendimientos finales posteriores al postratamiento, se seleccionó el prensado mecánico como método de obtención de los extractos destinados a la caracterización fisicoquímica y microbiológica.

Los resultados obtenidos se agrupan en tres categorías: parámetros físicos, parámetros químicos y contenido de metales, presentados en las Tablas 2, 3 y 4, respectivamente. Estos se compararon con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua y Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Los parámetros físicos analizados incluyeron pH, CE, turbidez y STD. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.

El pH de las muestras presentó valores comprendidos entre 4.61 y 6.65, con los valores más bajos en la muestra de tomate y los más altos en sandía. La conductividad eléctrica varió entre 854 y 5,136 µS/cm, mientras que los STD se situaron en el rango de 1,129 a 3,090 ppm.

La turbidez mostró valores elevados en todas las muestras, con un rango de 42.1 a 479.5 NTU, siendo las muestras de melón y sandía las que presentaron los valores más altos.

Tabla 2. Parámetros físicos del agua recuperada a partir de residuos agroalimentarios.

Parámetro	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
pH	4.6125*	6.475*	6.193*	6.65	6.5 a 8.5	-
Cond. E. (µS/cm)	854	4,331*	1,866*	5,136*	1000	-
Turbidez (NTU)	219.5*	42.1*	479.5*	89.475*	4	-

Los valores que no cumplen o exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros químicos evaluados: alcalinidad, dureza total ($CaCO_3$), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-), nitrógeno total, fluoruros y STD.

La alcalinidad varió entre 150.75 y 855 mg/L, con valores mayores en la muestra de zanahoria. La dureza total se situó entre 164.25 y 206.25 mg/L. En cuanto a los compuestos nitrogenados, los nitritos oscilaron entre 6.25 y 21.5 mg/L, y los nitratos entre 4 y 36 mg/L. El nitrógeno total presentó valores de 66 a 340.5 mg/L, siendo la muestra de zanahoria la que registró la mayor concentración.

Las concentraciones de fluoruros variaron entre 0.005 y 1.915 mg/L, con los valores más elevados en las muestras de tomate y sandía.

Tabla 3. Parámetros químicos del agua recuperada.

Parámetro (mg/L)	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Alcalinidad	235.25	855	150.75	234	-	-
Dureza total como $CaCO_3$	165	164.25	187.5	206.25	**500**	-
Nitritos	10.75*	21.5*	6.25*	8.5*	**0.9**	-
Nitratos	4	6.5	5.5	36*	**11.0**	-
Nitrógeno total	99.5	340.5	66	115.5	-	-
STD	1,623*	2,149*	1,129*	3,090*	**1000**	20-30
Fluoruros	1.915*	1.887*	0.005	1.28*	**1.5**	-

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

El contenido de metales analizado incluyó aluminio (Al), calcio (Ca), cromo (Cr), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn), cuyos valores se resumen en la Tabla 4.

El aluminio (Al) se detectó en concentraciones entre 0 y 0.0825 mg/L, mientras que el calcio (Ca) presentó valores de 35 a 99.0 mg/L. El cromo (Cr) osciló entre 0.16 y 0.5318 mg/L, siendo este último valor el más alto, registrado en la muestra de sandía.

El magnesio (Mg) se encontró en el rango de 33.25 a 90.75 mg/L, mientras que el manganeso (Mn) varió entre 0.114 y 0.3 mg/L. El níquel (Ni) se detectó en concentraciones de 0 a 1.0 mg/L, y el zinc (Zn) en valores de 0.0325 a 0.5025 mg/L.

Tabla 4. Concentración de metales en el agua recuperada.

Parámetro (mg/L)	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Aluminio	0.005	0	0.0825*	0.0025	0.20	-
Calcio	99	93.75	37.75	35	-	-
Cromo	0.16*	0.423*	0.247*	0.5318*	0.05	1.50
Magnesio	33.25	42.5	90.75	34	-	-
Manganeso	0.114	0.171*	0.3*	0.185*	0.15	-

Níquel	0.0619	0	1*	0.7720*	0.07	4
Zinc	0.3175	0	0.0325	0.5025	-	20

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

En conjunto, los resultados fisicoquímicos evidenciaron diferencias cuantitativas entre las muestras analizadas, reflejando la influencia del tipo de residuo agroalimentario en la composición del agua recuperada.

3.4 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico se efectuó sobre las mismas muestras de agua recuperada utilizadas en los análisis fisicoquímicos, correspondientes a la fracción líquida con mayor rendimiento por tipo de residuo. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, siguiendo los métodos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, que regula la determinación de microorganismos indicadores y patógenos en agua y hielo para uso y consumo humano.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, la cual resume los valores detectados para coliformes totales (NMP/100 mL), coliformes fecales (NMP/100 mL), *Escherichia coli* (presencia/ausencia), *Salmonella spp*. (presencia/ausencia) y quistes de *Giardia lamblia* (número de quistes/20 L), comparados con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 5. Resultados microbiológicos del agua recuperada.

Parámetro microbiológico	Unidades	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Coliformes totales	NMP/100 mL	4*	22*	>1100*	>1100*	<1.1 ó No detectable	-
Coliformes fecales	NMP/100 mL	5*	7*	30*	73*	<1.1 ó No detectable	240-1000
Escherichia coli	Ausencia o Presencia/100 mL	ausencia	Presencia*	ausencia	ausencia	ausencia	-
***Salmonella* spp.**	Presencia o Ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	-
Giardia lamblia	Quistes/20L	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	Ausencia

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con ***** para fines comparativos normativos.

Los resultados mostraron presencia de coliformes totales en todas las muestras, con valores de 4 NMP/100 mL en tomate, 22 NMP/100 mL en zanahoria y valores superiores a 1100 NMP/100 mL en melón y sandía. En el caso de los coliformes fecales, se detectaron concentraciones de 5 NMP/100 mL en tomate, 7 NMP/100 mL en zanahoria, 30 NMP/100 mL en melón y 73 NMP/100 mL en sandía.

Para *Escherichia coli*, únicamente se detectó presencia en la muestra de zanahoria, mientras que en tomate, melón y sandía se registró ausencia. La detección de *Salmonella* spp. resultó negativa en todas las muestras. Asimismo, no se detectaron quistes de *Giardia lamblia* en ninguna de las muestras analizadas. Estos resultados indican la presencia de microorganismos indicadores de

contaminación fecal en el agua recuperada, aunque sin detección de *Salmonella* spp. ni *Giardia lamblia* bajo las condiciones evaluadas.

4. Discusión

La caracterización de residuos agroalimentarios recolectados en el mercado municipal de Ciudad Valles mostró una predominancia de frutas y hortalizas de alta rotación comercial, destacando zanahoria, sandía, lechuga y tomate como los residuos más frecuentes. Este comportamiento concuerda con reportes previos que describen a los mercados urbanos como puntos críticos de generación de residuos orgánicos con elevada humedad y rápida biodegradabilidad, lo que representa tanto un reto ambiental como una oportunidad para su valorización (Martínez et al., 2024; Peña-Ortiz et al., 2025).

La composición observada también coincide con tendencias reportadas en otros contextos, donde los residuos de frutas y vegetales constituyen la fracción dominante de los desechos orgánicos y se caracterizan por alto contenido de agua y materia volátil, atributos relevantes para estrategias de aprovechamiento físico y biotecnológico (Asquer et al., 2013; Gupta et al., 2023; Morales-Polo et al., 2019).

En el contexto nacional, los resultados aquí presentados son consistentes con la caracterización de la fracción orgánica de residuos municipales reportada en Saltillo, Coahuila, por Martínez et al., (2024), donde los residuos procedentes de mercados centrales representaron el 25.78% del total y mostraron una composición rica en carbohidratos y fibras vegetales.

En conjunto, estos resultados confirman que la fracción orgánica vegetal de los mercados locales no solo representa la mayor proporción de los residuos sólidos urbanos, sino que constituye una materia prima estratégica para procesos de valorización, como la recuperación de agua, compostaje o digestión anaerobia. Además, la estacionalidad observada en la disponibilidad de ciertos residuos coincide con lo reportado en otros mercados latinoamericanos, donde la variabilidad temporal influye directamente en el tipo y volumen de residuos generados (Mozhiarasi et al., 2019).

En este estudio, el rendimiento de recuperación de agua dependió del tipo de residuo y del método de extracción empleado, lo cual es consistente con la influencia de la estructura celular, textura del tejido vegetal y distribución del agua libre e intracelular. El prensado mecánico resultó más eficiente en matrices blandas, mientras que la trituración favoreció la liberación de agua en materiales más compactos. Estas diferencias pueden atribuirse a las características estructurales de cada residuo vegetal, particularmente a la textura del tejido, la proporción de agua libre e intracelular y el contenido de fibra. En matrices blandas como el tomate, el prensado mecánico favoreció la liberación de agua debido a que la compresión directa permite extraer con mayor facilidad la fracción líquida disponible en el tejido parenquimático. En cambio, en residuos con tejidos más compactos o con mayor resistencia estructural, como melón, sandía y zanahoria, la trituración promovió una mayor disrupción de las paredes celulares y una reducción del tamaño de partícula, facilitando la liberación del agua retenida dentro de la matriz vegetal. Por ello, los porcentajes de extracción no dependieron únicamente del contenido de humedad del residuo, sino también de la forma en que cada método interactuó con la organización celular, la fibra y la resistencia mecánica del material. Esta tendencia se ha descrito en investigaciones previas, donde la eficiencia de extracción se relaciona directamente con el grado de

disrupción de la pared celular y con la resistencia mecánica del tejido vegetal (Montenegro-Landívar et al., 2021; Rifna et al., 2023). Además, el uso de métodos físicos simples se considera una alternativa viable para esquemas de valorización con bajo requerimiento energético y menor complejidad operativa, particularmente cuando se busca escalabilidad en contextos locales (Baykus et al., 2024; Teigiserova et al., 2021).

La densidad óptica del líquido recuperado tendió a ser mayor en las muestras obtenidas por trituración. Esta diferencia puede explicarse por el grado de ruptura del tejido vegetal producido por cada método. El prensado mecánico favorece principalmente la salida de la fracción líquida mediante compresión, con una menor incorporación de partículas finas. En cambio, la trituración provoca una mayor disrupción celular y reducción del tamaño de partícula, lo que incrementa el arrastre de sólidos suspendidos, pigmentos, pectinas y fracciones coloidales. Por esta razón, los extractos obtenidos por trituración tendieron a presentar valores más altos de absorbancia a 600 nm, especialmente en residuos con tejidos más compactos o con mayor contenido de material estructural. Este comportamiento ha sido reportado en extractos obtenidos mediante procesos de alta disrupción, donde el aumento de turbidez se asocia con la presencia de partículas finas, pectinas y material orgánico disperso (Salahuddin et al., 2021). Aunque esta característica puede representar una limitante para aplicaciones que requieran mayor claridad del agua, también puede interpretarse como un indicador de mayor contenido de compuestos orgánicos potencialmente aprovechables, dependiendo del uso final del líquido recuperado (Lee et al., 2024; Tedesco et al., 2021).

Desde el punto de vista fisicoquímico, el agua recuperada mostró un perfil heterogéneo, las diferencias observadas entre los cuatro residuos evaluados pueden atribuirse a la composición natural de cada matriz vegetal. Cada residuo presenta proporciones distintas de ácidos orgánicos, sales minerales, sólidos solubles, compuestos nitrogenados, fibra, pigmentos y metabolitos solubles, los cuales son liberados en diferente magnitud durante la extracción y el postratamiento. Por ello, las diferencias entre tomate, zanahoria, melón y sandía no deben interpretarse como variaciones aleatorias, sino como resultado de la heterogeneidad composicional propia de cada residuo agroalimentario. Al contrastar los resultados analíticos obtenidos de los extractos (melón, sandía, tomate y zanahoria) con los límites máximos permisibles vigentes en la NOM-127-SSA1-2021, se identifican desviaciones críticas que impiden clasificar este recurso como apto para consumo humano sin un tratamiento avanzado previo. El agua obtenida de estos residuos vegetales presenta una carga química (especialmente nitritos, cromo, níquel y fluoruros) que la hace no apta para el consumo humano directo, requiriendo procesos específicos para la remoción de metales pesados y compuestos nitrogenados antes de cualquier consideración de reúso potable.

Los valores de pH obtenidos indican una naturaleza ligeramente ácida. De acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, el rango permisible para reúso de agua tratada en servicios públicos es de 5 a 10; por lo que el valor obtenido en la muestra de tomate (4.61) se encuentra fuera del límite inferior permisible, lo que restringiría su uso sin un tratamiento previo de neutralización (Romero et al., 2014). La marcada acidez, especialmente en el tomate, puede deberse a la presencia natural de ácidos orgánicos (como el cítrico y el málico) inherentes al fruto (Becerra-Castro et al., 2015). Aunque estos valores se encuentran fuera del rango establecido para potabilidad, reflejan condiciones típicas de matrices vegetales y

pueden influir en la estabilidad del sistema durante almacenamiento o tratamiento, debido a su efecto inhibitorio parcial sobre ciertos grupos microbianos (Othman et al., 2021).

En cuanto a la conductividad eléctrica, el extracto de sandía presentó la mayor conductividad eléctrica, con 5,136 µS/cm. Este valor fue superior a los intervalos de 1,237 a 2,355 µS/cm reportados para aguas residuales tratadas mediante lagunas de oxidación y lodos activados. Una conductividad elevada podría representar un riesgo de salinidad para el suelo y los cultivos, debido a que dificulta la absorción de agua y nutrientes (Valeria et al., 2020). La NOM-003-SEMARNAT-1997 no establece un límite máximo permisible para este parámetro.

En contraste, la turbidez elevada indica una carga significativa de partículas suspendidas y coloides orgánicos, lo cual representa un factor limitante para usos directos sin tratamiento. Los valores registrados, especialmente en melón y sandía, exceden drásticamente los límites de la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece un valor promedio mensual máximo de 20 a 30 mg/L de sólidos suspendidos para servicios al público con contacto directo o indirecto. Sin embargo, en aplicaciones agronómicas indirectas esta fracción puede aportar materia orgánica y micronutrientes, como se ha señalado en estudios donde aguas derivadas de residuos vegetales presentan componentes coloidales con potencial de retorno al suelo (Vazquez-Aguilar et al., 2022). Adicionalmente, las concentraciones elevadas de compuestos nitrogenados observadas en el agua recuperada sugieren la liberación de nitrógeno orgánico y formas inorgánicas asociadas a la degradación de proteínas y otros metabolitos del tejido vegetal. Este patrón coincide con reportes de efluentes hortofrutícolas donde el nitrógeno total puede alcanzar valores altos debido a la composición intrínseca del material y a su rápida transformación bioquímica (Qin et al., 2022). Aunque estos parámetros exceden límites de potabilidad, también representan una ventaja potencial para usos agrícolas indirectos, ya que pueden funcionar como fuente de nutrientes, siempre que se controle el riesgo sanitario y químico (Hassan et al., 2022).

En cuanto a la alcalinidad, el valor de la zanahoria (855 mg/L) actúa como un tampón del pH, lo cual puede ser favorable para la estabilidad del sistema, pero valores excesivos pueden alterar el pH del suelo a largo plazo (Barba et al., 2010). El calcio (73.5 - 99 mg/L) y el magnesio (33.25 - 90.75 mg/L) son nutrientes esenciales, pero su acumulación contribuye a la salinidad y dureza del agua, lo que puede degradar la estructura del suelo (Becerra-Castro et al., 2015). Respecto a los fluoruros, los valores detectados por encima de límites normativos en algunas muestras podrían relacionarse con la disponibilidad de este ion en suelos agrícolas o con prácticas de fertilización, tal como se ha documentado en sistemas hídricos con presencia natural o antropogénica de fluoruro (Martínez-Acuña et al., 2016).

Para los resultados de compuestos nitrogenados, a pesar de que no existe un límite máximo permisible por la NOM-003-SEMARNAT-1997, la FAO (2013), establece que el nitrógeno es un nutriente valioso que puede permitir un ahorro en fertilizantes químicos. Sin embargo, concentraciones superiores a 66 mg/L son potencialmente fitotóxicas, pudiendo causar un crecimiento foliar excesivo, retraso en la maduración y mala calidad del fruto (Valeria et al., 2020). Asimismo, los nitratos (hasta 36 mg/L) representan un riesgo de contaminación de acuíferos por lixiviación (Becerra-Castro et al., 2015; Sklarz et al., 2013).

En cuanto a metales traza, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece "*el agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Tabla 3 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*". El valor máximo en sandía de 0.5318 mg/L de Cr no excede el límite máximo permisible (1 mg/L). Salazar-Peralta, et. al. (2022), estudiaron aguas residuales provenientes de la industria con valores mayores de 1.5 mg/L de Cr (VI), lo cual evidencia que no tienen el tratamiento adecuado para su descarga y manejo. El cromo es un metal pesado que puede acumularse en el suelo y ser absorbido por las plantas, representando un riesgo de toxicidad en la cadena alimentaria (FAO, 2013). Mientras que el manganeso se encuentra dentro de los límites de riego comunes (≤0.3 mg/L), el níquel en concentraciones de 1.0 mg/L es motivo de vigilancia, ya que los metales pesados no se eliminan con tratamientos convencionales y tienden a la bioacumulación (Becerra-Castro et al., 2015). El Zn se encuentra dentro de los límites aceptables para riego, donde se permiten niveles de hasta 2.0 mg/L en algunas normativas internacionales y hasta 10 mg/L en efluentes tratados en México.

La presencia de Cr, Mn y Ni podría estar asociada con la composición natural de los residuos, la acumulación previa en los tejidos vegetales, el contacto con superficies metálicas o la contaminación ambiental. La presencia de metales pesados en los residuos orgánicos de cultivos como la zanahoria, el melón, la sandía y el tomate es el resultado de procesos de bioacumulación directa o indirecta a través de la cadena alimentaria (Clemens et al., 2016). Estos contaminantes pueden provenir de fuentes naturales, como la erosión de depósitos minerales y rocas volcánicas, o el lixiviado de suelos que contienen metales de forma primaria. Sin embargo, la actividad humana es una fuente crítica; el uso de aguas residuales industriales (de refinerías, acereras, curtiembres o la industria electrónica) y domésticas para el riego aporta metales como plomo, cadmio, cromo y níquel (OMS, 2011). Asimismo, las prácticas agrícolas intensivas introducen metales mediante la aplicación de plaguicidas y el uso excesivo de fertilizantes, los cuales pueden contener trazas de elementos (Alengebawy et al., 2021). Hallazgos similares han sido reportados en estudios sobre contaminación por metales en aguas y matrices asociadas a actividades agroindustriales (Mendoza-Mora et al., 2023; Ponce-Hernández et al., 2025). Por ello, cualquier esquema de reutilización requiere estrategias de remoción o control de metales cuando el destino sea agrícola o industrial.

El agua obtenida de estos residuos sólidos vegetales posee un alto valor fertilizante debido a su contenido de N, minerales y materia orgánica; no obstante, el incumplimiento de la normativa en parámetros como turbidez, nitrógeno total y cromo implica que no es apta para reúso directo ni descarga sin previo tratamiento (García Garduño et al., 2026; Martinez-Lopez et al., 2014). Se recomienda una dilución significativa o procesos como la coagulación-floculación para reducir la turbidez y procesos biológicos o de oxidación avanzada para degradar la carga orgánica y nitrogenada, con el fin de mejorar su compatibilidad con aplicaciones agrícolas (FAO, 2013).

En el componente microbiológico, la detección de coliformes y la presencia de *Escherichia coli* en al menos una de las muestras indican contaminación microbiológica asociada a la manipulación, almacenamiento o carga microbiana propia del residuo vegetal. Este resultado coincide

con reportes donde los residuos orgánicos húmedos favorecen el crecimiento de microorganismos indicadores, especialmente cuando existe contaminación cruzada durante el manejo (Mazari-Hiriart et al., 2008). La ausencia de *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia* es un hallazgo favorable, aunque no elimina la necesidad de tratamientos complementarios si se pretende reutilizar el agua recuperada, particularmente en escenarios agrícolas donde el contacto con cultivos o suelo pueda representar un riesgo sanitario. Se ha reportado que procesos terciarios de desinfección, como cloración o radiación UV, pueden reducir de manera efectiva microorganismos indicadores en aguas destinadas a riego (Christou et al., 2014).

A partir de los resultados obtenidos, la interpretación del agua recuperada debe diferenciarse según el posible destino de uso. En términos de potabilidad, las muestras evaluadas no cumplen con los criterios establecidos para agua de uso y consumo humano, debido a la presencia de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fuera de los límites de referencia, por lo que no deben considerarse aptas para consumo humano sin tratamientos avanzados de potabilización, desinfección y control de metales.

En relación con el reúso no potable, los resultados sugieren que el agua recuperada podría representar una corriente líquida de interés dentro de esquemas de economía circular; sin embargo, su aprovechamiento no puede plantearse como uso directo. Para este escenario sería necesario integrar tratamientos complementarios orientados a la reducción de turbidez, control de sólidos, ajuste de pH, remoción o control de metales y desinfección, además de verificar el cumplimiento normativo según el tipo de reúso considerado.

Para un posible uso agrícola indirecto, la presencia de compuestos nitrogenados, sales minerales y materia orgánica puede representar un aporte potencial de nutrientes. No obstante, este uso debe considerarse únicamente como una posibilidad condicionada, ya que se requiere evaluar previamente la salinidad, fitotoxicidad, acumulación de metales, estabilidad química y microbiológica, así como el efecto sobre suelo y cultivos. Por lo tanto, los resultados obtenidos no demuestran la aptitud agrícola directa del agua recuperada, sino que justifican estudios posteriores de validación.

Finalmente, en cuanto a su posible empleo como base para bioinsumos líquidos, la composición del agua recuperada podría ser de interés por su contenido de materia orgánica y nutrientes; sin embargo, su formulación requeriría procesos específicos de estabilización, control microbiológico, estandarización de composición, evaluación de vida útil e inocuidad. En consecuencia, el presente estudio debe interpretarse como una caracterización preliminar del potencial de valorización del agua recuperada, no como una validación final de uso. Se recomienda ampliar el alcance del estudio mediante la inclusión de un análisis riguroso de parámetros críticos adicionales, tales como la concentración de metales pesados y otros contaminantes emergentes característicos de los residuos agroindustriales. Asimismo, para fortalecer la viabilidad y transferibilidad del proyecto a escala real, es fundamental incorporar un estudio económico detallado que evalúe los costos de inversión, operación y el retorno financiero de la tecnología propuesta. Los estudios posteriores deberán incluir análisis confirmatorios de metales, evaluación de contaminantes emergentes y un análisis económico que considere los costos de inversión y operación, así como la viabilidad del proceso a escala real.

5. Conclusiones

La recuperación de agua a partir de residuos agroalimentarios generados en mercados locales mostró viabilidad técnica mediante métodos físicos simples, con rendimientos dependientes del tipo de residuo y del mecanismo de extracción aplicado. El prensado mecánico presentó mejor desempeño en matrices blandas, mientras que la trituración favoreció la liberación de agua en tejidos más compactos, lo que confirma que la selección del método debe ajustarse a las características estructurales del material vegetal.

El agua recuperada presentó limitaciones importantes para su uso potable y para cualquier aplicación directa, debido a la presencia de turbidez elevada, compuestos nitrogenados, metales traza y contaminación microbiológica indicadora. Por lo tanto, los resultados obtenidos no permiten afirmar su aptitud inmediata para reúso, sino que evidencian la necesidad de tratamientos complementarios de clarificación, ajuste fisicoquímico, desinfección y control de metales, además de validación analítica mediante métodos confirmatorios cuando corresponda. En conjunto, los resultados respaldan la valorización de residuos agroalimentarios como una estrategia sostenible para reducir el impacto ambiental de su disposición y generar corrientes líquidas reutilizables, contribuyendo a esquemas locales de economía circular y aprovechamiento alternativo del recurso hídrico.

En este sentido, el agua recuperada debe considerarse como una corriente líquida con potencial de valorización condicionado, particularmente para escenarios de reúso no potable, uso agrícola indirecto o formulación de bioinsumos líquidos. No obstante, dichos usos requieren estudios adicionales de estabilidad, inocuidad, toxicidad o fitotoxicidad, riesgo sanitario y desempeño agronómico antes de su implementación. En conjunto, los resultados respaldan la recuperación de agua como una estrategia preliminar de economía circular, pero no como una alternativa de aplicación directa sin tratamiento y validación posterior.

6. Agradecimientos

Proyecto financiado por el FIDEICOMISO 23871, número de proyecto 2024-02-2387116, administrado por el Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT).

7. Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

8. Referencias

1. Martínez RDS, Jiménez LD, Juárez OA, Hernández SC. 2024. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26(6):3665–80
2. Angeles-Segoviano M, Hernández-Vázquez B. 2023. Differentiation of food preservation methods to avoid waste. *Horticulture International Journal*. Volume 7(Issue 1):1–4
3. Tedesco DEA, Scarioni S, Tava A, Panseri S, Zuorro A. 2021. Fruit and Vegetable Wholesale Market Waste: Safety and Nutritional Characterisation for Their Potential Re-Use in Livestock Nutrition. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9478*. 13(16):9478
4. Bautista-Capetillo C, Pineda-Martínez H, Flores-Chaires LA, Pineda-Martínez LF. 2025.

Agriculture Resilient at Three Irrigation Modules of Zacatecas, Mexico: Water Scarcity and Climate Variability. *Agronomy 2025, Vol. 15, Page 800*. 15(4):800

5. Lee A, Lan JCW, Jambrak AR, Chang JS, Lim JW, Khoo KS. 2024. Upcycling fruit waste into microalgae biotechnology: Perspective views and way forward. *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 8:100203
6. Martínez RDS, Jiménez LD, Juárez OA, Hernández SC. 2024. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26(6):3665–80
7. Peña-Ortiz Z, Beristain-Cardoso R, Cervantes-Zepeda I, García-Mondragón D, Gallego-Alarcón I, González-Blanco G. 2025. Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: Potential and possible applications. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 41:297–309
8. Gupta PJ, Trivedi MJ, Soni HP. 2023. Proximate Analysis of Vegetable and Fruit Waste Collected from the Kadi Vegetable Market, Gujarat. *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*. 20(2):673–79
9. Morales-Polo C, Cledera-Castro M del M, Soria BYM. 2019. Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 6790*. 11(23):6790
10. Asquer C, Pistis A, Scano E. 2013. Characterization of fruit and vegetable wastes as a single substrate for the anaerobic digestion. *Environ. Eng. Manag. J.*
11. Mozhiarasi V, Raghul R, Speier CJ, Benish PM, Weichgrebe D, Srinivasan S V. 2019. Composition Analysis of Major Organic Fractions of Municipal Solid Waste Generated from Chennai. *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies: 7th IconSWM—ISWMAW 2017: Volume 1*, pp. 143–52
12. Montenegro-Landívar MF, Tapia-Quirós P, Vecino X, Reig M, Valderrama C, et al. 2021. Fruit and vegetable processing wastes as natural sources of antioxidant-rich extracts: Evaluation of advanced extraction technologies by surface response methodology. *J. Environ. Chem. Eng.* 9(4):
13. Rifna EJ, Misra NN, Dwivedi M. 2023. Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 63(6):719–52
14. Teigiserova DA, Tiruta-Barna L, Ahmadi A, Hamelin L, Thomsen M. 2021. A step closer to circular bioeconomy for citrus peel waste: A review of yields and technologies for sustainable management of essential oils. *J. Environ. Manage.* 280:111832
15. Baykus G, Unluturk S. 2024. Cold Pressed vs. Centrifugal Juice: Comparison in Terms of the Juice Yield, Physicochemical and

Phytochemical Properties. *Food Science and Engineering*, pp. 145–54
16. Salahuddin M, Basri M, Nadiah N, Shah AK, Sulaiman A, et al. 2021. Progress in the Valorization of Fruit and Vegetable Wastes: Active Packaging, Biocomposites, By-Products, and Innovative Technologies Used for Bioactive Compound Extraction. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3503*. 13(20):3503
17. Romero S, Villagomez A, Trasviña D, García J, Gallegos R, et al. 2014. Treatment And Use Of Wastewater In Mexicali, Baja California, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 181:591–601
18. Becerra-Castro C, Lopes AR, Vaz-Moreira I, Silva EF, Manaia CM, Nunes OC. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environ. Int.* 75:117–35
19. Othman YA, Al-Assaf A, Tadros MJ, Albalawneh A. 2021. Heavy Metals and Microbes Accumulation in Soil and Food Crops Irrigated with Wastewater and the Potential Human Health Risk: A Metadata Analysis. *Water 2021, Vol. 13, Page 3405*. 13(23):3405
20. Valeria F, Pardo G, Del M, Jacobo-Salcedo R, Cueto-Wong JA, et al. 2020. Caracterización de aguas residuales tratadas de la comarca lagunera y su viabilidad en el riego agrícola. *Rev. Mex. De Cienc. Agric.* 11(1):189–201
21. Vazquez-Aguilar C, Suarez-García SM, PÉREZ-DURAN MA, Reyes-Hernandez G. 2022. Comparative study of the physicochemical and microbiological parameters of two artesian wells in the community of San Pedro, Frontera, Centla, Tabasco. *ECORFAN Journal-Ecuador*, pp. 26–32
22. Qin Y, Li H, Ma S, Li K, Zhang X, et al. 2022. Recovery and utilization of phosphorus from fruit and vegetable wastewater. *Sci. Rep.* 12:
23. Hassan J, Rajib MMR, Sarker U, Akter M, Khan MNEA, et al. 2022. Optimizing textile dyeing wastewater for tomato irrigation through physiochemical, plant nutrient uses and pollution load index of irrigated soil. *Scientific Reports 2022 12:1*. 12(1):10088-
24. Barba LE, Torres P, Rodríguez Victoria JA, Marmolej LF, Pizarro CA. 2010. Influencia de la incorporación de lixiviados sobre la biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales domésticas. *Ingeniería e Investigación*. 30(1):75–79
25. Martínez-Acuña MI, Mercado-Reyes M, Alegría-Torres JA, Mejía-Saavedra JJ. 2016. Preliminary human health risk assessment of arsenic and fluoride in tap water from Zacatecas, México. *Environ. Monit. Assess.* 188(8):
26. FAO. 2013. Reutilización del agua y agricultura: Beneficios para todos?
27. Sklarz MY, Zhou M, Chavez DLF, Yakirevich A, Gillor O, et al. 2013. Effect of Treated Domestic Wastewater on Soil Physicochemical

and Microbiological Properties. *J. Environ. Qual.* 42(4):1226–35

28. Peralta AS, Salazar JAP, Salazar UP, Chávez RH. 2022. Tratamiento fisicoquímico de agua residual proveniente del proceso de cromatizado. *Científica*. 26(2):1–9
29. Clemens S, Ma JF. 2016. Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. *Annu. Rev. Plant Biol.* 67:489–512
30. *Guías para la calidad del agua de consumo humano (4º ED.); 2011 - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud*. www.paho.org
31. Alengebawy A, Abdelkhalek ST, Qureshi SR, Wang MQ. 2021. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*. 9(3):42
32. Mendoza-Mora F, Cruz-Cárdenas G, Silva JT, Ochoa-Estrada S, Álvarez-Bernal D. 2023. Evaluation of the physical and chemical quality and trace elements of water in Cupatitzio River, Michoacán. *Tecnología y ciencias del agua*. 14(5):364–412
33. Ponce-Hernández A, Carranza-Álvarez C, Ceballos-Maldonado JG, Rubio-Gómez JA, Martínez-Soto D. 2025. Overview of the heavy metal contamination in Mexico: sources of the contamination and issues in human health. *Environ. Geochem. Health*. 47 3(3):
34. Martinez-Lopez A, Padrón-Hernández W, Rodríguez-Bernal OF, Chiquito-Coyotl O, Escarola-Rosas MA, et al. 2014. Alternativas actuales del manejo de lixiviados. . 9(1):37–47
35. García Garduño EM, Linares-Hernández I, Castillo-Suárez LA. 2026. La segunda vida del agua: el arte de reciclar el recurso más esencial. *Revista Digital Universitaria*. 27(2):
36. Mazari-Hiriart M, Ponce-de-León S, López-Vidal Y, Islas-Macías P, Amieva-Fernández RI, Quiñones-Falconi F. 2008. Microbiological Implications of Periurban Agriculture and Water Reuse in Mexico City. *PLoS One*. 3(5):e2305
37. Christou A, Maratheftis G, Eliadou E, Michael C, Hapeshi E, Fatta-Kassinos D. 2014. Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 192:105–14